УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ГРОДНЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ЯНКИ КУПАЛЫ»

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

НАУЧНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ ИЗДАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Материалы XXXIV Международной
научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных
(г. Гродно, 23–24 апреля 2026 г.)

Гродно
ГрГУ им. Янки Купалы
2026

УДК 538.9
ББК 22.3
Ф50

Рекомендовано Советом физико-технического факультета ГрГУ им. Янки Купалы

Редакционная коллегия:
А. С. Воронцов (гл. ред.), *Н. Г. Валько* (зам. гл. ред.),
С. С. Ануфрик, *А. А. Маскевич*, *А. Е. Герман*

Издаётся в авторской редакции

Ответственный за выпуск: *Н. Г. Валько*

Техническое редактирование: *М. В. Вахмянина*
Компьютерная вёрстка: *Н. П. Уласевич*, *И. П. Зимницкая*
Подготовка упаковки: *Д. О. Савко*

Ф50 **Физика** конденсированного состояния [Электронный ресурс] : материалы XXXIV Междунар. науч.-практ. конф. студ., магистр., аспир. и молодых учёных (г. Гродно, 23–24 апр. 2026 г.) / ГрГУ им. Янки Купалы, физ.-техн. фак.; редкол.: А. С. Воронцов (гл. ред.), Н. Г. Валько (зам. гл. ред.) [и др.]. – Объём электрон. дан. 22,5 Мбайт. – 43,0 уч.-изд. л. – Гродно : ГрГУ, 2026. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Тираж 9 экз. – Заказ 018.

ISBN 978-985-582-729-1

Рассматриваются проблемы, отражающие связи между молекулярной структурой, составом, дефектностью и физическими свойствами различных веществ, конденсированных состояний в технике, и вопросы, связанные с методикой изучения физики конденсированного состояния. Адресовано всем интересующимся вышеуказанными проблемами.

УДК 538.9
ББК22.3

Издатель и изготовитель:
учреждение образования
«Гродненский государственный университет имени Янки Купалы».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/261 от 22.02.2024.
ул. Ожешко, д. 22, 230023, г. Гродно, Республика Беларусь.
www.grsu.by

ISBN 978-985-582-729-1

© Учреждение образования
«Гродненский государственный университет
имени Янки Купалы», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1. ИЗУЧЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ…..……... 10

Абдуллаева С. О. Получение твёрдого раствора $Si_{1-x}Ge_x$ из жидкой фазы..…….. 11

Koshchanova D. E. Получение GaAs-Ge-$(Ge_2)_{1-x}(GaAs)_x$ гетероструктур из жидкой фазы.…….. 12

Бакун В. С., Наумчик А. В., Копыцкий К. В. Разработка импортозамещающего состава адгезионного состава для формирования защитных покрытий деталей карданных валов..……. 14

Бернат К. В., Моисеенко А. Н., Могдалова А. А., Вертинский Л. С. Исследование свойств поверхности стали Р6М5 после ионного азотирования...……. 17

Блашкевич А. А. Морфология и структура поверхностного слоя стали Р6М5, легированного атомами Nb под действием компрессионных плазменных потоков……. 20

Бондарук А. А., Роткович А. А., Герман С. А., Тишкевич Д. И. Формирование функциональных устройств методом темплатного синтеза с использованием мембран на основе наноструктурированного пористого анодного оксида алюминия..…….. 22

Бородавченко О. М., Усенко К. В., Грибовский Д. А. Использование рентгеновской дифракции и рамановской спектроскопии для анализа структурных характеристик тонких плёнок $Cu(In,Ga)Se_2$…… 24

Будник В. С., Буксанов К. Е. Воздействие катионов состава RNH_3^+ на структуру поверхности и светопропускание монохлорзамещённых металлорганических перовскитов..…… 26

Вертинский Л. С., Могдалова А. А., Грицук А. А. Исследование трибологических характеристик стали 40Х, подверженной оксинитрированию…… 29

Виноградов Е. В. Влияние УФ-излучения на плотность и твёрдость композиционного материала Вакофлувис-20…… 32

Волынец М. А., Гога У. Е., Туманов Т. А. Электропроводящие углеродные композиции на основе нитроцеллюлозы и ХСЛ: синтез и влияние остаточного растворителя на свойства……. 34

Галиновский К. А. Влияние воздействия компрессионными плазменными потоками на трансформацию структуры и фазового состава вольфрама, легированного цирконием..…….. 37

Гой Р. М. Компенсация пространственной неоднородности поля влажности при групповой поверке гигрометров методом ротационного усреднения..…….. 39

Гришель О. В., Азаров С. М. Технологические преимущества формирования высокопрочных пористых структур из керамических волокон.……. 42

Гурбанович А. В. Перспективы применимости метода сканирующей фотоэлектронной микроскопии с использованием синхротронного излучения для изучения быстрозатвердевших фольг сплавов алюминия…… 44

Демидович С. А., Михеенко А. В., Кукуть Ю. М., Ковальчук Н. С. Влияние параметров ICP CVD осаждения диэлектриков на токи утечки в AlGaN/GaN HEMT…… 46

Демяшкевич И. А. Спектральные свойства красителя диалкиламино-бензилиден-малононитрила (DBMN) при встраивании в белок БСА и амилоидные фибриллы…….. 48

Дубинин Н. А., Римский Г. С., Желудкевич А. Л. Синтез и исследование магнитных свойств допированного самарием магнетита…… 50

Дубинин Н. А., Римский Г. С., Желудкевич А. Л. Синтез никель-цинковых ферритов-шпинелей с замещением ионов железа ионами гадолиния и изучение их кристаллической структуры и магнитных свойств..…… 53

Дубровщик А. С. Тушение флуоресценции стирилового производного бензотиазолия ионами йода…… 57

Жук К. А. Коррозионная стойкость сплавов магния МЛ-5, полученных литьём и компактированием стружки без нагрева.…….. 59

Зубрицкий А. А. Изучение микроэлементного состава биообъектов методом рентгенофлуоресцентного анализа.……..... 61

Иванюта С. М., Дудич В. В., Симоненко Д. А., Бердова Э. А. Сравнение мемристорных эффектов в структурах на основе анодных оксидов титана и ниобия.…….. 63

Ильченко Д. С., Тамашевская Г. С., Патапович М. П. Послойный анализ лазерной плазмы многокомпонентных сплавов.…….. 65

Кананович Н. А., Асмыкович Б. А., Грицук А. А. Исследование комбинированного метода упрочнения стали 40Х……... 67

Карпач П. В. Фотоуправляемая флуоресценция фотохромных полупроводниковых нанокомпозитов в плёнках.…… 70

Ким А. С. Модификация отражательной способности плёнок полиэфирэфиркетона, имплантированных ионами никеля.……... 72

Ким А. С. Электропроводность наноструктурированных слоёв полиэфирэфиркетона, модифицированных имплантацией ионов никеля……. 75

Киркоров А. С. Измерение внутренних напряжений в меди, обработонной компрессионными плазменными потоками…… 77

Кичко Е. В. Спектры КР цистеина в водной среде при варьировании pH..…… 80

Коваленко Д. А., Буневич М. А., Горбачёв Д. В. Зарядоперенос в выпрямляющих полупроводниковых оксидных структурах с пентаоксидом ниобия.…….. 83

Коваленко Д. А., Горбачёв Д. В., Аль-Махдави М. С. Х. Оценка размеров графитоподобных нанокластеров в плёнках углерода, полученных методом электронно-лучевого испарения.…… 85

Коростик Н. В., Радюш В. Ю. Синтез перовскитов в системе твёрдых растворов $(1\text{-}x)BiFeO_3 – x(KBi)_{1/2}TiO_3$…… 87

Котельникова А. Н., Федькин В. А., Канафьев О. Д., Греков И. А., Зубарь Т. И., Труханов А. В. Влияние комплексообразователей и параметров тока на химический состав плёнок в системе NiFeCu, осаждённых из комбинированного электролита…… 90

Котельникова А. Н., Федькин В. А., Канафьев О. Д., Греков И. А., Зубарь Т. И., Труханов А. В. Синтез градиентных и многослойных плёночных структур в системе NiFeCu из комбинированного электролита..……..... 94

Кринчик Ю. А. Спектральный анализ многокомпонентных металлических и неметаллических матриц методом ЛАЭС.…….…….. 97

Курбако Е. Г. Характеристики фторуглеродных покрытий, полученных прямым осаждением из ионных пучков.……...……..… 100

Курьян Н. Н. Изучение морфологических и размерных параметров осаждённых на подложки наноструктур оксидов металлов.…….…. 102

Курьян Н. Н. Изучение оптических характеристик коллоидных растворов наночастиц металлов и их оксидов..……...…… 105

Кустанович А. А., Шевчик С. В. Применение CdSe/ZnS для оценки pH флюоресцентным методом..…… 107

Лешок В. А. Повышение кинетических показателей ионно-плазменного азотирования конструкционной низкоуглеродистой стали предварительной деформацией..…….. 110

Марковская А. В. Исследование влияния параметров лазерного атомно-эмиссионного спектрометра на количество и относительную интенсивность спектральных линий почечных камней.…… 113

Машукевич И. А., Мякиш Б. А. Барьерное анодирование гадолиния в водных растворах лимонной и борной кислоты.…….. 114

Никончик Д. В., Старцева А. Л., Земляков Д. С. Структура и высокотемпературное окисление покрытий Cr-Al-O-N.……. 117

Новицкая А. В., Даденков И. Г., Толстик А. Л. Разделение временных компонент нестационарных решеток в кристалле силиката висмута при помощи поля гомодина.…….. 120

Овчинников П. Н., Дмитриевский А. А. Трансформационно-индуцированная пластичность наноструктурированной композиционной керамики на основе диоксида циркония.…… 122

Ордо С. В., Кузьмар И. И. Влияние режимов программируемого электролиза на функциональные свойства поликомпозиционных никелевых покрытий..……. 125

Осипенков Д. А. Структурно-фазовое состояние сплавов TiCu, сформированных компрессионными плазменными потоками, после высокотемпературного окисления……. 127

Павлова Н. А. Свойства и синтез коллоидных наночастиц $CuInS_2$..…….. 130

Павлович К. А., Ларин А. О., Желудкевич А. Л., Минчукова О. Ф. Исследование магнитных свойств капсулированного композиционного магнитомягкого порошка FeSiAl..…… 132

Паукова Р. О. Структурно-фазовые состояния Ti-35Nb-2Ta-3Zr сплава, модифицированного введением цинка и последующей компрессионной плазменной обработкой.……... 134

Переломец М. В. Исследование упруго-прочностных свойств эластомеров, облучённых УФ-излучением……..…… 136

Плясункова А. А. Характеризация структурных свойств перовскитных плёнок в программе ImageJ.……...…….. 138

Пухтеев А. О., Абраменко Е. В., Орехова Н. А. Анализ элементного состава коры плавления железных метеоритов……..…… 139

Родионова А. А., Филиппов В. В., Колпаков А. И., Сапрыкин И. С., Паньков А. Д. Магнитно-силовая микроскопия динамики перемагничивания никелевых наноплёнок на GaAs...……. 143

Роткович А. А., Бондарук А. А., Рязанов И. В., Герман С. А., Труханов А. В., Тишкевич Д. И. Сравнительное исследование полимерных композиционных материалов для защиты от ионизирующих излучений..……..…… 146

Рюмшин Ф. Д., Карпук Х. К. Состав, структура и механические свойства нанокомпозитных покрытий ZrSiN, облученных ионами ксенона...…….. 149

Самец А. Д. Лазерный экспресс-микроанализ таблетированных и жидких комплексов микроэлементов, содержащих магний..……. 152

Симоненко Д. А., Бердова Э. А. Формирование антиотражающих покрытий на основе наноструктурированного оксида циркония.……... 155

Столяр И. А., Малуха З. А., Шихова У. А., Зданович С. С., Прищепов И. А. Изучение неоднородности микроструктуры отожжённых быстрозатвердевших фольг сплава Al–Mg–Li–Sc–Zr методом дифракции обратнорассеянных электронов.…… 158

Тазиев Р. А., Мартынович Е. Ф. Кинетика термостимулированной люминесценции природного кварца: экспериментальное наблюдение каскадного заполнения ловушек..... 161

Томашевич Л. П., Дудич В. В., Иванюта С. М., Шеверденко А. В., Артюшкевич Г. Д. Влияние структурных параметров пористых оксидов вентильных металлов на удельную внутрипоровую поверхность..... 163

Томашевич Л. П., Шеверденко А. В., Артюшкевич Г. Д., Дудич В. В. Влияние локализации электрохимического анодирования плёнок титана на вольтамперные характеристики анодного процесса..... 166

Травкина Р. К., Молчан Д. С. Спектрально-люминесцентные свойства нового трикарбоцианинового красителя в растворах..... 168

Федосенко В. С., Горох Г. Г. Влияние концентрации исходных растворов на структурно-фазовое состояние системы Bi–Fe–O..... 171

Хомбак М. В., Крюков В. В., Романенко А. А., Кулакович О. С. Синтез перовскитных нанокристаллов состава $CsPbBr_XI_{3-X}$ и их люминесцентные свойства..... 173

Чумаченко Д. М. Исследование спектральных свойств бензтиазолового красителя Th-C7 при встраивании в белок БСА..... 175

Шевчик С. В., Кустанович А. А. Солюбилизация CdSe/ZnS квантовых точек на границе раздела фаз..... 177

Штырёв Д. И. Рельефные голографические элементы для формирования оптических вихрей..... 179

Шумейко А. Р., Невар Е. А. Исследование структурных и морфологических характеристик порошка ТС4 после электроразрядной обработки..... 182

Щерба У. К. Элементный анализ сильнозагрязнённых металлических и пористых неметаллических археологических артефактов посредством двухимпульсной лазерной абляции..... 185

Ярных А. С., Коростик Н. В. Определение условий синтеза перовскитов в системе твёрдых растворов $Bi_{1-x}Ho_xFeO_3$..... 188

Ковецкая А. А., Даденков И. Г. Методика определения температуропроводности металлов и полупроводников при помощи пространственно-модуляционной спектроскопии с использованием дополнительного когерентного сигнала..... 191

СЕКЦИЯ 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФИЗИКЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ..... 193

Абрамук В. В. Компьютерное моделирование оптических явлений..... 194

Агафонов Г. Н. Компьютерное моделирование работы активной зоны ядерного реактора..... 197

Александрович П. А., Голосов Д. А., Мельников С. Н. Моделирование нанесения тонкоплёночных слоёв коаксиальным магнетроном с цилиндрической мишенью на крупноформатные подложки..... 200

Байрамов Д. А. Разработка математической модели теплопроводности для однородной среды..... 203

Басинский Е. Д. Компьютерное моделирование частицы в потенциальной яме..... 205

Близняк А. А. Моделирование процесса синтеза наночастиц при электрическом взрыве проводников в жидкости 208

Бойко А. А. Моделирование взаимодействия лазерного излучения с металлическим образцом в воде при наносекундном возбуждении..... 211

Бойков А. И. Моделирование динамики парового пузыря: выбор технологий и реализация..... 214

Бочко М. А. Система машинного зрения для автоматизированного контроля качества липких застёжек подгузников для взрослых..... 217

Бочко М. А. Программно-аппаратный комплекс автоматизированного выявления бракованных сигаретных блоков на основе технологий машинного зрения…….. 220

Головач О. С. Программный комплекс для идентификации параметров демпфированного осциллятора методами машинного обучения……..... 222

Громак Д. А., Агеенков И. Д., Гуляй В. Д. Компьютерная модель распространения волн на воде…… 225

Грушевская А. В., Карпицкий В. Д. Эталоны влажности сыпучих материалов……. 228

Доста В. А. Моделирование наведённого поглощения излучения в нанокомпозите с красителем при различной длительности импульсов излучения…….. 230

Дюрдь С. В., Воронович М. В. Компьютерное моделирование динамики маятниковых систем различной сложности…… 232

Жук М. А. Моделирование генерации ультракоротких импульсов излучения РОС-лазером на красителях при малой длине периодической структуры……..…….…….…….…….…….…….……. 235

Жуковский Е. М., Сухоцкий А. Н., Кендыш Ю. Н. Моделирование тепловых процессов тела человека с окружающей средой за счёт теплопроводности.……..…… 238

Завадская А. Г., Семчук К. А. Разработка программного обеспечения для работы с базой данных физических свойств газов……. 240

Зур И. А. Моделирование структуры и теплопроводности DLC методом равновесной молекулярной динамики……. 243

Исмоилов Ж. У., Кутлиев У. О., Садуллаев Ш. Р., Якубов К. Р. Расчёт характерных траекторий рассеянных ионов Ar^+ с поверхностных полуканалов CdTe(001)<$\bar{1}$10>……... 245

Калоша Л. А. Регулирование характеристик рассеяния электромагнитного поля МГЦ-диапазона на решётке из металлополимерных элементов.…….. 247

Карпицкий В. Д., Грушевская А. В. Оценивание влажности древесины с применением стандартных образцов…….. 250

Кирко И. О. Компьютерное моделирование явлений электродинамики на языке C#…….. 252

Козич Д. П., Сироцкая Е. В., Салимбаев А. С. Моделирование напряжённо-деформированного состояния модульных элементов из композитов на основе регенерированных термопластов…… 255

Кошелев Н. С. Компьютерное моделирование деформации тел……. 258

Лихтар Ю. Л., Новиков П. Э., Ловшенко И. Ю. Влияние материала межслоевой изоляции цифровых интегральных микросхем на их динамические характеристики……..…….. 260

Мануйлова Е. Ю. Моделирование влияния оптического пинцета на спектр флуоресценции молекул…… 262

Маскевич Н. В. Применение методов искусственного интеллекта для верификации контекста измерений в физическом эксперименте…….. 266

Мойсейчик М. И. Компьютерное моделирование работы масс-спектрометра……. 268

Насекайло Е. А., Семёнчик Д. А., Савчук К. А. Компьютерное моделирование термодинамических циклов ДВС с использованием интерактивной 3D-визуализации….……... 270

Обрядова А. А. Расчёт прохождения света через пластинку, состоящую из двух слоёв со свойствами гиперболического метаматериала…… 273

Обуховский Е. В., Худик А. А., Никитчик А. В., Петревич Я. П. Технологии программирования при моделировании физических объектов и технологического оборудования...…… 276

Отабаев М. У., Палваназарова И. Д., Ядгаров И. Дж. Энергетические распределения рассеянных ионов Ar^+ с поверхности InGaP(001)<110>…… 278

Пашкович Н. А. Расчёт колебательного спектра фуллерена C_{60} полуэмпирическими методами квантовой химии…… 280

Полковников Р. В., Козыро В. Д. Размерный фактор для расчёта теплопроводности наполнителей композиционных систем…….. 283

Потылкин А. Н., Завадский С. М. Оптимизация магнитной системы источника высокочастотного ёмкостного разряда с наложением магнитного поля для ионного травления и полировки оптических деталей диаметром до 300 мм…… 286

Салата К. Р., Боровик М. Д., Кедик Е. А. Методы веб-программирования при разработке интерактивных физических симуляторов …….. 289

Саттарова А. А., Исмоилов Ж. У., Кутлиев У. О. Рассеяния ионов Ne^+ с поверхности синего фосфора…….. 291

Скорябкин А. В. Применение свёрточных нейронных сетей для анализа эмоциональных состояний по изображению лица…… 293

Сухоцкий А. Н., Мацкевич М. С., Кендыш Ю. Н. Моделирование температурных полей крови на выходе из сосудов…….. 296

Сытый А. И. Рассеяние электромагнитного излучения инверсной системой из трёх цилиндров конечной длины при изменении их показателя преломления…….. 299

Цидик М. А., Ситкевич А. Л. Характер деструкции полиметилметакрилата под воздействием лазерного излучения в различных средах…….. 301

Чернецкий Н. М., Янулевич П. А. Моделирование квантовых систем…… 304

Шинкевич М. Д., Штоп К. О. Разработка интерактивного симулятора теплообменников типа «труба в трубе» с 3D-визуализацией…….. 307

Янулевич П. А., Чернецкий Н. М. Компьютерное моделирование магнитных систем на основе двумерной модели Изинга…… 310

СЕКЦИЯ 3. ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА…… 312

Болбат Е. А. Электромиографический датчик для оцифровки уровня сокращений человеческих мышц…… 313

Воевода Ю. Д. Методика использования программно-аппаратных комплексов спектрального анализа в лабораторном практикуме…….. 315

Григоров Я. И., Мартынович Е. Ф. Метод измерения характеристик длительной люминесценции при наличии интенсивных кратковременных компонентов…….. 317

Омелюсик И. Ю., Воропай Е. С. Разработка системы регистрации спектральных данных на основе ПЗС-линейки и микроконтроллера…….. 319

Пашкевич В. Э., Грицкевич Г. И., Смолкин Ю. А., Жук Р. С., Лешко А. С. Абсолютный оптический линейный энкодер для прецизионных измерительных систем…… 321

Тарасевич М. Ч. Устройство для измерения энергии удара мяча…… 324

Тихон О. И., Лушакова М. С. Исследование особенностей групповой плазмохимической обработки кремниевых пластин при непрерывном режиме генерации СВЧ разряда…….. 328

Юдин В. В. Разработка автономной системы управления микроклиматом в теплице на основе IoT технологий с использованием возобновляемых источников энергии……... 330

СЕКЦИЯ 4. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ…… 333

Воронович М. В., Дюрдь С. В. 3D-симулятор маятниковых систем как инструмент цифрового образования…… 334

Глебович В. И. Комплексная задача как средство систематизации и обобщения знаний по физике……..…… 336

Гуль А. А. Парадоксы как средство повышения мотивации к изучению физики…….. 338

Доста Н. М. Использование шпаргалок для успешного изучения физики…….. 340

Иванистова Е. П. Использование генеративного искусственного интеллекта для создания видеоматериалов при изучении колебательных процессов в физике……... 343

Мелешкевич В. Д. Использование Telegram-канала в обучении физике: методические аспекты……..…… 344

Мицкевич М. Д. Задача комплексного характера на движение материальной точки по окружности…… 346

Семчук К. А., Завадская А. Л. Концепция и реализация обучающей компьютерной программы по физике…… 348

Соболевская Е. В., Ситкевич А. Л. Проектирование персонализированных траекторий изучения физики с использованием микросервисной архитектуры……... 351

Сонец Е. Н. Инженер с шестого класса: зачем Беларуси научные школы…..……. 354

Терешко А. А. Разработка домашних заданий по физике на основе физических опытов для учащихся средних школ (8–9 класс)..……. 356

СЕКЦИЯ 1.

ИЗУЧЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 621.315.592

С. О. АБДУЛЛАЕВА

ПОЛУЧЕНИЕ ТВЁРДОГО РАСТВОРА $Si_{1-x}Ge_x$ ИЗ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

Выращены монокристаллические пленки твердого раствора $Si_{1-x}Ge_x$ ($0 < x < 1$) на подложках Si<111> из оловянного раствора-расплава методом жидкофазной эпитаксии. Температура начала кристаллизации варьировались в интервале Тн.к.=1050º ÷ 800 ºС. Рентгенодифрактометрическим методом изучена монокристалличность полученных пленок, а также зависимость плотность дислокаций на границе подложка-пленка, от количества и размера образование нанокластеров в растворе- расплаве во время роста твердого раствора $Si_{1-x}Ge_x$.

С целью совершенствования технологии получения высококачественных тонких слоев полупроводникового материала методом жидкофазной эпитаксии, с заданными электрофизическими и фотоэлектрическими свойствами, относительно дешёвую подложку как кремний, является весьма актуальной [1].

В работе [1; 2] старались получить структурно совершённые эпитаксиальные слои $Si_{1-x}Ge_x$ и гетеропереходы на их основе. Для этого они исследовали технологические режимы роста, электрические и фотоэлектрические свойства эпитаксиальных слоев $Si_{1-x}Ge_x$ и их структур.

В процессе роста из жидкой фазы эпитаксиальных слоев $Si_{1-x}Ge_x$ используются кремниевые подложки, у которых параметр решетки и коэффициент термического расширения (КТР) близки к образующимся эпитаксиальным промежуточным слоям. Чтобы избежать дислокаций и микротрещин, а также частичных растворений подложек (при положении не до пересыщенного раствора к компонентам подложки), подбирались разные методы и переменный, варизонный состав твердого раствора [3].

Варизонные твердые растворы $Si_{1-x}Ge_x$ выращивались из ограниченного оловянного раствора-расплава на монокристаллических Si подложках с ориентацией (111) *p* и n типа проводимости методом жидкофазной эпитаксии по технологии, описанной в работе [4]. Подложки имели диаметр 20 мм и толщину 400 мкм.

Исследование химического состава поверхности и скола выращенных эпитаксиальных слоев $Si_{1-x}Ge_x$ были проведены с помощью рентгеновского микроанализатора SEM EVO MA 10 (Zeiss). Химический анализ состава пленки показала, что выращивания начинается с кремния и вдоль направление роста плавно уменьшается, соответсвенно содержание германия увеличивается (рис. 1).

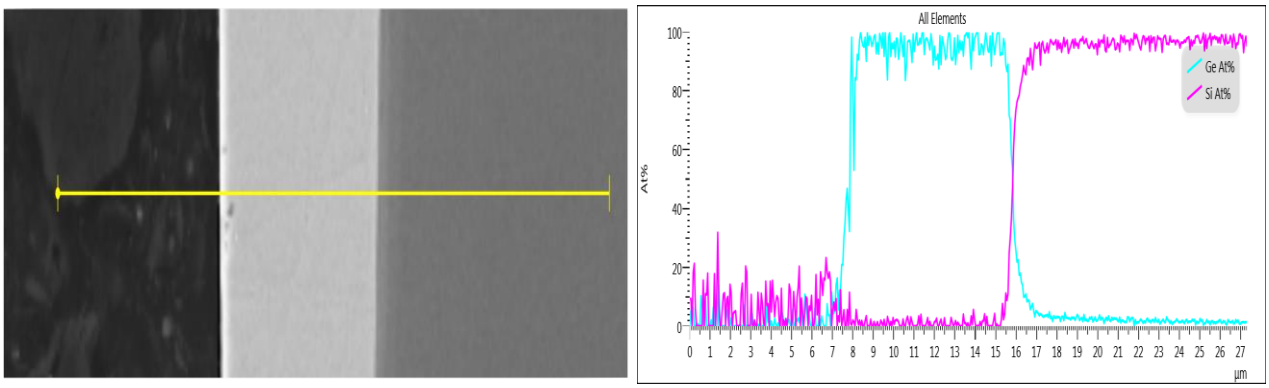


Рисунок 1 – Зависимость химического состава твердого раствора $Si_{1-x}Ge_x$ от толщины *h* эпитаксиальных плёнок

Кристаллически совершенные эпитаксиальные слои $Si_{1-x}Ge_x$ выращивались из раствора-расплава с принудительным охлаждением со скоростью 1 ºС/min в температурном интервале от 900–800 ºС. Тогда скорость роста пленки составляла f_1=0.114μm/min, который определены с формулами (1), (2). Решая дифференциальное уравнение Фика с учетом граничных условий для одномерной диффузии в координатах (1), можно определить скорость роста эпитаксиальных слоев (2)[5]:

$$x(Z,t) = x_i + \frac{\alpha t}{m} 4i^2 \operatorname{erfc}\left(\frac{Z}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (1)$$

$$f = \frac{2\alpha}{x_0 m}\sqrt{\frac{tD}{\pi}} \quad (2)$$

где, x_i, x_0 – текущая и начальная концентрация Si и Ge, α – скорость охлаждения, t – время роста, m – наклон линии ликвидуса, Z – координата, D – коэффициент диффузии.

Эпитаксиальные пленки $Si_{1-x}Ge_x$ имели *n*-типа проводимости с концентрацией $n = 5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ и подвижностью носителей заряда $\mu = 300$ см$^2 \cdot$В$^{-1} \cdot$сек$^{-1}$ при 300 К.

Таким образом, можно определить скорость роста пленки, обуславливающиеся кристаллически совершенностью эпитаксиальных слоев $Si_{1-x}Ge_x$. Управление скоростью роста пленки, обеспечит равномерную кристаллизацию твердого раствора. Это приведет улучшению кристаллически совершенность эпислоя и соответственно электрофизических свойств пленки.

Список литературы

1. Direct-bandgap emission from hexagonal Ge and SiGe alloys / E. M. T. Fadaly [et al.] // Nature. – 2020. – № 580. – P. 205–209.

2. Kwang-Won Jo, Wu-Kang Kim, Mitsuru Takenaka, and Shinichi Takagi. Impact of SiGe layer thickness in starting substrates on strained Ge-on-insulator pMOSFETs fabricated by Ge condensation method // Appl. Phys. Lett. 114, 062101 (2019).

3. Tsukamoto, T. Increasing the critical thickness of SiGe layers on Si substrates using sputter epitaxy method / T. Tsukamoto, Y. Aoyagi, Sh. Nozaki, N. Hirose, A. Kasamatsu, T. Matsui, Y. Suda // Journal of Crystal Growth. – 2022. – Vol. 126900. – https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2022.126900.

4. Razzokov, A. Sh. Obtaining semikonduktor structures $Si–Si_{1-x}Ge_x–Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ from the liquid phase in a single technological cucle / A. Sh. Razzokov, A. S. Saidov, S. I. Petrushenko, S. V. Dukarov // Functional Materials. – 2022. – Vol. 29, № 2. – P. 202–208.

5. Hsieh, J. J. Thickness and surface morphology of gaas lpe layers grown by supercooling, step-cooling, equilibrium-cooling, and two-phase solution techniques./ J. J. Hsieh // Journal of Crystal Growth. – 1974. – № 27. – P. 49–61.

Single-crystal films of the $Si_{1-x}Ge_x$ ($0 < x < 1$) solid solution were grown on Si<111> substrates from a tin solution-melt using liquid-phase epitaxy. The crystallization onset temperature was varied in the range Tn.c.=10500÷8000 ºC. X-ray diffraction was used to study the single-crystal nature of the obtained films, as well as the dependence of the dislocation density at the substrate-film boundary on the number and size of nanoclusters formed in the solution-melt during growth of the $Si_{1-x}Ge_x$ solid solution.

Абдуллаева С. О., молодой ученый, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Республика Узбекистан, abdullayevasevara1494@gmail.com.

УДК 621.315.592

D. E. KOSHCHANOVA

ПОЛУЧЕНИЕ GaAs-Ge-$(Ge_2)_{1-x}(GaAs)_x$ ГЕТЕРОСТРУКТУР ИЗ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

В едином технологическом цикле получена гетероструктура GaAs-Ge-$(Ge_2)_{1-x}(GaAs)_x$ ($0 \le x \le 1$) при температуре начала кристаллизации 1023–773 K, скорости охлаждения раствора-расплава 1–1,5 K/мин. Зазор между подложками составлял при этом 0,5–1,5 мм. В качестве подложек использовали монокристаллические подложки GaAs с ориентацией (100) с *n*- и *p*-типом проводимости, с отклонением от плоскости, не превышающим 15’–30’.

Получение кристаллически совершенной гетероструктуры в качестве перспективной полупроводниковой многослойной структуры для разработки фотоприемников (в частности, в области ИК-спектра) и фотопреобразователей являлся актуальной задачей [1; 2].

Солнечные батареи, *p*-канальные транзисторы, смесительные диоды, фотодетекторы гетероструктуры GaAs/Ge/GaAs представляют значительный интерес в таких перспективных направлениях, как нелинейное преобразование оптических частот, топологические изоляторы, нелинейные элементы на основе регулярных доменных гетероструктрур в GaAs позволяют генерировать излучение в среднем ИК и терагерцовом диапазонах с использованием хорошо освоенных диодных, твёрдотельных лазеров, работающих в ИК-области [3, 4].

Для выращивания пленок и гетероструктур был использован кварцевый реактор вертикального типа с горизонтально расположенными подложками на установке типа ЭПОС.

В качестве подложки использовались пластины монокристаллов *GaAs* с химической чистотой 99,999 %, диаметром 20 и 40 мм, толщиной 350–400 мкм, с кристаллической ориентации (100) имеющие *n*-тип проводимости. Удельные сопротивления и концентрацию основных носителей заряда составляла $\rho \approx 0{,}5$ Ом·см, $n = 3 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ соответственно. Для получения конкретного раствора-расплава на основе растворителей олова использовались порошки германия, арсенида галлия, селенида цинка с чистотой 99,999 %.

В едином технологическим режиме вышеизложенным и другим авторам работы неудалось получить многослойные структуры. В этой работе представлена выращивание в едином технологическом цикле непрерывных многослойных твердых растворов GaAs-Ge-$(Ge_2)_{1-x}(GaAs)_x$ из системы Bi-GaAs-Ge раствора-расплава.

Физические параметры как постоянная параметров решетки и коэффициент термического расширения GaAs ($a = 5.653$Å, $\alpha = 5.0 \cdot 10^{-6}$ ºC) и Ge ($a = 5.658$Å $\alpha = 5.7 \cdot 10^{-6}$ ºC) очень близки. Есть все основания полагать, что твердый раствор, состоящий из этих компонентов, будет иметь качественную кристаллическую структуру, а

область спектральной чувствительности охватит области фундаментального поглощения германия и арсенида галлия.

Эпитаксиальные слои твердого раствора $(Ge_2)_{1-x}(GaAs)_x$ были выращены на подложках GaAs(100) *n*-типа проводимости методом принудительного охлаждения из ограниченного объема оловянного раствора-расплава по методике. Толщина зазора между подложками варьировалась в интервале от 0,45 до 1,5 mm. Принудительная скорость охлаждения составляла 1 K/minut. При принудительном программном охлаждении температура системы понижается и эпитаксиальные слои Ge кристаллизуются из ограниченного раствора-расплава. При определенной температуре (ниже температуры начала кристаллизации германия) находящийся между горизонтальными подложками раствор-расплав насыщается относительно GaAs, так как концентрация кристаллизуемых Ge уменьшается и соответственно доля GaAs в составе кристаллизуемых слоев увеличивается. В конечном итоге на поверхности полученных гетероструктур начинает расти эпитаксиальный слой GaAs (рис. 1).

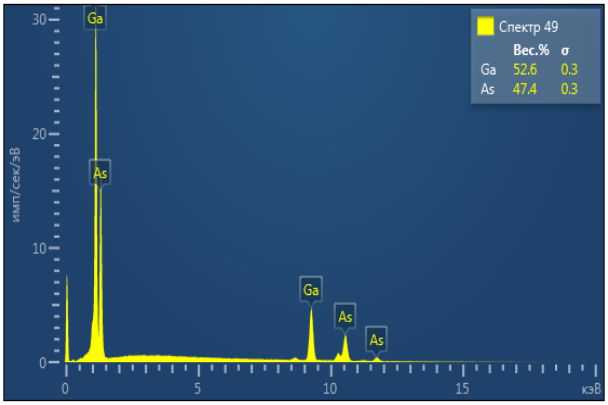


Рисунок 1 – Энергетический спектр поверхности эпитаксиального слоя $(Ge_2)_{1-x}(GaAs)_x$ (x = 1)

Учет изменения насыщенности раствора-расплава компонентами GaAs и Ge при определенной температуре дает возможность управления химическим составом эпитаксиальных слоев и выращивать многослойные гетероструктуры типа GaAs-Ge-$(Ge_2)_{1-x}(GaAs)_x$ ($0 \le x \le 1$).

Отметим, что наиболее качественная гетероструктура GaAs-Ge-$(Ge_2)_{1-x}(GaAs)_x$ ($0 \le x \le 1$) была получена при температуре начала кристаллизации 1023–773 K, скорости охлаждения раствора-расплава 1–1.5 K/min на подложку GaAs с поверхностной ориентацией (100). Зазор между подложками составлял при этом 1-1.5 mm. Плотность дислокаций на поверхности пленок составляла 2×10^4 см$^{-2}$.

Исследованы некоторые электрофизические свойства полученных пленок. Определено удельное сопротивление, холловская подвижность и концентрация носителей заряда при температуре 300 K: ρ = 0,5–12 Ω·см, μ_n = 100 см^2/V·s, $n = 1{,}25\cdot10^{18}$ см$^{-3}$. Пленки имели акцепторный тип проводимости.

Таким образом, в данной работе показана возможность получения кристаллически-совершенных эпитаксиальных слоев $(Ge_2)_{1-x}(GaAs)_x$ и струкур *n*GaAs-*p*Ge-*p*$(Ge_2)_{1-x}(GaAs)_x$ на их основе путём сглаживания разниц параметров решетки подложки-пленки (варьированием химического состава пленки) вдоль его направления роста, который является перспективным полупроводниковым материалом в приборостроении, в области ИК спектра.

Список литературы

1. Lu, X. Sublattice reversal in GaAs/Ge/GaAs and AlAs/Ge/AlAs heterostructures grown on (113)A and (113)B GaAs substrates / X. Lu, Y. Minami, T. Kitada // Journal of Crystal Growth. – 2019. – Vol. 512. – P. 74–77.

2. Koh, S. GaAs/Ge/GaAs sublattice reversal epitaxy and its application to nonlinear optical devices / S. Koh, T. Kondo, Y. Shiraki, R. Ito // Journal of Crystal Growth. – 2001. – № 227–228. – P. 183–192.

3. Казаков, И. П. Гетероструктуры GaAs/Ge/GaAs для темплейтов оптических нелинейных преобразователей с регулярной доменной структурой / И. П. Казаков, В. И. Цехош, М. А. Базалевский, А. В. Клековкин // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2017. – № 7. – С. 3–10.

4. Lu, X. Sublattice reversal in GaAs/Ge/GaAs heterostructures grown on (113)B GaAs substrates // X. Lu, N. Kumagai, Y. Minami, T. Kitada // Applied Physics Express. – 2018. – Vol. 11, Iss.1. – DOI: 10.7567/APEX.11.015501.

A GaAs-Ge-$(Ge_2)_{1-x}(GaAs)_x$ ($0 \le x \le 1$) heterostructure was obtained in a single process cycle at a crystallization onset temperature of 1023–773 K and a solution-melt cooling rate of 1–1,5 K/min. The gap between the substrates was 0,5–1,5 mm. Single-crystal GaAs substrates with a (100) orientation with *n*- and *p*-type conductivity, with an out-of-plane deviation not exceeding 15'–30', were used as substrates.

Koshchanova D. E., молодой ученый, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Республика Узбекистан, dona23042014@gmail.com.

УДК 678.6:621.793

В. С. БАКУН, А. В. НАУМЧИК, К. В. КОПЫЦКИЙ

РАЗРАБОТКА ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕГО СОСТАВА АДГЕЗИОННОГО СОСТАВА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ КАРДАННЫХ ВАЛОВ

Разработаны адгезионные составы (праймеры) на основе отечественного сырья для формирования защитных покрытий деталей карданных валов. Исследовано влияние функциональных добавок в виде наноразмерных частиц углерод-, целлюлозо- и металлсодержащих компонентов на адгезионную прочность системы «полиамидное покрытие – металлический субстрат». Показано, что оптимальное содержание добавок составляет 0,05–0,50 мас. %, что позволяет достичь адгезионной прочности до 2,5 кН/м. Методом ИК-спектроскопии подтверждено образование водородных связей между аминогруппами полиамидной смолы и гидроксильными группами металлической подложки.

Ключевые слова: адгезионный слой, полиамидная смола, полиамидное покрытие, металлический субстрат, наноразмерные частицы, карданный вал.

Введение. Современное машиностроение предъявляет повышенные требования к надежности и долговечности узлов трансмиссии автотранспортной техники. Карданные валы, работающие в условиях знакопеременных нагрузок, абразивного износа и коррозионного воздействия, нуждаются в эффективной защите рабочих поверхностей. Наибольшее распространение получили полиамидные покрытия, такие как Rilsan (полиамид 11), формируемые методом нанесения из псевдоожиженного слоя [1]. Однако их эксплуатационная надежность в значительной степени определяется прочностью адгезионного взаимодействия на границе «полимерное покрытие – металлический субстрат».

Для обеспечения необходимой адгезии традиционно применяются праймерные составы, например Primgreen (Франция) и ранее использовавшийся Rilprim, представляющие собой композиции на основе полиамидсодержащих соединений. В условиях санкционного давления и импортозамещения актуальной задачей является разработка отечественных адгезионных составов, не уступающих зарубежным аналогам по технологическим и эксплуатационным характеристикам.

Цель настоящего исследования состояла в разработке и исследовании параметров эксплуатационных характеристик адгезионных составов на основе отечественных компонентов, содержащих функциональные наноразмерные добавки в «допинговых» концентрациях.

Материалы и методы исследований. В качестве основы адгезионного состава использовали 10 %-й водный раствор полиамидной смолы «ПроХим DUO» производства ООО «ПромХимТехнологии» (Беларусь, Минская обл., Смолевичский р-н, г. Смолевичи). Данная смола представляет собой полимерное соединение линейного строения, синтезированное равновесной поликонденсацией в расплаве аминоамидов смоляных кислот канифоли, адипиновой кислоты и диэтилентриамина [2]. Структурная формула фрагмента полиамидной смолы приведена на рисунке 1.

В состав молекулы полиамидной смолы входят полярные аминогруппы (–NH_2, –NH–) и амидогруппы (–CONH–), а также гидрофобные радикалы смоляных кислот канифоли. Как показано в работах [3; 4], данное соединение способно оказывать упрочняющее действие за счет образования водородных связей между отрицательно заряженными атомами кислорода гидроксильных групп подложки и протонами аминогрупп.

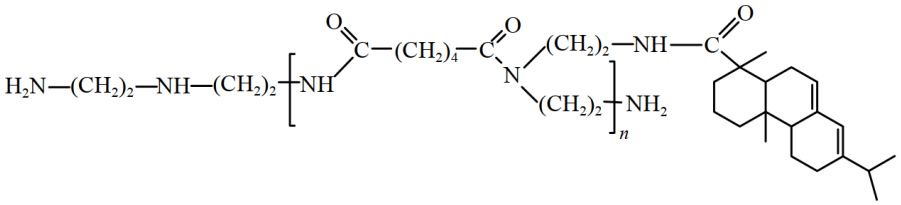


Рисунок 1 – Структурная формула фрагмента полиамидной смолы [3]

Для повышения адгезионной активности в состав смолы вводили функциональные добавки в виде наноразмерных частиц углеродсодержащих (коллоидно-графитовый преппарат (КГП), ультрадисперсный алмаз (УДА)), целлюлозосодержащих (микроцеллюлоза (МЦ)) и металлсодержащих (медь – Cu) компонентов. Содержание «допинговых» добавок варьировали в диапазоне 0,01–1,00 мас. %. Составы готовили путем механического диспергирования наноразмерных частиц в водном растворе полиамидной смолы при постоянном перемешивании до образования однородной суспензии.

В качестве металлических субстратов использовали образцы из стали Х18Н10Т (аналог стали 12Х18Н10Т). Подготовка поверхности включала обезжиривание, механическую обработку гибкими абразивными элементами для создания равномерного микрорельефа с параметром шероховатости Ra = 2,5–3,0 мкм [1].

Адгезионный состав наносили на подготовленную поверхность методом окунания в водный раствор, подсушивали на воздухе при температуре 25–30 °С в течение 10–15 мин. для удаления растворителя. Затем модельные образцы подвергали термической обработке при температурах 280–320 °С в течение 10–15 мин. Полиамидное покрытие (полиамид 11 под торговой маркой Rilsan) формировали методом нанесения из псевдоожиженного слоя при температуре образца 300 °С, толщина покрытия составляла 150–200 мкм.

Адгезионную прочность оценивали методом отслаивания (расслаивания) по ГОСТ 411-77. Исследования молекулярной структуры и межмолекулярных взаимодействий проводили методом ИК-спектроскопии на спектрометре с Фурье-преобразованием в диапазоне 400–4000 $см^{-1}$. Термическую стабильность составов изучали методом дифференциально-термического анализа (ДТА) в интервале температур 30–500 °С со скоростью нагрева 10 °С/мин.

Результаты и их обсуждение. Анализ термограмм полиамидной смолы «ПроХим DUO» (рисунок 2), полученных её разработчиками методом ДТА, показал, что в интервале температур 30–280 °С потеря массы не превышает 3–9 %, что свидетельствует о термической стабильности материала в диапазоне температур формирования адгезионного слоя (280–320 °С). Экзотермический эффект при 306 °С связан с деструкцией амидных связей, а при 400 °С – с разрушением фенантреновой структуры смоляных кислот [4, 5].

Введение наноразмерных частиц в состав полиамидной смолы оказывает существенное влияние на адгезионные характеристики покрытий (таблица).

Таблица – Влияние вида и содержания наноразмерных добавок на адгезионную прочность системы

Состав праймера	Содержание функциональной добавки, мас. %	Адгезионная прочность, кН/м
Исходная полиамидная смола (ПС)	–	1,2
ПС + КГП	0,05	2,1
	0,50	2,4
ПС + УДА	0,05	2,3
	0,50	2,5
ПС + МЦ	0,05	1,9
	0,50	2,2
ПС + Cu	0,05	2,0
	0,50	2,3

Установлено, что оптимальное содержание наноразмерных частиц составляет 0,05–0,50 мас. %. При меньшем содержании эффект повышения адгезии недостаточен, при большем – наблюдается агрегация частиц и снижение гомогенности состава.

Максимальные значения адгезионной прочности (2,5 кН/м) достигнуты при введении 0,5 мас. % ультрадисперсного алмаза. Механизм действия наноразмерных добавок заключается в формировании развитого нанорельефа поверхности, увеличении площади контакта и активации функциональных групп на границе раздела фаз под действием температурной обработки.

Для выяснения механизма адгезионного взаимодействия проведен сравнительный анализ ИК-спектров исходной полиамидной смолы и адгезионного слоя после термической обработки (рисунок 3). В спектрах присутствуют характерные полосы поглощения: широкая полоса в области 3280–3420 $см^{-1}$, соответствующая валентным колебаниям вторичных аминогрупп – NH –; полосы при 1640–1645 $см^{-1}$ и 1558 $см^{-1}$, характерные для валентных колебаний группы >C=O во вторичном амиде [3; 6].

После термической обработки наблюдается увеличение интенсивности полос, связанных с образованием водородных связей, что подтверждает предложенный механизм адгезионного взаимодействия.

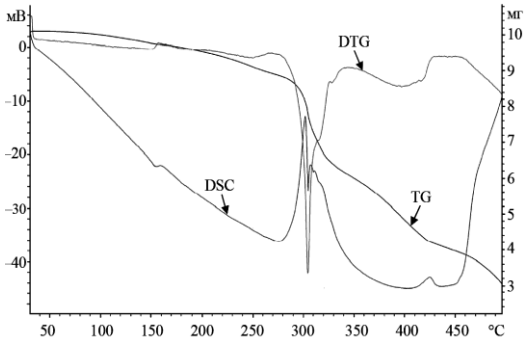


Рисунок 2 – Термограмма полиамидной смолы «ПроХим DUO» [5, с. 119]

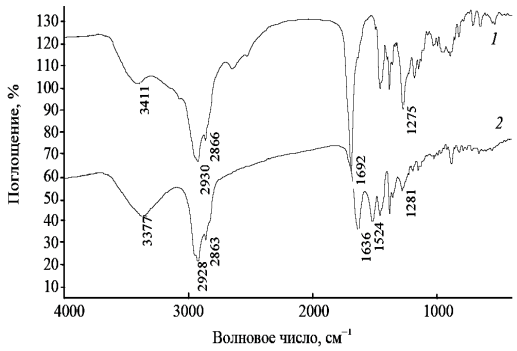


Рисунок 3 – ИК-спектры полиамидной смолы: 1 – исходный образец; 2 – после термической обработки при 300 ºС [5, с. 99]

Механизм адгезионного взаимодействия может быть представлен следующим образом. При термической обработке происходит окисление полиамидной смолы с образованием активных фрагментов оксидных соединений, обеспечивающих взаимодействие на границе раздела «полиамидное покрытие – адгезионный элемент». Аминогруппы полиамидной смолы образуют водородные связи с гидроксильными группами, присутствующими на поверхности металлического субстрата.

Особый интерес в механизме адгезионного взаимодействия представляет роль наноразмерных добавок. Введение солей металлов переменной валентности, например, формиата меди $Cu(HCOO)_2$, инициирует каталитические процессы. При температурах выше 150 °C начинается разложение формиата меди с выделением высокоактивной атомарной меди. Образующаяся *in situ* атомарная медь или ее оксиды выступают в роли катализатора, ускоряя процессы термоокислительного структурирования полимера непосредственно в адгезионном слое. Это приводит к росту полярности макромолекул и интенсификации их адсорбционного и химического взаимодействия с металлом. Кроме того, наночастицы меди, равномерно распределяясь в объеме адгезионного слоя, способствуют образованию дополнительных физических узлов сшивки, повышая когезионную прочность самого праймера.

Для наночастиц углерода и микроцеллюлозы механизм несколько иной. Обладая развитой поверхностью и собственными функциональными группами (например, гидроксильными у целлюлозы), они выступают в роли центров физической и химической адсорбции для макромолекул полиамида. При термообработке они могут встраиваться в формирующуюся полимерную сетку, создавая структуру с повышенной плотностью сшивки и улучшая механическое зацепление (аутогезию) за счет увеличения площади контакта и создания нанорельефа на поверхности раздела.

Заключение. В результате проведенных исследований разработаны адгезионные составы на основе отечественной полиамидной смолы «ПроХим DUO» для формирования защитных полиамидных покрытий деталей карданных валов. Установлено, что введение наноразмерных частиц (ультрадисперсный углерод, ультрадисперсный алмаз, микроцеллюлоза, формиат меди) в количестве 0,05–0,50 мас. % позволяет повысить адгезионную прочность системы до 2,5 кН/м, что не уступает показателям импортного аналога Primgreen.

Разработанные составы могут быть рекомендованы для внедрения на ОАО «Белкард» (г. Гродно) в рамках программы импортозамещения при производстве карданных валов автотранспортной техники.

Список литературы

1. Кравченко, В. И. Карданные передачи: конструкции, материалы, применение / В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, В. А. Струк ; под ред. В. А. Струка. – Минск : Тэхналогія, 2006. – 410 с.

2. Флейшер, В. Л. Синтез и свойства продукта взаимодействия канифоли и диэтилентриамина / В. Л. Флейшер, М. В. Андрюхова, Д. С. Макарова // Труды БГТУ. Сер. IV, Химия и технология органических веществ. – 2013. – № 4. – С. 156–158.

3. Флейшер, В. Л. Импортозамещающая технология получения и применения полиамидной смолы с гидрофобизирующим и упрочняющим действием на бумагу и картон / В. Л. Флейшер, М. В. Андрюхова, Н. В. Черная, О. А. Мисюров // Полимерные материалы и технологии. – 2018. – Т. 4, № 3. – С. 72–83.

4. Андрюхова, М. В. Новый азотсодержащий полимер с упрочняющим и гидрофобизирующим действием на бумагу и картон / М. В. Андрюхова, В. Л. Флейшер, Н. В. Черная // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2019. – Т. 55, № 1. – С. 99–106.

5. Флейшер, В. Л. Модифицированная канифоль: получение, свойства и применение : монография / В. Л. Флейшер, Н. В. Черная. – Минск : БГТУ, 2019. – 305 с.

6. Беллами, Л. Новые данные по ИК-спектрам сложных молекул / Л. Беллами. – М. : Мир, 1971. – 318 с.

Adhesive compositions based on domestic polyamide resin «ProKhim DUO» for protective coatings of cardan shaft parts have been developed. The effect of functional additives in the form of nanoscale particles on the adhesion strength has been studied. Optimal additive content is 0.05–0.50 wt. %, providing adhesion strength up to 2.5 kN/m. The mechanism of adhesive interaction has been confirmed by IR spectroscopy.

Бакун Виктория Сергеевна, студент 2 курса инженерного факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, bakun_vs_24@student.grsu.by.

Наумчик Анастасия Витальевна, студент 2 курса инженерного факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, naumchik_av_24@student.grsu.by.

Копыцкий Константин Викторович, магистрант инженерного факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, kopyckij_kv_24@student.grsu.by.

Научный руководитель – *Антонов Александр Сергеевич*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и ресурсосберегающих технологий Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, antonov_as@grsu.by.

УДК 621.785.532

К. В. БЕРНАТ, А. Н. МОИСЕЕНКО, А. А. МОГДАЛОВА, Л. С. ВЕРТИНСКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ Р6М5 ПОСЛЕ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ

Проведено упрочнение поверхности образцов из стали Р6М5 методом ионно-плазменного азотирования (ИПА). Получен азотированный слой толщиной до 210 мкм с микротвердостью у поверхности $HV_{0,1}$ 1100. Исследование фазового состава поверхности образцов после ИПА выявило наличие соединений Fe_3N, $Fe_4N_{0.94}$. Сравнительные трибологические испытания образцов после объемной закалки и ИПА показали значительное увеличение износостойкости поверхности стали Р6М5 после ИПА.

Быстрорежущие инструментальные стали применяют для производства сверл, резцов, фрез, метчиков и др инструмента. К таким инструментам предъявляются повышенные требования по теплостойкости, твердости и износостойкости поверхности. В процессе работы инструмент из быстрорежущей стали должен сохранять заданный размер и форму, выдерживать серьезные динамические нагрузки и высокие температуры.

Среди инструментальных сталей широкое применение нашла сталь марки Р6М5. Традиционный вариант упрочнения этой стали – объемная закалка. В ряде случаев для достижения требуемых характеристик стойкости инструмента использование закаленной стали является недостаточным.

Для увеличения долговечности инструмента широко применяется нанесение покрытий нитридов и карбидов тугоплавких металлов. Как правило, при проведении процесса нанесения таких слоев и правильном использовании упрочненного инструмента наличие покрытий способствует повышению эксплуатационных свойств инструмента. При неблагоприятных условиях эксплуатации происходит преждевременное разрушение и отслаивание осажденного слоя из-за невысокой адгезии с основой. Кроме того, применение технологий нанесения подобных покрытий при дуговом или магнетронном напылении имеет ограничение из-за ограниченного рабочего размера вакуумных камер. Одной из технологий, позволяющих проводить упрочнение поверхности крупногабаритных изделий, является ионно-плазменное азотирование (ИПА).

В ФТИ НАН Беларуси разрабатываются технологии ИПА, освоено производство промышленного оборудования для ИПА, которое эксплуатируется на большинстве предприятий страны, оказываются такие услуги сотням заказчиков по поверхностному упрочнению изделий с габаритными размерами до 3000 мм [1].

Имеются публикации, в которых показано влияние ИПА на свойства быстрорежущих сталей. В работе [2] исследовали влияние состава газообразного азота на слой нитрида и микротвердость инструментальной стали SKH51 при плазменном азотировании. При увеличении концентрации азота глубина его проникновения увеличивается до 90 мкм, а при концентрациях азота выше 60 % образуется слой нитрида с высокой микротвердостью 1100 HV. В работе [3] проведено исследование ионного азотирования стали Р6М5 в тлеющем разряде с магнитным полем. На поверхности образцов после ионного азотирования в тлеющем разряде обнаружены рефлексы нитридов и карбонитридов легирующих элементов CrN, Cr(C, N), $(Fe, W)_6(C, N)$), а также карбидов $(Cr, Fe)_7C_3$, Fe_3C. Нитриды железа обладают большей теплоемкостью по сравнению с железом, при этом создаются благоприятные условия для предотвращения скачков температуры на поверхности инструмента [3]. Высокая твердость стали у поверхности, не изменяющаяся при нагреве до 500 °С, определяется наличием нитридов и карбонитридов хрома CrN, Cr(C, N), а износостойкость и низкая склонность к задирам – карбидами $(Cr, Fe)_7C_3$, Fe_3C [3]. Во всех известных исследованиях обработку образцов проводили на оборудовании лабораторного типа.

Целью исследования было провести ИПА стали Р6М5 на установке промышленного типа с получением азотированного слоя глубиной более 100 мм; изучить его микроструктуру и механические свойства, а также адоптировать технологический процесс ИПА для обработки деталей из стали Р6М5.

Материалы и оборудование.

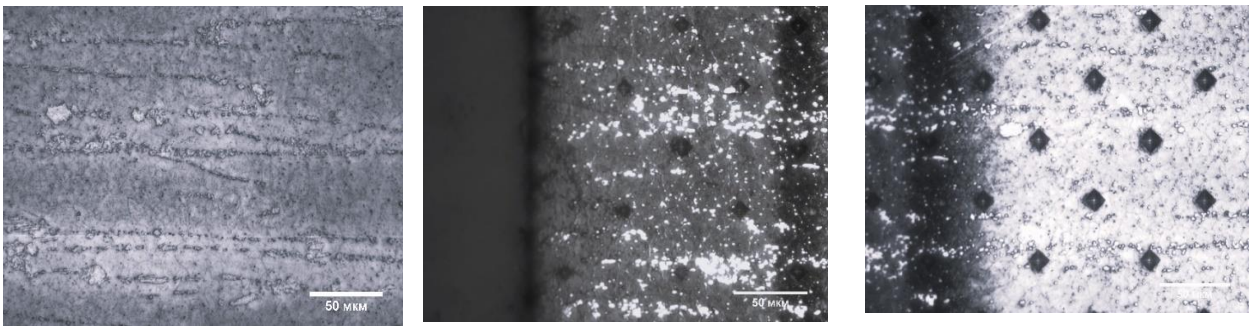
Образцы для проведения исследований представляли собой плоские секторы из стали Р6М5 толщиной 5 мм, подвергнутые объемной закалке по стандартному режиму до твердости HRC 63. Поверхность образцов полировали до получения шероховатости Ra 0,06 мкм.

Затем образцы подвергали ионно-плазменному азотированию на оборудовании промышленного типа производства ФТИ НАН Беларуси по следующему режиму: температура 580 °С, время выдержки 8 ч. Обработку выполняли в газовой смеси Ar – 15 л/ч, N_2 – 25 л/ч, H_2 – 15 л/ч.

Рентгенофазовые исследования проводили на дифрактометре Explorer GNR в CuK-α излучении. Исследование микроструктуры выполняли на оптическом микроскопе Planar Ми-1. Твердость образцов измеряли на приборе AFFRI-URBV-VRS, микротвердость – на AFFRI-DM8. Шероховатость поверхности исследовали на профилометре Surftest SV-2100 Mitutoyo. Трибологические испытания выполняли на многофункциональном трибометре DUCOM Instruments UNITEST-750. трибометре Unitest 750 с нагрузкой 20Н. Длина дорожки 10 мм, частота перемещения 2 Гц. В качестве контртела применяли шар диаметром 5 мм из твердого сплава WC-Co. Общий путь трения составлял 100 м, 200 м, 400 м и 500 м.

Исследования и результаты.

Микроструктура образцова стали Р6М5 после ИПА приведена на рисунке 1. Выявление микроструктуры образца стали Р6М5 проводили 4 %-м раствором HNO_3 в спирте. После травления на поперечном микрошлифе образца стали Р6М5 после ИПА выявлен темный диффузионный слой толщиной около 220 мкм, содержащий нитриды железа и легирующих элементов. На рисунке 2 представлено распределение микротвердости по глубине образца после ИПА, эффективная глубина азотированного слоя составила порядка 210 мкм, микротвердость у поверхности образца достигала $HV_{0,1}$ 1100, а при переходе к основе – $HV_{0,1}$ 700. Прирост микротвердости поверхности за счет образования нитридов легирующих элементов составил 410 HV или 57 % по сравнению с исходным состоянием после объемной закалки.



а б в

Рисунок 1 – Микроструктура стали Р6М5: в сердцевине (а) и азотированном слое (б, в)

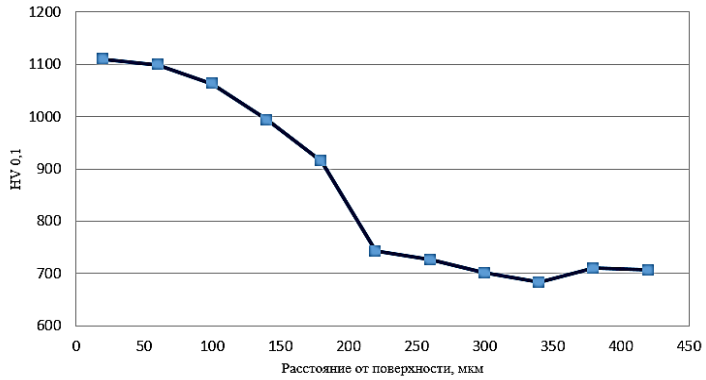


Рисунок 2 – Распределение микротвёрдости по глубине образца из стали Р6М5 после ИПА

Рентгенограмма образца после ИПА представлена на рисунке 3. Из рисунка видно, что после ИПА в поверхностном слое образовались нитриды Fe_3N, $Fe_4N_{0.94}$.

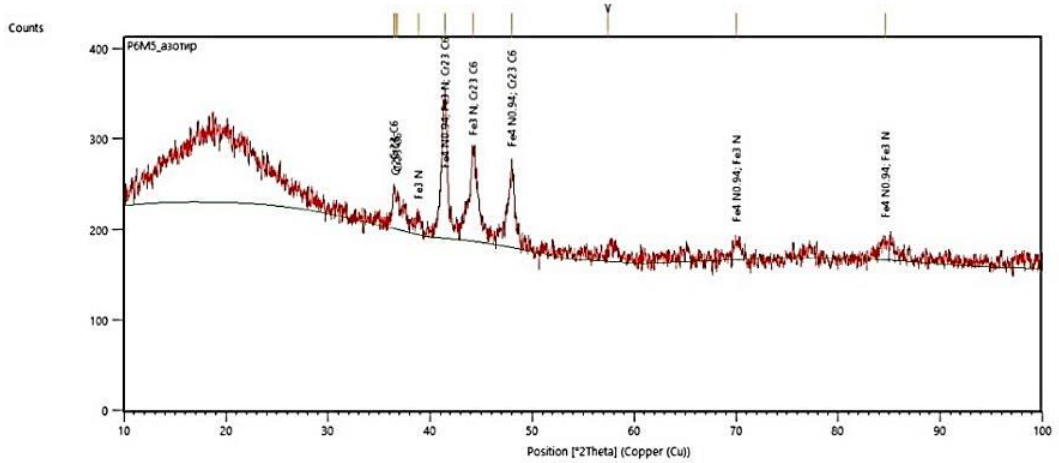


Рисунок 3 – Рентгеновская дифрактограмма образца стали Р6М5 после ИПА

Изменение износостойкости поверхности образцов стали Р6М5 после ИПА в сравнении с образцами, прошедшими только объемную закалку, оценили при помощи трибологических испытаний. В качестве критерия оценки износостойкости использовался объем удаленного из канавки материала, который определялся с учетом площади поперечного сечения канавки износа. На рисунке 4 показана зависимость выноса материала от общего пути трения на образцах из стали Р6М5 после и ИПА и объемной закалки. Из рисунка 4 видно, что имеет место значительное увеличение износостойкости образца после ИПА. Это объясняется образованием в поверхностном слое нитридов легирующих элементов.

Полученные результаты исследований показывают широкие возможности применения метода ИПА для упрочнения поверхности инструмента из стали Р6М5. В ФТИ НАН Беларуси было проведено упрочнение методом ИПА протяжки из стали Р6М5 длиной 600 мм, применяемой для обработки внутренних шлицевых поверхностей шестерен тракторов ОАО «МТЗ».

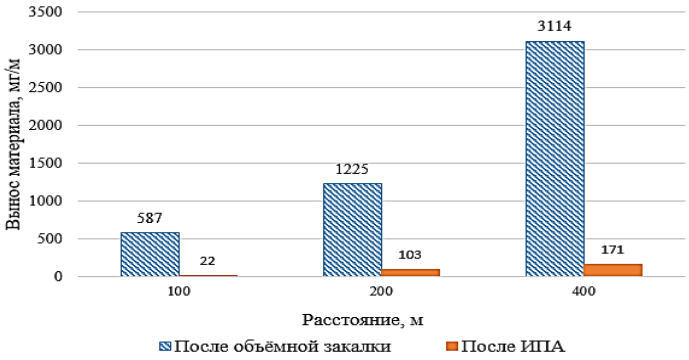


Рисунок 4 – Зависимость выноса материала от общего пути трения при испытании на износостойкость с нагрузкой 20 Н образцов из стали Р6М5 после объёмной закалки (1) и после ИПА (2)

В результате проведения ионно-плазменного азотирования образцов из стали Р6М5 получен эффективный азотированный слой толщиной 210 мкм с микротвердостью у поверхности $HV_{0,1}$ 1100. Распределение твердости по глубине упрочненных слоев плавное. Исследования фазового состава образцов после ИПА выявили наличие в поверхностном слое нитридов Fe_3N, $Fe_4N_{0.94}$. Трибологические испытания образцов после объемной закалки и ИПА показали значительное увеличение износостойкости поверхности стали Р6М5 после ионно-плазменной обработки. Применение ИПА для упрочнения крупногабаритных изделий и инструмента является альтернативой нанесению тонких плазменных покрытий, поскольку отсутствует проблема зачастую недостаточной адгезии нанесенных покрытий к основе.

Список литературы

1. Научные основы разработки промышленных технологических процессов плазменной химико-термической обработки изделий машиностроения / М. Н Босяков [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2021. – Т. 1. – С. 60–80.

2. Duk-Jae Kim. Effects of Nitrogen Gas Ratio on Nitride Layer and Microhardness of Tool Steel (SKH51) in Plasma Nitriding / Duk-Jae Kim, Hae-Ryong Lee, Jong-Gu Kwak, Uoo-Chang Chung and Young-Rae Cho // Korean Journal of Materials Research. – 2002. – Vol. 12, № 6. – P. 447–451.

3. Вафин, Р. К. Влияние ионного азотирования в тлеющем разряде с магнитным полем на структуру и фазовый состав инструментальных сталей Р6М5 и Х12 : дис. … канд. техн. наук : 05.16.01 / Р. К. Вафин ; УГАТУ. – Томск, 2013. – 141 л.

Samples of P_6M_5 steel were hardened using ion-plasma nitriding (IPN). A nitrided layer up to 260 μm thick with a surface microhardness of $HV_{0.1}$ 1100 was obtained. Analysis of the phase composition of the samples after INP revealed Fe_3N, $Fe_4N_{0.94}$ compounds in the surface layer. Comparative tribological testing of samples after bulk hardening and IPN revealed a significant increase in the wear resistance of the P_6M_5 steel surface after ion-plasma treatment.

Бернат Кирилл Владимирович, младший научный сотрудник, Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, k.bernat@phti.by.

Вертинский Лев Сергеевич, младший научный сотрудник, Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, viartsinskiy1998@gmail.com.

Могдалова Анастасия Андреевна, научный сотрудник, Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, anastasiyapredko94@gmail.com.

Моисеенко Антон Николаевич, старший научный сотрудник, Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, maiseyenka.a.n@gmail.com.

Научный руководитель – *Поболь Игорь Леонидович*, доктор технических наук, профессор, Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, pobol@phti.by.

УДК 539.21

А. А. БЛАШКЕВИЧ

МОРФОЛОГИЯ И СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ Р6М5, ЛЕГИРОВАННОГО АТОМАМИ Nb ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Исследовано влияние двухэтапной обработки компрессионными плазменными потоками на морфологию и фазовый состав стали Р6М5. На первом этапе высокоэнергетическое плазменное воздействие формирует легированный ниобием поверхностный слой, а на втором – снижает шероховатость поверхности.

Использование компрессионных плазменных потоков (КПП) открывает широкие возможности для модификации материалов [1]. Сформированные в магнетоплазменном компрессоре плазменные потоки азота, водорода, гелия с малой расходимостью, высокой плотностью энергии (до 40 Дж/см^2) позволяют модифицировать поверхностный слой толщиной несколько десятков микрометров за сравнительно небольшое время ~100 мкс [2]. В результате закалки из расплава со скоростью охлаждения до 10^7 К/с этот слой обладает дисперсной структурой. Использование азота как плазмогенерирующего газа может приводить к формированию нитридов в поверхностном слое стали, повышая тем самым ее прочностные и трибологические свойства. Ранее проведенные исследования показали, что обработка стали У8А азотным КПП приводит к увеличению твердости образца в 3.5 раза [3], достигая величины твердости высоколегированной стали.

Объектом исследования данной работы являлась быстрорежущая сталь R6M5 (Fe ~ 80 мас. %, W – 5,5...6,5, Cr – 3,8…4,4, V – 1,7…2,1, Mo – 5,0...5,5, C – 0,8…0,88 мас. %) [4]. Эта сталь используется для изготовления режущего инструмента. Непосредственное воздействие КПП приводит к растворению упрочняющих карбидов в поверхностном стали и уменьшению ее твердости [5]. Однако дополнительное легирование поверхностного слоя путем нанесения покрытия легирующего элемента и последующего воздействия КПП позволяет достичь более высоких прочностных характеристик. Следует учитывать, что воздействие КПП может приводить к формированию развитого рельефа поверхности и снижать качество режущей кромки. Поэтому необходимо искать способы уменьшения шероховатости поверхности при плазменном воздействии. Одним из таких способов является дополнительная обработка КПП с малой плотностью поглощенной энергии [6].

Целью данной работы являлось исследование влияния дополнительного плазменного воздействия на морфологию и структуры поверхностного слоя стали Р6М5, легированного атомами Nb при воздействии КПП.

Обработка поверхностного слоя проходила в 3 этапа. На первом этапе на образцы наносили покрытие из ниобия методом вакуумного катодно-дугового осаждения. На втором этапе образцы обрабатывались 3 импульсами КПП, генерируемыми газоразрядным магнитоплазменным компрессором (МПК) компактной геометрии в атмосфере азота с плотностью поглощенной энергии 23 Дж/см^2 за импульс. На третьем этапе уже обработанный КПП слой был обработан тремя импульсами КПП с плотностью поглощенной энергии 9 Дж/см^2.

Как видно из таблицы, после первой обработки КПП происходит формирование развитого рельефа поверхности в результате плавления, развития гидродинамических неустойчивостей в расплаве и последующей кристаллизации в условиях быстрого охлаждения. Вторая обработка КПП приводит к значительному уменьшению параметров шероховатости, но некоторому увеличению волнистости поверхности.

Таблица 1 – Параметры шероховатости.

	Исходная сталь	Сталь с покрытием	1-я обработка КПП	2-я обработка КПП
R_a, мкм	0,241	0,17	4,913	1,885
R_z, мкм	1,786	1,918	25,557	8,861
R_{max}, мкм	2,615	2,107	29,571	11,721
W_a, мкм	0,174	0,062	2,69	3,802

Поскольку формирование рельефа поверхности обусловлено растеканием плазмы вдоль поверхности, которое приводит и к эрозии поверхности, также были проведены измерения массы образцов до и после воздействия. Согласно полученным данным, количество массы, удаленной с единицы площади поверхности составило 0,47 мг/см^2. Основным механизмом эрозии, связанном с гидродинамическим течением расплава под давлением плазменного потока, растекающегося радиально вдоль поверхности, приводящим к выбросу части расплава за пределы образца [7].

Также был проведен анализ структурно-фазового состояния поверхностного слоя стали после каждого этапа воздействия (Рисунок). Как видно из рисунка исходный образец содержит фазы феррита α-Fe и карбида Fe_3W_3C. После осаждения покрытия Nb, на дифрактограмме можно наблюдать возникновение фаз ниобия Nb и оксида ниобия N_2O_5. Оксид может формироваться при осаждении покрытия в результате взаимолействия с

атомами остаточной атмосферы камеры. Первая обработка КПП приводит к растворению карбида Fe_3W_3C, вследствие плавления, и возникновению новой фазы нитрида ниобия NbN. Это соединение обладает высокой твердостью и термической стабильностью. Его формирование происходит на этапе охлаждения поверхностного слоя в результате взаимодействия на поверхности атомов ниобия и атомов плазмообразующего газа [8]. Вторая обработка КПП приводит к исчезновению линий нитрида ниобия и появлению линий γ-Fe и интерметаллида Fe_2Nb.

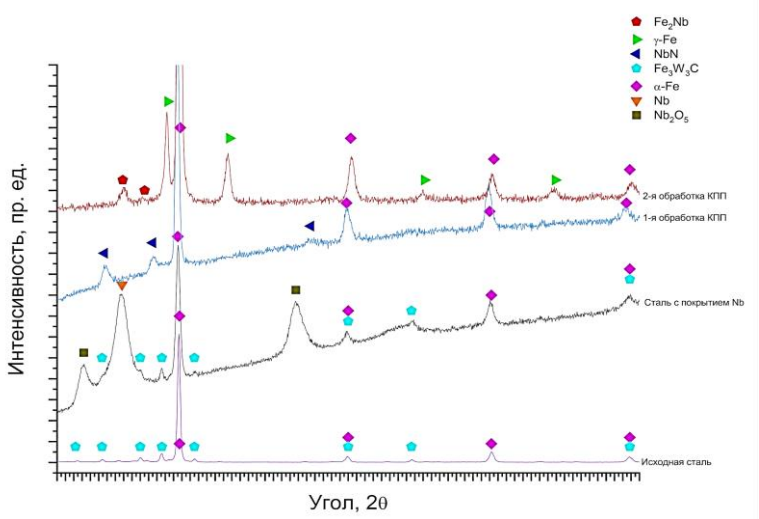


Рисунок – Дифрактограммы образцов с покрытием Nb до и после воздействия компрессионными плазменными потоками

В результате двухэтапной обработки компрессионными плазменными потоками стали Р6М5 с покрытием Nb установлено, что повторное низкоэнергетическое воздействие позволяет эффективно снизить шероховатость поверхности, сформированной на первом этапе легирования поверхностного слоя. Однако при этом происходит трансформация фазового состава: на первом этапе происходит формирование NbN в поверхностном слое, на втором этапе наблюдается исчезновение NbN, а также формирование интерметаллида Fe_2Nb и аустенита.

Список литературы

1. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками / В. В. Углов [и др.]. – Минск : БГУ, 2013. – 248 с.

2. Модификация элементного и фазового состава быстрорежущей стали Р18 компрессионным плазменным потоком / Н. Н. Черенда [и др.] // Вакуумная техника и технология. – 2005. – Т. 15, № 1. – С. 29–35.

3. Modification of high-speed steels by nitrogen compression plasma flow: Structure, element composition, tribological properties / N. N. Cherenda [et al.] // Surface and coatings technology. – 2006. – Vol. 200, № 18–19. – P. 5334–5342.

4. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. – М. : Металлургия, 1983. – 527 с.

5. Modification of Structure and Mechanical Properties of High Speed Steel P18 at Combined Plasma and Thermal Treatment. / N. N. Cherenda [et al.] // J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2011. – Vol. 5, No. 2. – P. 305–309.

6. Черенда, Н. Н. Механизмы эрозии поверхности металлов при воздействии компрессионных плазменных потоков / Н. Н. Черенда // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 9–3. – С. 159–163.

7. Формирование рельефа поверхности металлической мишени при воздействии компрессионных плазменных потоков / В. М. Асташинский [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2014. – № 6. – С. 12–17.

8. Модификация фазового состава и микротвердости поверхностного слоя быстрорежущей стали при комбинированном плазменном и термическом воздействии / Н.Н. Черенда [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2018. – № 2. – С. 61–70.

The influence of two-stage treatment by compression plasma flows on the morphology and phase composition of R6M5 steel has been investigated. At the first stage high-energy plasma treatment forms a doped by niobium surface layer, while at the second stage it reduces the surface roughness.

Блашкевич Александр Андреевич, студент 3 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, digitaleng14@gmail.com.

Научный руководитель – *Черенда Николай Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики твердого тела и нанотехнологий Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, cherenda@bsu.by.

УДК 620.22

А. А. БОНДАРУК, А. А. РОТКОВИЧ, С. А. ГЕРМАН, Д. И. ТИШКЕВИЧ

ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ МЕТОДОМ ТЕМПЛАТНОГО СИНТЕЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Исследован темплатный синтез наноструктур на основе пористого анодного оксида алюминия, заполненных гексаферритом бария ($BaFe_{12}O_{19}$). Методом золь-гель и последующего внедрения в поры были получены магнитные нанопроволоки и пленки. Установлено, что центрифугирование обеспечивает более эффективное формирование нанопроволок внутри пор по сравнению с ультразвуковой обработкой. Полученные упорядоченные наноструктуры перспективны для создания элементов магнитной памяти, биосенсоров и наноэлектродов.

Ключевые слова: мембрана, пористый анодный гесаферрит бария, нанопроволоки, смачиваемость.

Гексаферрит бария – это ферромагнитный материал, который широко применяется в различных областях, включая радиоэлектронику, элементы памяти, поглотители электромагнитных волн и нанотехнологии. Его используют в катушках индуктивности, сердечниках, антеннах, а также в микроэлектронике для создания тонких и толстых плёнок.

Магнитные свойства гексаферрита бария связаны с взаимодействием между металлическими частицами, занимающими определённые позиции в его гексагональной кристаллической структуре, и ионами кислорода. Благодаря своим характеристикам он считается одним из самых перспективных магнитных материалов. Его применяют в качестве постоянного магнита [1], в том числе в электронике [2], а также в других высокотехнологичных областях.

Материалы и методы.

Экспериментальные образцы формировались из алюминиевой фольги (99,99 %) толщиной 100 мкм и имели геометрические размеры 75 × 50 мм^2. Подготовку поверхности подложек осуществляли методом химической отмывки в CrO_3:H_2SO_4 (1:100) в течение 5 мин., затем травления в 10 %-м растворе NaOH при T = 40 °C с продолжительностью 3 мин., далее проводилась химическая полировка в растворе H_3PO_4:HNO_3 при T = 80 °C в течение 1,5 мин. Пленки ПАОА получали методом двухстадийного анодирования в электролите на основе 4 %-й $H_2C_2O_4$ при напряжении 60 В, после чего стравливали алюминий в растворе HCl:$CuCl_2$:H_2O и травили барьерный слой 15 мин. в 5 %-й H_3PO_4.

При изготовлении гексаферрита бария методом золь-гель в качестве катионных источников использовались нитраты металлов, а в качестве мономеров для формирования полимерной матрицы – лимонная кислота и этиленгликоль. $Ba(NO_3)_2$, $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ и лимонную кислоту растворяли в дистиллированной воде в соответствии с мольным соотношением 1:12:26. Затем получали чистый раствор и перемешивали его на водяной бане 3 часа при 100 °C, чтобы вызвать этерификацию.

В качестве темплатного способа внедрения гексаферрита бария в поры использовалось два метода: центрифугирование и воздействие ультразвуком. При центрифугировании образец помещался в центр центрифуги, затем сверху наносилось с помощью дозатора несколько капель приготовленного раствора и запускался при 1500 об./мин. Образцы находились под действием ультразвука на протяжении 10 мин. После того, как матрицы были получены, поверхность подвергалась механической обработке для удаления кристаллов гексаферрита бария с поверхности, далее отправлялись на отжиг в муфельную печь на 4 часа при 800 ºС.

Микроструктура и морфологические свойства массивов нанопроволок $BaFe_{12}O_{19}$ были охарактеризованы несколькими методами: исследование морфологии матриц с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием Carl Ziess EVO10 и количественный анализ состава с использованием приставки Oxford Instrumets для энергодисперсионной спектроскопии.

Результаты и их обсуждение.

На рисунке 1 представлены СЭМ изображения матриц нанопористого анодного оксида алюминия с пористой стороны и стороны барьерного слоя, которые выст упали в качестве темплата для формирования гексаферрита бария методами центрифугирования (рисунок 1*а,в*) и ультразвука (рисунок 1*б,г*). На вставках рисунков *а* и *б* видно, что на повехности центрифугированного образца присутствует лишь некоторая часть гексаферрита бария, в отличие от результатов энергодисперсионного анализа изображения рисунка *б*, где отмечено, что пленка $BaFe_{12}O_{19}$ покрывает всю поверхность мембраны из-за чего поры практически незаметны. Результаты СЭМ со стороны барьерного слоя (рисунок 1*в,г*) центрифугированного образца показали, что большее количество нанопроволок из гексаферрита бария встроено в каналы пор шаблонов. Длина и диаметр нанопроволок соответствуют размеру пор шаблонов. На изображении барьерного слоя образца (рисунок 1*г*), обработанного ультразвуком, присутствует лишь некоторая часть кристаллов магнитного материала.

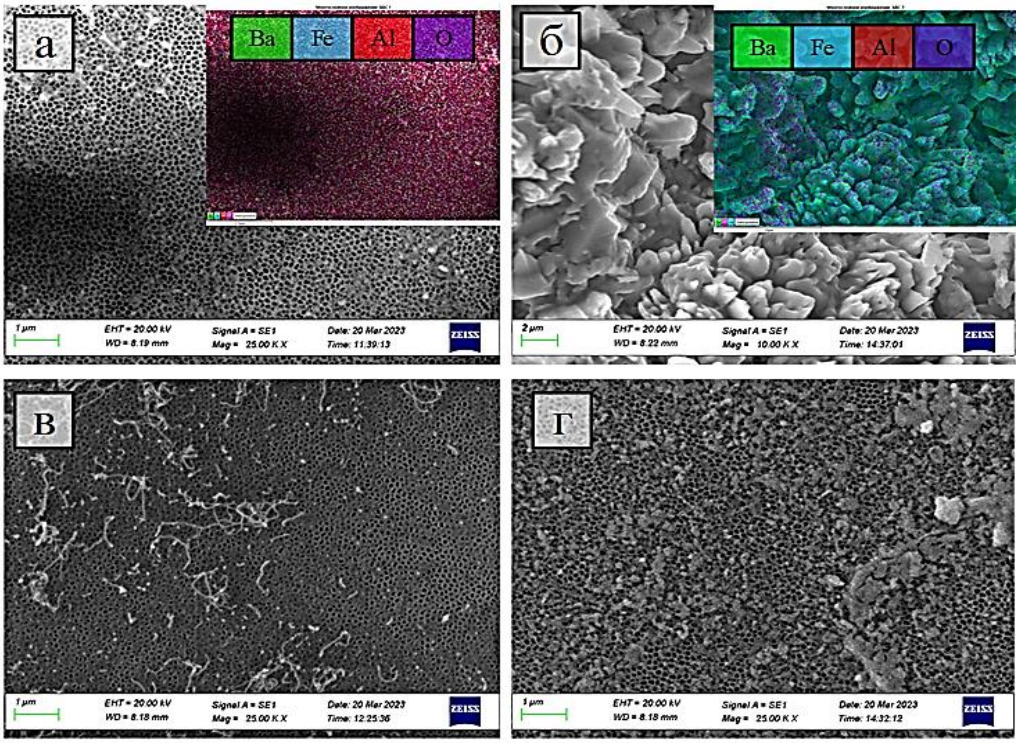


Рисунок 1 – СЭМ-изображения мембран со стороны пористого (а, б) и барьерного (в, г) слоя анодного оксида алюминия, заполненных $BaFe_{12}O_{19}$ после центрифугирования (а,в) и погружения в ультразвуковую ванну (б, г)

Метод золь-гель-синтеза и темплатного получения наноматериалов были использованы для нового способа получения наночастиц $BaFe_{12}O_{19}$ в матрицах на основе пористого анодного оксида алюминия. Результаты исследования микроструктуры композитного материала ПАОА-$BaFe_{12}O_{19}$ показали, что поры однородны и высокоупорядочены, размер которых составляет 80–90 нм, что позволяет получать магнитные нанопроволоки и пленки на основе гексаферрита бария, которые потенциально могут быть использованы для создания высокоплотной магнитной памяти одноэлектронных устройств, биосенсоров и наноэлектродов.

Список литературы

1. Pullar, R. C. Novel aqueous sol–gel preparation and characterization of barium M ferrite, BaFe12O19 fibres / R. C. Pullar, M. D. Taylor, A. K. Bhattacharya // Journal of Materials Science. – 1997. – № 32. – P. 349–352.

2. Liu, W. The efect of the vacuum extraction and the Fe/Ba ratio on the phase formation of barium ferrite thin film synthesized by sol–gel method / W. Liu, J.-M. Wu // Materials Chemistry and Physics. – 2001. – № 69. – P. 148–153.

Bondaruk A.A. is currently a PhD student in Condensed Matter Physics at the SSPA «Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus», under the supervision of D. I. Tishkevich. She holds a Master's degree in Chemistry from the University of the National Academy of Sciences of Belarus (GPA 8.6, thesis grade 10/10) and a Bachelor's from Belarusian State Technological University. Her research, initiated during her undergraduate studies, focuses on membranes based on nanostructured porous anodic aluminum oxide for functional devices via template synthesis. Her expertise includes electrochemical deposition, anodization, solid-state synthesis, XRD analysis, and applied properties research. She has participated in fundamental and applied state research programs and completed an internship at the Joint Institute for Nuclear Research in Dubna (Russia) in 2022. She is an author of 9 publications in international journals such as Nanomaterials and RSC Advances and has 36 conference abstracts. Her Scopus metrics show 18 articles and an h-index of 11.

Бондарук Анастасия Александровна, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, bondaruk625@gmail.com.

Роткович Анастасия Александровна, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, rottkovich@gmail.com.

Герман Степан Алексеевич, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, stepangrmn@gmail.com.

Тишкевич Дарья Ивановна, кандидат физико-математических наук, доцент, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, dashachushkova@gmail.com.

Научный руководитель – *Тишкевич Дарья Ивановна*, кандидат физико-математических наук, доцент, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, dashachushkova@gmail.com.

УДК 539.23; 548.73

О. М. БОРОДАВЧЕНКО, К. В. УСЕНКО, Д. А. ГРИБОВСКИЙ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ И РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПЛЁНОК $Cu(In,Ga)Se_2$

Кристаллическое совершенство и фазовый состав тонких пленок $Cu(In,Ga)Se_2$ проанализированы на основе рентгенографических измерений. Дифрактограммы $Cu(In,Ga)Se_2$ содержат рефлексы 112, 204/220, 116/312 и 316/332, соответствующие фазе халькопирита. Численные значения параметров элементарной ячейки $Cu(In,Ga)Se_2$ составили $\boldsymbol{a}$ ~ 5,727 Å и $\boldsymbol{c}$ ~ 11,432 Å.

Полупроводниковые твердые растворы со структурой халькопирита $Cu(In,Ga)Se_2$, $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$ и др. являются перспективными материалами для использования в качестве базовых поглощающих слоев в современных солнечных элементах с коэффициентом полезного действия ~ 22,6–23,35 % [1, 2]. Данный тип материалов характеризуется прямозонным характером энергетических переходов и высоким коэффициентом поглощения $\alpha \sim 10^5$ см$^{-1}$. Кроме этого, полупроводниковые материалы со структурой халькопирита обладают высокой радиационной стойкостью [3; 4]. Однако полученные к настоящему времени результаты о взаимосвязи между структурными и оптическими характеристиками $Cu(In,Ga)Se_2$ отличаются противоречивостью, которая препятствует прогрессу в развитии технологии изготовления солнечных элементов на основе этого типа материалов. Для уточнения природы ростовых и радиационно-индуцированных дефектов структуры в твердых растворах $Cu(In,Ga)Se_2$ может быть использован термический отжиг в широком температурном диапазоне ~ 50–200 °C.

В данной работе приведены новые результаты по определению основных структурных характеристик тонких пленок $Cu(In,Ga)Se_2$, сформированных на стеклянных подложках.

Тонкие пленки $Cu(In,Ga)Se_2$ со структурой халькопирита формировались методом термического испарения высокочистых элементов Cu, In, Ga и Se из независимых источников на основе трехстадийного процесса [5; 6]. В качестве подложек использовалось натрийсодержащее стекло толщиной ~ 2,0 мм. Для ряда образцов на стеклянных подложках предварительно был сформирован контактный слой молибдена Mo толщиной ~ 0,4–1,3 мкм.

Кристаллическое совершенство и фазовый состав тонких пленок $Cu(In,Ga)Se_2$ были проанализированы на основе рентгенографических измерений, проведенных на дифрактометре ДРОН-3 с использованием CuKα-излучения (λ = 1,5406 Å). Параметры элементарной ячейки уточнялись посредством реализации процедуры полнопрофильного анализа по методу Ритвельда, осуществляемой с применением компьютерного программного обеспечения FullProf. Анализ микроструктуры поверхности и поперечных сколов тонких пленок $Cu(In,Ga)Se_2$ проводился методом сканирующей электронной микроскопии с применением электронного микроскопа TESCAN MIRA 3, оснащенного рентгеноспектральным анализатором EDX X-max (рентгеновская энергодисперсионная спектроскопия). Спектры комбинационного рассеяния были записаны на 3D сканирующем лазерном Рамановском спектрометре Confotec MR350. Источником возбуждающего излучения служил встроенный лазер с диодной накачкой, работающий на длине волны 532 нм; длительность накопления сигнала составляла 30 секунд. Линейное картирование осуществлялось в режиме сканирования с использованием пьезоэлектрического двухкоординатного столика.

Дифрактограммы тонких пленок $Cu(In,Ga)Se_2$, сформированных непосредственно на стекле и на контактном слое Mo, представлены на рисунках 1*а* и 1*б*, соответственно. Дифрактограмма $Cu(In,Ga)Se_2$/стекло характеризуется присутствием рефлекса 112, высокая интенсивность которого в сравнении с другими рефлексами, присущими фазе халькопирита, свидетельствует о высоком качестве кристаллической структуры, а также о преимущественной ориентации мелкодисперсных порошков в кристаллографическом направлении <112>. Дифрактограмма $Cu(In,Ga)Se_2$/Mo/стекло, кроме рефлекса 112, содержит рефлексы 204/220, 116/312 и 316/332, характерные для халькопиритной фазы. Рефлекс ~ 40,49° соответствует фазе молибдена. Угловое положение основного рефлекса 112 составило ~ 26,99° и ~ 26,93º для образцов $Cu(In,Ga)Se_2$/стекло и $Cu(In,Ga)Se_2$/Mo/стекло, соответственно.

Параметры элементарной ячейки тонких пленок твердых растворов $Cu(In,Ga)Se_2$ определены с использованием метода полнопрофильной подгонки контуров линий дифрактограмм псевдофойгтовыми кривыми с применением программного обеспечения FullProf. Установленные численные значения постоянных решетки составили $\boldsymbol{a}$ ~ 5,727 Å, $\boldsymbol{c}$ ~ 11,432 Å и $\boldsymbol{a}$ ~ 5,736 Å, $\boldsymbol{c}$ ~ 11,448 Å для $Cu(In,Ga)Se_2$/стекло и $Cu(In,Ga)Se_2$/Mo/стекло, соответственно.

По данным сканирующей электронной микроскопии морфология поверхности тонких пленок, сформированных непосредственно на стеклянных подложках и на контактном слое Mo, представляет собой однородную поликристаллическую структуру из плотно упакованных зерен с размерами 0,3–1,4 мкм. Усредненное соотношение элементов [Ga]/([Ga]+[In]), полученное с помощью рентгеноспектрального микроанализа с энергетической дисперсией, составило ~ 0,3 для двух типов образцов.

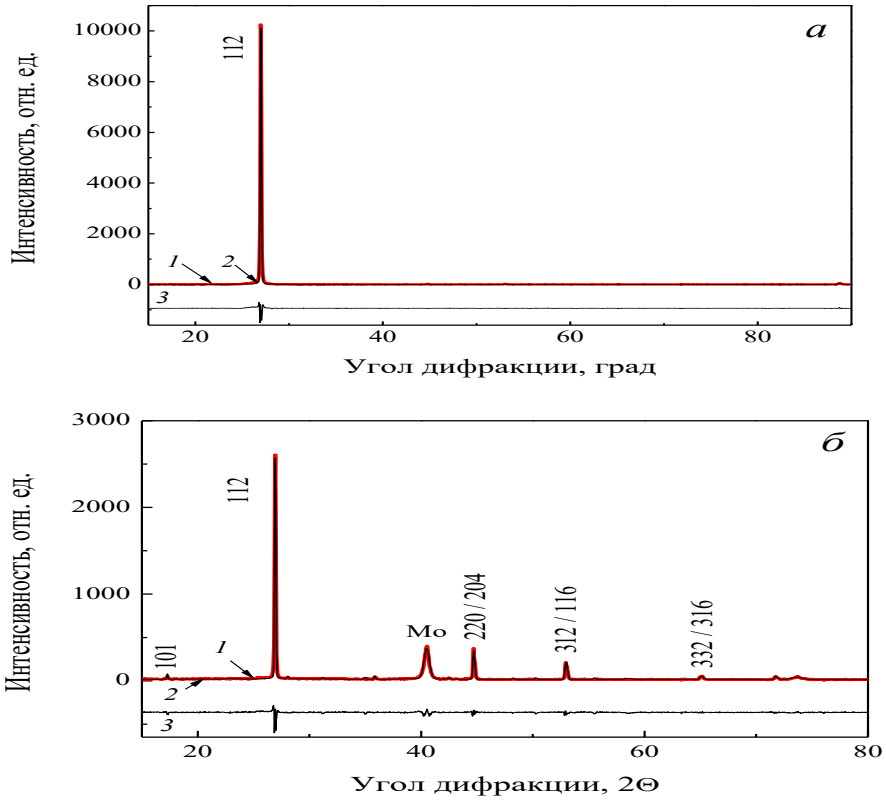


Рисунок 1 – Дифрактограммы тонких плёнок Cu(In,Ga)Se_2, сформированных на стекле (*а*) и на молибдене (*б*) (*1* – эксперимент, *2* – подгонка, *3* – разностная кривая)

Дифрактограммы имплантированных ионами водорода и отожженных тонких пленок Cu(In,Ga)Se_2 не демонстрируют заметных визуальных отличий [7], что свидетельствует о том, что отжиг при температурах 23 и 100 ºС в процессе синтеза не оказывает существенного влияния на кристаллическое совершенство или фазовый состав.

Для уточнения данных по фазовому составу тонких пленок Cu(In,Ga)Se_2 использовался метод Рамановской спектроскопии. На рисунке 2 приведены спектры двух образцов Cu(In,Ga)Se_2. Характерной особенностью спектров является доминирование полосы ~ 177 $см^{-1}$, которая соответствует основной моде комбинационного рассеяния A_1 для твердого раствора Cu(In,Ga)Se_2. Положение этой полосы линейно зависит от соотношения [Ga]/([In]+[Ga]). Также наблюдаются менее интенсивные полосы в спектральной области 220–250 $см^{-1}$, соответствующие модам E/B_2 и E/B_1 [8; 9], которые могут свидетельствовать о высоком кристаллическом качестве тонких пленок. Дополнительно в спектральной области < 150 $см^{-1}$ наблюдается плечо, относящееся к ростовым дефектам, индуцированным в процессе роста пленок, таким как In_{Cu}, V_{Se}, и обеспечивающим сохранение зарядовой нейтральности решетки [9]. Воздействие температуры в диапазоне 23–100 ºС не оказывает заметного влияния на проявления Cu(In,Ga)Se_2 в Рамановских спектрах.

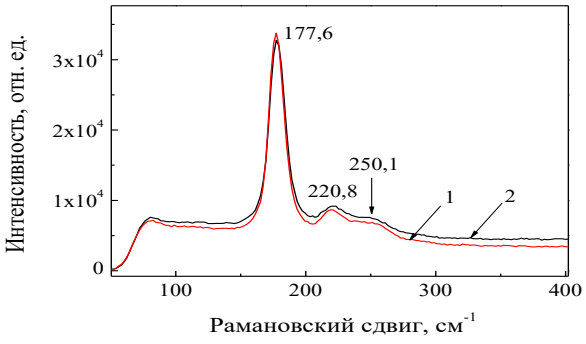


Рисунок 2 – Рамановские спектры тонких плёнок Cu(In,Ga)Se_2, имплантированных ионами водорода и отожжённых при температурах 23 ºС (образец 1) и 100 ºС (образец 2)

Таким образом, проведенные исследования показали, что имплантация тонких пленок $Cu(In,Ga)Se_2$ ионами и их последующий отжиг при температурах ~ 23–100 ºС не меняет углового положения дифракционных рефлексов, их полуширины и относительного соотношения интенсивностей. Это может быть объяснено небольшой глубиной пробега ионов водорода и малой концентрацией ионно-индуцированных дефектов. Метод комбинационного рассеяния света имеет больший потенциал в качестве неразрушающего метода анализа полупроводниковых структур, благодаря способности предоставлять информацию, непосредственно связанную с химическими и структурными характеристиками, а также с однородностью исследуемых материалов[1].

Список литературы

1. Solar cell efficiency tables (version 65) / M. A. Green [et al.] // Prog. Photovolt. Res. Appl. – 2025. – Vol. 33. – P. 3–15.

2. Effects of heavy alkali elements in $Cu(In,Ga)Se_2$ solar cells with efficiencies up to 22.6 % / P. Jackson [et al.] // Phys. Stat. Sol. PRL. – 2016. – Vol. 10. – P. 583–586.

3. Yamaguchi, M. Radiation resistance of compound semiconductor solar cells / M. Yamaguchi // J. Appl. Phys. – 1995. – Vol. 78, № 3. – P. 1476–1480.

4. Jasenek, A. Defect generation in $Cu(In,Ga)Se_2$ heterojunction solar cells by high-energy electron and proton irradiation / A. Jasenek, U. Rau // J. Appl. Phys. – 2001. – Vol. 90, № 2. – P. 650–658.

5. Physical Vapor Deposition of $CuInX_2$ (X = S, Se) Thin Films: A Model for the Growth Mechanism / R. Klenk [et al.] // Solid State Phenomena. – 1994. – Vol. 37–38. – P. 509–514.

6. Dimmler, B. CIS-based Thin-Film Photovoltaic Modules: Potential and Prospects / B. Dimmler, M. Powalla, H. W. Schock // Prog. Photovolt: Res. Appl. – 2002. – Vol. 10. – P. 149–157.

7. Радиационные дефекты в тонких пленках растворов $Cu(In,Ga)Se_2$, облученных ионами водорода / О. М. Бородавченко [и др.] // ВИТТ-2017 : материалы 12-й Междунар. конф., Минск, 19–22 сент. 2017 г. / Бел. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Углов (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Изд. центр БГУ, 2017. – С. 125–127.

8. Impact of electronic defects on the Raman spectra from electrodeposited $Cu(In,Ga)Se_2$ solar cells: Application for non-destructive defect assessment / C. M. Ruiz [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2013. – Vol. 102. – P. 091106-1–091106-4.

9. Witte, W. Raman investigations of $Cu(In,Ga)Se_2$ thin films with various copper contents / W. Witte, R. Kniese, M. Powalla // Thin Sol. Films. – 2008. – Vol. 517. – P. 867–869.

The crystalline perfection and phase composition of $Cu(In,Ga)Se_2$ thin films were analyzed using X-ray diffraction measurements. The diffraction patterns contain the main reflections at 112, 204/220, 116/312 and 316/332 corresponding to the chalcopyrite phase. The numerical values of the unit cell parameters for $Cu(In,Ga)Se_2$ were found to be $\boldsymbol{a}$ ~ 5.727 Å and $\boldsymbol{c}$ ~ 11.432 Å.

Бородавченко Ольга Михайловна, кандидат физико-мататематических наук, старший научный сотрудник ГО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, borodavchenko@physics.by.

Усенко Кирилл Васильевич, младший научный сотрудник ГО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь.

Грибовский Дмитрий Андреевич, младший научный сотрудник ГО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь.

УДК 548.736.442.6

В. С. БУДНИК, К. Е. БУКСАНОВ

ВОЗДЕЙСТВИЕ КАТИОНОВ СОСТАВА RNH_3^+ НА СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТИ И СВЕТОПРОПУСКАНИЕ МОНОХЛОРЗАМЕЩЁННЫХ МЕТАЛЛОРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТОВ

Представлены результаты исследований структуры поверхности и светопропускания монохлорзамещённых металлорганических перовскитов состава $CH_3NH_3PbI_2Cl$ после модификации жидкофазного прекурсора (перовскитного раствора) алкиламмониевыми катионами (RNH_3^+) с различными углеродсодержащими заместителями.

Внимание учёных и специалистов уже давно привлечено к разработке эффективных способов преобразования солнечной энергии в электроэнергию. Повышенный интерес к фотоэлектрическому методу обусловлен реальной возможностью создания относительно стабильных в эксплуатации, недорогих и простых в изготовлении солнечных элементов с относительно высоким коэффициентом преобразования энергии. Именно по этим причинам в фотовольтаике востребованы гибридные металлорганические перовскитные солнечные элементы (ПСЭ). Главными характеристиками, требующими внимательного исследования, являются морфологические и оптические свойства, влияющие на эффективность работы перовскитных элементов [1].

[1]Работа выполнена по договору БРФФИ Ф25М-010.

Управляемая кристаллизация имеет практическое значение для получения высококачественных тонких плёнок перовскита с уменьшенным количеством структурных дефектов. Доноры электронных пар, такие как азот, кислород и сера, в качестве посторонних добавок координируются с катионами свинца в перовскитах и значительно влияют на латеральный рост кристаллитов. В некоторых исследованиях для морфологической регуляции тонких плёнок перовскита использовались амины с многоатомными углеводородными хвостами, однако данные соединения показали неудовлетворительные результаты [2].

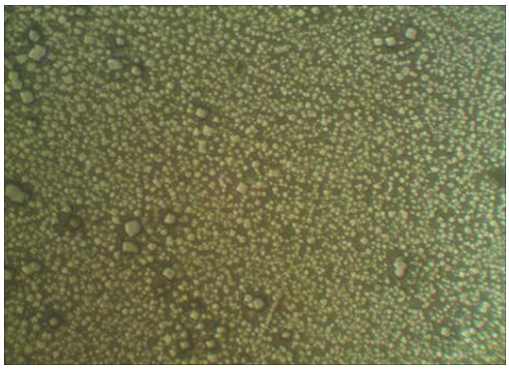
Перовскитные плёнки, модифицированные N- и O-донорами, демонстрируют более упорядоченную морфологию вместе с повышенной кристалличностью и размером зёрен. Остаточные молекулы пассивируют мелкие дефекты в границах зёрен и приводят к подавлению рекомбинации носителей заряда [3, 4].

В данной работе исследовалось воздействие введения катионов RNH_3^+ в жидкофазный прекурсор на структуру и светопропускание плёнок монохлорзамещённого металлорганического перовскита состава $CH_3NH_3PbI_2Cl$. Плёнки толщиной 0,8–1,0 мкм были получены центрифугированием (500 об./мин.) с последующим отжигом при T = 100 °C в течение 5 минут. Раствор перовскита, концентрация которого составила 60 г/л, получали смешиванием хлорида метиламмония (CH_3NH_3Cl) с йодидом свинца (II) PbI_2 (молярное соотношение компонентов 1:1) в диметилформамиде, иодиды моноэтаноламмония и этилендиаммония (концентрации соответствующих иодидаммониевых солей C равны 20 г/л) добавляли при перемешивании. Спектры светопропускания снимались на спектрофотометре МС-12 в области длин волн (λ) 380–1000 нм. Морфология поверхности плёнок перовскита была исследована с помощью оптического микроскопа МКИ-2М. Воспроизводимость светопропускания при исследовании образцов оценивалась по измерениям в пяти точках: центральной и четырём крайним. Погрешность составила ΔX = ± 0,1 %. Это свидетельствует о достаточно высокой повторяемости измеряемых параметров.

Плёнки исходного перовскита имели чёрный цвет. Образец без легирования состоял из мелких квадратных кристаллитов размерами 3,40–6,30 мкм с редкими промежутками между ними. Отдельные микрокристаллы собирались в частицы округлой формы диаметром до 9,0 мкм (рисунок 1$а$). При добавлении в монохлорзамещённый перовскит иодида моноэтаноламмония образуются длинные игольчатые кристаллиты длиной 10 мкм и выше, которые плотно прижаты друг к другу, с образованием мелких промежутков треугольной формы между скоплениями кристаллитов (рисунок 1$б$). Цвет плёнки в данном случае изменяется на тёмно-красный. Введение катиона этилендиаммония приводит к образованию красновато-чёрной зернистой практически сплошной (с мелкими единичными пустотами) плёнки с размером частиц 0,92–1,37 мкм, объединённых в чешуевидные агломераты (рисунок 1$в$).

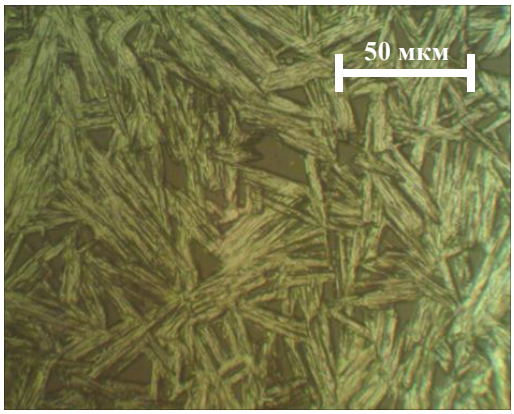
Для исходного перовскита светопропускание не превышало T = 10,0 % при λ = 596 нм и не опускалось ниже отметки T = 8,3 % при λ = 380 нм (рисунок 2, кривая 1). При введении в перовскитный раствор иодида моноэтаноламмония после λ = 546 нм (T = 1,5 %) происходит значительное падение светопропускания до значения T = 7,6 % при длине волны λ = 1000 нм (рисунок 2, кривая 2). Во втором случае (с катионом этилендиаммония в прекурсоре перовскита) показатели светопропускания не опускаются ниже T = 1,1 % при диапазоне значений λ 710–744 нм и не превышают T = 2,0 % при λ = 1000 нм во всей исследуемой области длин волн (рисунок 2, кривая 3). Значительное понижение светопропускания T обусловлено уменьшением пустот в перовскитных плёнках и увеличением площади перовскитного слоя, поглощающего излучение.

При светопоглощении энергия солнечного света преобразуется в электрическую форму энергии. Увеличение показателя светопоглощения ($A, a.u.$ – $absorbance\ unit$) приводит к росту эффективности преобразования энергии ($PCE\ -\ power\ conversion\ efficiency$). Данный параметр является показателем КПД перовскитного солнечного элемента.

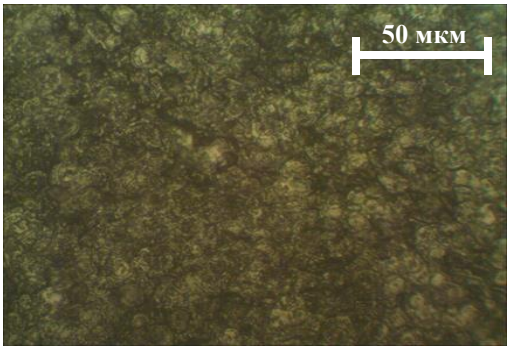


а

Рисунок 1 – Структура поверхности плёнок:
а – исходного монохлорзамещённого перовскита



б



в

**Рисунок 1 – Структура поверхности плёнок, модифицированных при помощи катионов:
б – моноэтаноламмониевого; в – этилендиаммониевого**

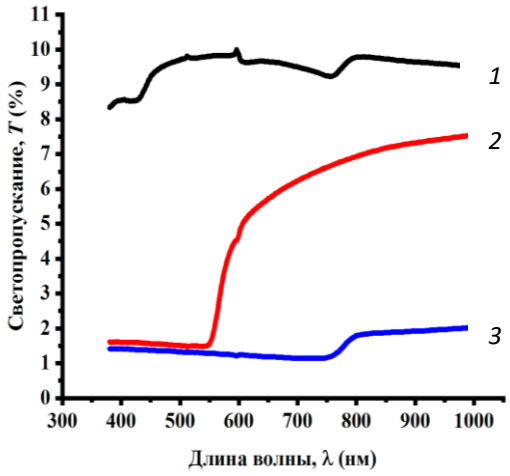


**Рисунок 2 – Спектры светопропускания:
1 – исходного монохлорзамещённого перовскита, модифицированного при помощи катионов:
2 – моноэтаноламмониевого; 3 – этилендиаммониевого**

Таким образом, вышеописанные преобразования перовскита приводят к повышению качества покрытий. Светопропускание модифицированных перовскитных плёнок понижается во всей исследуемой области видимого спектра. Такие изменения структуры и катионного состава перовскитов положительно воздействуют на оптические свойства и эффективность перовскитных солнечных элементов.

Также полученные плёнки могут быть использованы в качестве антиотражающих покрытий в интегральной оптике при формировании оптических межсоединений и других устройств для преобразования световых сигналов [5–8].

Список литературы

1. McNelis. B. The Photovoltaic Business: Manufactures and Markets. / B. McNelis // Series on Photoconversion of Solar Energy. – 2001. – № 1. – P. 713.

2. Barboni, D. The Thermodynamics and Kinetics of Iodine Vacancies in the Hybrid Perovskite Methylammonium Lead Iodide / D. Barboni, R. A. De Souza // Energy Environ. Sci. – 2018. – Vol. 11. – P. 3266–3274.

3. Ching-Ho, T. Methylammonium halide salt interfacial modification of perovskite quantum dots/triple-cation perovskites enable efficient solar cells / T. Ching-Ho, L. Hong-Ye, L. Chen // Nature. – 2023. – Vol 13, № 5387. – P. 13–20.

4. Eperon, G. The role of dimethylammonium in bandgap modulation for stable halide perovskites / G. Eperon // ACS Energy Lett. – 2020. – Vol 5, № 6. – P. 1856–1864.

5. Lazarouk, S. K. 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections Through Optical Interposer / S. K. Lazarouk, A. A. Leshok, T. A. Kozlova, A. V. Dolbik, L. D. Vi, V. K. Ilkov, V. A. Labunov // International Journal of Nanoscience. – 2019. – Vol. 18, No. 3-4. – P. 1940091.

6. Лазарук, С. К. Эффективность лавинных светодиодов на основе пористого кремния / С. К. Лазарук, А. А. Лешок, В. А. Лабунов, В. Е. Борисенко // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39, № 1. – С. 149–152.

7. Lazarouk, S. K. Electroluminescence from nanostructured silicon embedded in anodic alumina / S. K. Lazarouk, D. A. Sasinovich, P. S. Katsuba, V. A. Labunov, A. A. Leshok, V. E. Borisenko // Semiconductors. – 2007. – Vol. 41 (9). – P. 1109–1112.

8. Lazarouk, S. K. Spherical plasmoids formed upon the combustion and explosion of nanostructured hydrated silicon / S. K. Lazarouk, A. V. Dolbik, V. A. Labunov, V. E. Borisenko // JETP letters.- 2007. – Vol. 84(11). – P. 581–584.

This article presents the results of studies of the surface structure and light transmission of monochlorinated organometallic perovskites of the composition $CH_3NH_3PbI_2Cl$ after modification of the liquid-phase precursor (perovskite solution) with alkylammonium cations (RNH_3^+) with various carbon-containing substituents.

Будник Валерия Сергеевна, магистрант 2 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, valeria.budnik@mail.ru.

Буксанов Кирилл Евгеньевич, факультет радиотехники и электроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, kbuksanov@mail.ru.

Научный руководитель – *Лабунов Владимир Архипович*, доктор технических наук, профессор, академик НАН Беларуси, НИЛ 4.6 «Интегрированные микро- и наносистемы» НИЧ БГУИР, Минск, Республика Беларусь, labunov@bsuir.by.

УДК (621.77.016:62178.061;62-1/-9)

Л. С. ВЕРТИНСКИЙ, А. А. МОГДАЛОВА, А. А. ГРИЦУК

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 40Х, ПОДВЕРЖЕННОЙ ОКСИНИТРИРОВАНИЮ

Представлены результаты экспериментального исследования трибологических характеристик стали 40Х после ионно-плазменного азотирования и оксинитрирования. Проведены металлографические исследования, измерения микротвердости, профилографирование поверхности и трибологические испытания.

Обеспечение износостойкости деталей из среднеуглеродистых сталей – ключевая задача при проектировании нагруженных узлов техники. Одним из наиболее широко применяемых методов поверхностного упрочнения практически всех классов сталей является ионное азотирование. ФТИ НАН Беларуси обеспечил промышленным оборудованием, в основном кастомизированного типа, большинство крупных предприятий страны и оказывает услуги по упрочняющей обработке деталей заказчикам [1].

Инновационным методом придания сталям новой совокупности свойств является сочетание ионно-плазменного азотирования с последующим оксидированием. В работе проведено исследование свойств стали 40Х, одной из наиболее широко применяемых в машиностроении и инструментальном производстве.

Материалы, оборудование и методики.

Процесс азотирования проводили в промышленной установке ионно-плазменного азотирования производства ФТИ НАН Беларуси в течение 8 ч при температуре 520 ºС, оксидирование в воздушной атмосфере в печи в течение 4 ч при 450 ºС.

Для оценки характеристик свойств слоев проведены измерения профиля микротвердости на приборе AFFRI-MVDM8, металлографические исследования на микроскопе МК-1. Морфологию поверхности изучали с помощью прибора Mitutoyo SV-2100. Трибомеханические испытания проведены на приборе Unitest 750 методом возвратно-поступательного движения сферического контртела из WC в виде шарика диаметром 5 мм. Частота движения 2 Гц, при длине дорожки 10 мм, и нагрузке на контртело 25 Н.

Результаты исследований.

В результате ионно-плазменного азотирования сталей в зависимости от условий азотирования нитридный слой может содержать γ'-фазу (Fe_4N), либо γ'+ε-фазы (ε – $Fe_{2-3}N$), причем γ'-нитридный слой является износостойким и относительно пластичным, а ε-слой – коррозионностойким. Последующее оксидирование при более низкой температуре приводит к образованию на поверхности плотной оксидной пленки Fe_xO_y.

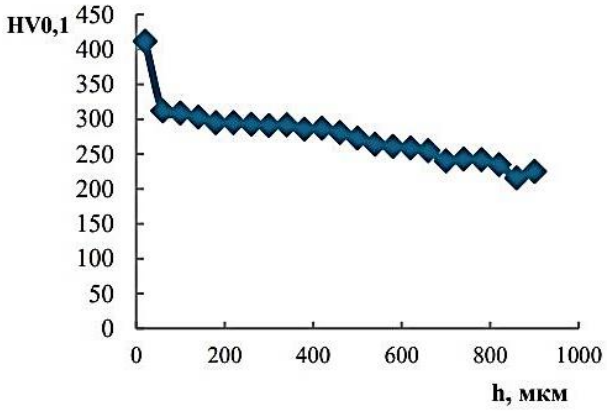


Рисунок 1 – Профиль микротвердости

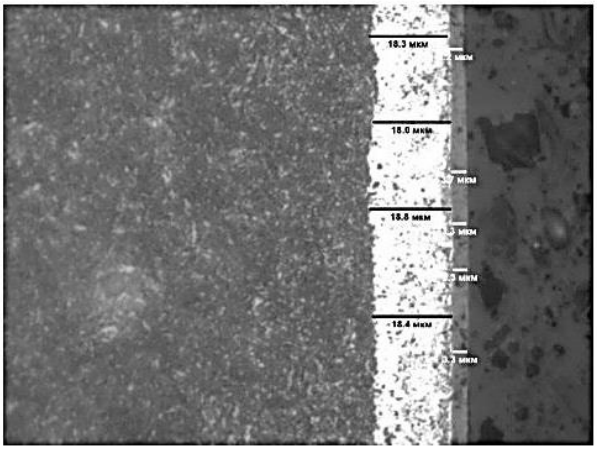


Рисунок 2 – Микроструктура образца из стали 40Х после ИПА в течение 8 ч с последующим оксидированием. х1000

Профиль микротвердости и микроструктура упрочненного поверхностного слоя показаны на рисунках 1 и 2. Азотированный слой включает диффузионный и белый нитридный толщиной 15–19 мкм. Оксидный темный слой достигает 3–5 мкм. Сталь 40Х после оксинитрирования приобретает высокую поверхностную твердость – HV 0,1 420 и коэффициент трения, характерный для оксидных пленок. Азотированный слой выполняет основную несущую роль, его структура определяет трибологические и антикоррозионные свойства. Поверхностный слой оксидов является твердой смазкой и выполняет функцию дополнительной защиты от агрессивных сред.

Абсолютные значения трибологических параметров при различных вариантах химико-термической обработки металлов носят неизбежно относительный характер. Эффективность ХТО для одних и тех же материалов изменяется в зависимости от конструкции узла трения и условий работы, скорости скольжения, давления, температуры [2]. Понятие контакта двух твердых тел является довольно условным и зависит от действия, которое необходимо произвести одним телом на другое [3].

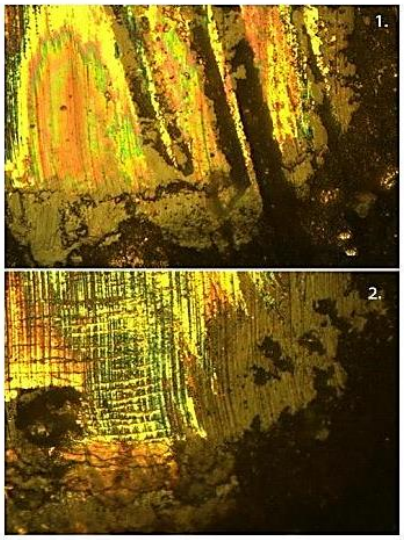


Рисунок 3 – Дорожки трения, расстояние пройденное контртелом - 200 м. х1000:
1 – оксинитрирование,
2 - азотирование

Определение коэффициента трения имеет множество подходов в зависимости от условий работы пар трения. Коэффициент трения – отношение силы трения между двумя телами к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу [4]. При расчете коэффициента трения важно учесть, какой характер сопряжения у трущейся пары. Для пар металл по металлу это, как правило, упругопластический. По мере износа модифицированного слоя снижается предел текучести (в том числе из-за повышенной температуры трения без смазочных материалов), что приводит к наплывам на краях дорожки трения. В таком случае сила вспахивания становится значимой относительно адгезионной составляющей и коэффициент трения может превысить единицу. На рисунке 3 представлены фотографии следов износа для расстояния 200 м.

При температурах выше 700 °С относительная толщина трех окисных слоев на армко-железе не зависит от времени. При 700 °С отношение FeO : Fe_3O_4 : Fe_2O_3 составляет, по данным в статье Хауффе [5], около 100:10:1. Скорость диффузии вюстита в чистом железе сравнительно высока. Для меньших температур структура иная, магнетит Fe_3O_4 также существует с избытком кислорода, но этот избыток меньше чем в случае вюстита. При температурах ниже 570 °С вюстит почти полностью отсутствует. Поскольку кислород диффундирует преимущественно в Fe_2O_3 и в значительной мере в Fe_3O_4, он способен в таком случае достичь поверхности металла и даже проникнуть в металл [6]. Магнетит – хруп-

кий материал с твердостью порядка HV 450-580. Такой тонкий оксидный слой показывает краткосрочную стойкость и влияет на динамику трения.

Глубина износа оксинитрированного образца после 500 м пути контртела составляет 22 мкм, азотированного – 27,8 мкм (рисунок 4). При пластической деформации от нагрузки металл оттесняется по краям, образуя наплывы. Потому для оценки количества стертого материала можно рассчитать площадь сечения канавки и массу изношенного материала.

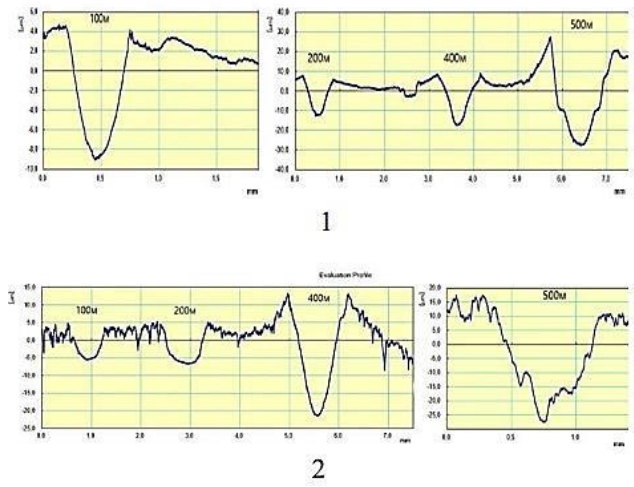


Рисунок 4 – Дорожки трения на образцах – 100, 200, 400, 500 м:
1 – азотирование, 2 – оксинитрирование

Расчетные значения массы изношенного материала, полученные методом профилографирования, позволяют перейти от линейных характеристик (глубина канавки) к интегральному показателю интенсивности изнашивания. Однако при интерпретации этих данных необходимо учитывать, что точность определения объема унесенного металла лимитируется не только разрешающей способностью профилометра, но и характером пластических деформаций, сопутствующих процессу трения.

Базовой линией для вычисления площади сечения выбрана линия поверхности образца. Найдя интегральную сумму координат канавки, и умножив на ее длину, вычислим объем. Масса вынесенного материала будет найдена как произведение объема и плотности (рисунок 5).

Резкий рост силы трения в начале у азотированного образца можно объяснить выглаживанием твердых нитридов, образующихся на поверхности. Азотирование повышает шероховатость поверхности, до обработки параметр составлял Ra=0,33 мкм, после обработки – 0,6-0,8 мкм. Для оксидированного образца на начальном этапе испытаний фиксируется стабильное значение коэффициента трения (~0,7). В дальнейшем наблюдается его монотонное возрастание, что свидетельствует о постепенном износе защитной оксидной пленки и переходе к трибологическому контакту, характерному для неоксидированного образца (о чем говорит сближение угловых коэффициентов кривых трения) (рисунок 6).

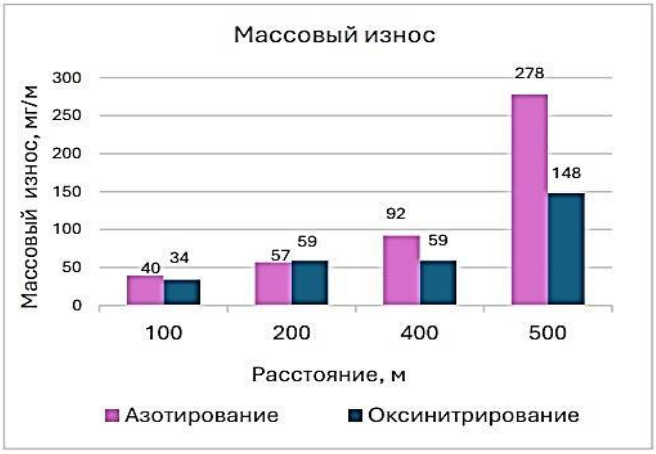


Рисунок 5 – График количества изношенного материала в зависимости от пути трения

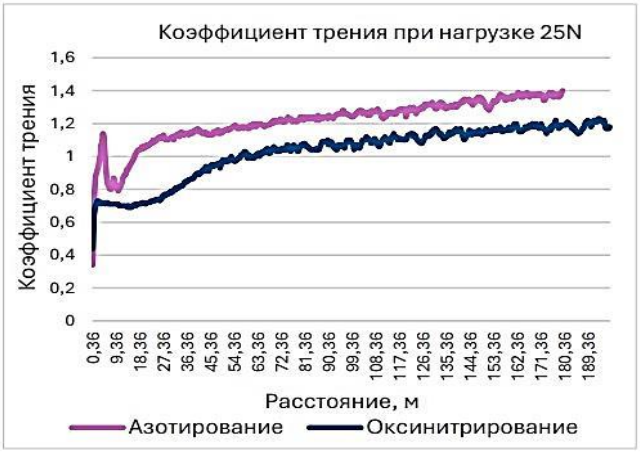


Рисунок 6 – Коэффициент трения, рассчитанный как отношение горизонтальной и вертикальной силы - F_h/F_v

Выводы.

Установлено, что кинетика изменения коэффициента трения для образца из стали 40Х после азотирования и оксинитрирования имеет двухстадийный характер. На первой стадии коэффициент трения остается стабильным на уровне 0,7. На второй стадии регистрируется его устойчивый рост по мере износа оксидного слоя. Сближение углов наклона зависимостей для оксидированного и азотированного образцов на завершающем этапе испытаний указывает на нивелирование защитного эффекта оксидного слоя и установление схожего механизма трения.

Список литературы

1. Жук, Д. В. Разработка и освоение технологий ионно-плазменного азотирования инструмента / Д. В. Жук, И. Г. Олешук, И. Л. Поболь, М. Н. Босяков // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. В 3 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2013. – С. 199–206.

2. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М : Машиностроение, 1968. – 480 с.

3. Гаркунов, Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов. – М. : Машиностроение, 1989. – 174 с.

4. ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 174 с.

5. Hauffe, K. Untersuchungen über die Oxydation von Metallen / K. Hauffe. – Metalloberfläche. 1954. – Bd. 8, Nr. 7. – S. 97–105.

6. Кубашевский, О. Окисление металлов и сплавов / О. Кубашевский, Б. Гопкинс. – М. : Металлургия, 1965. – 428 с.

This study investigates the tribological characteristics of 40X steel after ion-plasma nitriding and oxynitriding. The oxynitriding process formed a dense oxide film (~3 μm) over a nitrided layer, significantly increasing surface hardness. Tribological testing revealed a two-stage friction behavior, where the oxide layer initially provided a stable friction coefficient before gradually wearing away, ultimately leading to wear patterns similar to conventionally nitrided steel.

Вертинский Лев Сергеевич, младший научный сотрудник, Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, viartsinskiy1998@gmail.com.

Магдалова Анастасия Андреевна, Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, anastasiyapredko94@gmail.com.

Грицук Андрей Анатольевич, Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, mister.gritsuk@mail.ru.

Научный руководитель – *Поболь Игорь Леонидович*, доктор технических наук, профессор, Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, pobol.igor@gmail.com.

УДК 620.22

Е. В. ВИНОГРАДОВ

ВЛИЯНИЕ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПЛОТНОСТЬ И ТВЁРДОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ВАКОФЛУВИС-20

Исследуется влияние ультрафиолетового излучения на плотность и твёрдость композиционного материала Вакофлувис-20 на основе фторопласта-4, наполненного дисульфидом молибдена. Эксперименты показали, что УФ-излучение приводит к разнонаправленным изменениям свойств: наблюдается увеличение плотности материала при одновременном снижении его твёрдости.

Фторопласт-4 (политетрафторэтилен) и композиционные материалы на его основе широко используются в различных отраслях промышленности благодаря уникальному сочетанию химической стойкости, низкого коэффициента трения и широкого температурного диапазона эксплуатации [1].

Для того чтобы расширить функциональные возможности фторопласта и адаптировать его к работе в специфических условиях, разработаны различные методы модификации и наполнения. Одним из таких материалов является Вакофлувис – композит на основе фторопласта-4, содержащий дисульфид молибдена MoS_2 в качестве твёрдой смазочной добавки. Присутствие MoS_2 обеспечивает материалу низкий коэффициент трения в вакуумных условиях [2].

В процессе эксплуатации изделия могут подвергаться воздействию ультрафиолетового излучения, которое может влиять на их структуру и эксплуатационные характеристики. При взаимодействии с УФ-лучами в материале происходят процессы, существенно изменяющие его свойства. Ультрафиолет инициирует фотохимические реакции, которые могут приводить как к разрыву связей в полимерной цепи (деструкции), так и к образованию новых поперечных связей (сшивке) [3]. Для ненаполненного фторопласта ранее было показано, что УФ-облучение вызывает рост плотности при одновременном увеличении твёрдости [4]. Однако присутствие наполнителя, особенно такого фотоактивного, как MoS_2, способно менять направление этих процессов [5].

Целью данной работы является исследование влияния ультрафиолетового излучения с различными длинами волн на плотность и твёрдость композиционного материала Вакофлувис-20, содержащего дисульфид молибдена.

Для изучения воздействия УФ-излучения на материал Вакофлувис-20 были подготовлены образцы стандартных размеров в виде втулок. Высота этих образцов составляет 10 мм, наружный диаметр – 50 мм, а внутренний диаметр – 40 мм.

В качестве источников ультрафиолетового излучения использовались эксимерные лампы. Образцы облучались в течение 60 минут излучением с длиной волны 222 нм, генерируемым лампой на молекулах KrCl

(криптон-хлорид), и излучением с длиной волны 207 нм от лампы на молекулах KrBr (криптон-бромид). Обе длины волн относятся к спектральному диапазону far-UVC (дальний УФ-С).

Плотность образцов измерялась методом гидростатического взвешивания в соответствии с ГОСТ 15139 [6] при температуре дистиллированной воды 23,0±0,5 °С. Твёрдость измерялась по Кнупу с помощью твердомера Kason 59-HV [7]. Сравнительный анализ плотности и твёрдости образцов до и после облучения представлен на рисунке 1.

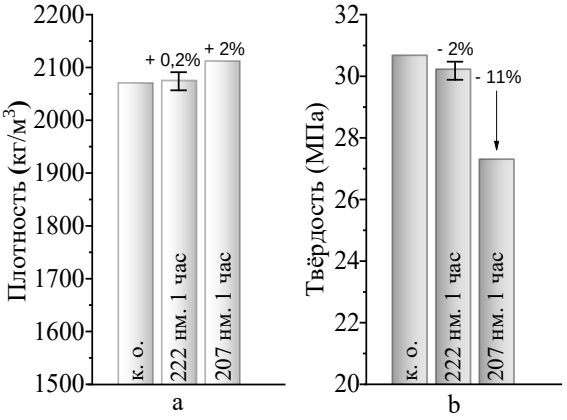


Рисунок 1 – Влияние различных режимов УФ-облучения на плотность (a) и твёрдость (b) материала Вакофлувис-20

На рисунке 1 видно, что под воздействием УФ-излучения плотность Вакофлувис-20 возрастает. При облучении с длиной волны 222 нм увеличение плотности составило 0,2 % относительно контроля, что находится в пределах погрешности измерений. Более существенный рост, на 2,0 %, наблюдается при воздействии излучения с длиной волны 207 нм.

Увеличение плотности под УФ-излучением может быть связано с тем, что химические реакции, приводящие к образованию поперечных сшивок между молекулами полимера, способствуют уплотнению структуры материала. Это приводит к уменьшению свободного объёма и увеличению плотности [8].

При определении твёрдости по Кнупу было обнаружено, что под воздействием УФ-излучения твёрдость Вакофлувис-20 снижается (рисунок 1*b*). Твёрдость образцов, облучённых УФ-излучением с длиной волны 222 нм, ниже на 1,5 % по сравнению с контрольными образцами, что находится в пределах погрешности. При воздействии излучения с длиной волны 207 нм снижение твёрдости составило 11,0 %. Полученные результаты могут быть связаны с тем, что коротковолновое излучение оказывает более значительное воздействие на поверхностные слои материала. Изменение межфазных взаимодействий на границе «полимерная матрица – наполнитель» под действием УФ-излучения способно приводить к формированию менее жёсткого поверхностного слоя [5].

Разнонаправленный характер изменения плотности и твёрдости может быть объяснён с учётом различной глубины проникновения УФ-излучения. Дальний УФ-С диапазон поглощается преимущественно в приповерхностном слое толщиной от нескольких десятков до сотен нанометров [9]. Именно в этом слое формируется измеряемая микротвёрдость. Дисульфид молибдена, являясь полупроводниковым материалом, активно взаимодействует с электромагнитным излучением [5]. Под действием жёсткого УФ на поверхности частиц MoS_2 могут происходить фотохимические процессы, приводящие к нарушению адгезионной связи с матрицей ПТФЭ. Это способствует формированию менее жёсткого поверхностного слоя, что фиксируется как снижение микротвёрдости. В объёме материала, куда УФ-излучение не проникает, наполнитель остаётся интактным, а полимерная матрица продолжает сшиваться, что даёт прирост средней плотности. Таким образом, можно предположить формирование градиентной структуры материала: плотное ядро и модифицированный поверхностный слой.

Проведённые исследования показали, что воздействие ультрафиолетового излучения оказывает влияние на плотность и твёрдость композиционного материала Вакофлувис-20. В результате облучения образцов УФ-излучением с длиной волны 207 нм было обнаружено увеличение плотности на 2,0%, что может быть связано с процессами уменьшения свободного объёма и поперечной сшивки, происходящими под воздействием излучения [8]. В отличие от ненаполненного фторопласта, под воздействием УФ-излучения наблюдается снижение твёрдости материала, особенно значительное при длине волны 207 нм (11,0%). Данный эффект объясняется влиянием дисульфида молибдена на протекание фотохимических процессов в композите и модификацией поверхностного слоя.

Результаты проведённых исследований подчёркивают важность учёта воздействия УФ-излучения при разработке и эксплуатации полимерных композиционных материалов, содержащих функциональные наполнители. Полученные данные могут быть полезны для определения оптимальных условий эксплуатации Вакофлувис-20 и разработки методов направленной модификации его механических свойств.

Список литературы

1. Drobny, G. Radiation technology of polymers / G. Drobny. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2010. – 312 p.

2. Игнатьева, Л. Н. Спектроскопическое исследование модифицированного политетрафторэтилена / Л. Н. Игнатьева, А. К. Цветникова, А. Н. Лившиц, В. И. Салдин // Журнал структурной химии. – 2002. – Т. 43, № 1. – С. 64–71.

3. Structural and mechanical properties of UV-C irradiated polytetrafluoroethylene films / L. Scolaro, A. Visco, G. Torrisi [et al.] // Polymer Degradation and Stability. – 2025 (preprint).

4. Виноградов, Е. В. Влияние УФ-излучения на механические свойства фторопласта / Е. В. Виноградов // Физика конденсированного состояния : материалы XXIII Междунар. конф. – Гродно : ГрГУ, 2015. – С. 155–157.

5. Photooxidative Behavior of Polystyrene Nanocomposites Filled with Two-Dimensional Molybdenum Disulfide / C. Rodrigues, M. Ribeiro, R. Santos [et al.] // Polymers. – 2022. – Vol. 14, No. 15. – P. 3125.

6. ГОСТ 15139–69. Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы). – М. : Издательство стандартов, 1969.

7. ГОСТ Р ИСО 4545-1–2022. Материалы металлические. Метод испытания на микротвердость по Кнупу. – М. : Российский институт стандартизации, 2022.

8. Makuuchi, K. Radiation processing of polymer materials and its industrial applications / K. Makuuchi, S. Cheng. – Hoboken : Wiley, 2012. – 416 p.

9. Comparative study between UVB 313 nm, UVC 254 nm, and far UVC 222 nm light on the aging of polyamide 66 / F. P. Santos, M. Oliveira, L. Silva [et al.] // Heliyon. – 2024. – Vol. 10, No. 1. – P. e23785.

This article investigates the effects of ultraviolet (UV) radiation on the density and hardness of the composite material Vakofluv-20 based on fluoroplastic-4 filled with molybdenum disulfide. Experimental data show that UV radiation causes wavelength-dependent changes. An increase in density is observed under both irradiation modes, with a significant increase of 2.0 % at 207 nm. The hardness of the material decreases, particularly significantly at 207 nm (11.0 %). The obtained results highlight the necessity of considering UV radiation effects in the development and application of polymer composite materials containing functional fillers.

Виноградов Евгений Валентинович, аспирант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, evgenijvinogradov1993@gmail.com.

Научный руководитель – *Валько Наталья Георгиевна*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, N.Valko@grsu.by.

УДК 621.315.5

М. А. ВОЛЫНЕЦ, У. Е. ГОГА, Т. А. ТУМАНОВ

ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ УГЛЕРОДНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ НИТРОЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ХСЛ: СИНТЕЗ И ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОГО РАСТВОРИТЕЛЯ НА СВОЙСТВА

Представлены результаты синтеза и исследования углеродных композиций на основе смеси сажи и графита в качестве проводящего наполнителя, а также нитроцеллюлозы и химически стойкого лака (ХСЛ) в качестве связующих компонентов. Растворителями выступали этилацетат и ацетон. Пасту наносили на стеклянные подложки с последующей сушкой при 60 °C. Установлено, что сопротивление образцов изменяется во времени: сразу после нанесения оно составляло 380 Ом, через двое суток снизилось до 240 Ом, а через неделю достигло 220 Ом. Падение сопротивления обусловлено испарением остаточного растворителя, приводящим к усадке пленки и улучшению контакта между частицами проводящего наполнителя. Полученные результаты необходимо учитывать при разработке технологии формирования стабильных композитных электродов на основе углеродных наполнителей.

На сегодняшний день повсеместное употребление углеродных проводящих паст при ремонте электронных изделий и формировании резистивных элементов не ставится под сомнение. Одним из наиболее исследуемых направлений применения и улучшения углеродных паст является создание и оптимизация таких паст для приборов оптоэлектроники, таких как гибридные солнечные элементы [1]. Углеродная паста, представляющая собой смесь углеродного порошка и подходящего жидкого связующего (или смеси связующих веществ), является одним из наиболее распространенных материалов для электродов, изготавливаемых в лабораторных условиях, и представляет собой наиболее гибкую основу для химических и биологических модификаций [2].

Благодаря многофункциональной природе углеродсодержащих материалов, они являются весьма привлекательными для различных слоев перовскитных солнечных элементов (ПСЭ) [3]. Известно, что стабильность перовскитов в составе ПСЭ недостаточна для их промышленного применения и проблемы ее повышения до сих пор являются актуальной задачей [4]. Материалы на основе углерода, применяемые при создании ПСЭ, могут существенно повышать их стабильность [3]. Другим существенным преимуществом углеродных материалов на основе проводящих паст для формирования контактов является возможность исключения из конструкции ПСЭ дырочного транспортного слоя. За счет уменьшения количества слоев в конструкции солнечного элемента снижается количество операций, что улучшает технологичность и удешевляет производство [5].

Основная проблема проводимости углеродных паст заключается в том, что для получения углеродной пасты приходится использовать непроводящие полимеры в качестве связующего [1]. Среди органических полимеров нитроцеллюлоза, растворенная в подходящей смеси растворителей (например, ацетон – циклогексанон), образует углеродные пасты с превосходной механической целостностью и регулируемой вязкостью, что особенно выгодно для технологии трафаретной печати [6]. Введение производных целлюлозы в перовскитные солнечные элементы обеспечивает пассивацию дефектов на границах зерен за счет водородных связей, что снижает безызлучательную рекомбинацию и улучшает стабильность. В данном контексте нитроцеллюлоза выполняет роль связующего: загущает пасту и после высыхания формирует прочную пространственную сетку, которая предотвращает расслоение и рассыпание слоя, а также обеспечивает адгезию к стеклу [7].

Главным недостатком использования производных целлюлозы и аналогичных полимеров является их изолирующие свойства, которые ухудшают электропроводность пасты. Чтобы этого избежать, требуется подбор таких материалов, которые одновременно пассивировали бы дефекты и обеспечивали перенос заряда. [7]. Для решения проблемы, вызванной снижением проводимости из-за изолирующей природы связующих полимеров, применяют добавки металлических и полупроводниковых порошков. Однако это, несомненно, снижает адгезионное и технологическое качество пасты [1], одновременно удорожая ее. Необходимы новые способы модификации углеродных паст, чтобы найти баланс при использовании смеси связующих, чтобы при сохранении адгезии, защитных свойств и необходимой структурированности обеспечить высокую электропроводность материала.

Экспериментальные результаты и обсуждение. В качестве проводящих компонентов использовали 90 мг сажи и 30 мг графита. Связующим выступила комбинация 30 мг нитроцеллюлозы и 30 мг химически стойкого лака (ХСЛ). В качестве растворителей применяли 500 мкл этилацетата и 250 мкл ацетона. Порядок приготовления пасты был следующим: сначала связующие смешивали с растворителями, затем добавляли проводящие компоненты. Смешение проводили в ультразвуковой ванне *Skymen ZX*-009 (мощность 60 Вт, частота 40 кГц, рабочий объем чаши 1 л) в течение 10 минут при температуре 35–45 °С. После перемешивания пасту наносили на предметное стекло с контактными площадками из алюминиевой фольги. Нанесенный слой сушили на плитке при температуре 60 °С в течение нескольких минут. Затем аналогичным образом наносили и высушивали второй слой.

Для расчета удельного электрического сопротивления материала необходимо точно знать геометрические параметры сформированного слоя. На схеме (рисунок 1) обозначены основные линейные размеры: длина *l*, ширина *d* и толщина слоя *H*.

а б

Рисунок 1 – Схематичное изображение углеродной пасты, нанесённой на стеклянную подложку, с указанием геометрических параметров слоя углеродной пасты (*l* – длина, *d* – ширина, *H* – толщина слоя) (а) и фото образца (б)

Измерение сопротивления производили с помощью мультиметра. Значения сопротивления сразу после нанесения составило 380 Ом, через два дня – 240 Ом, через неделю – 220 Ом.

Зависимость поверхностного сопротивления углеродной пасты от времени после нанесения на стеклянную подложку отображена на графике (рисунок 2).

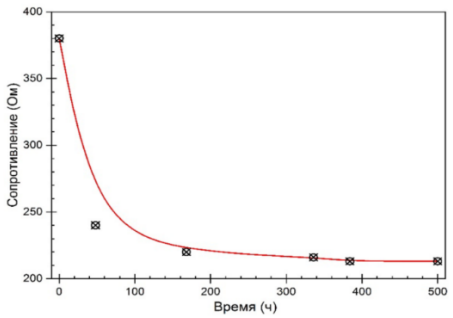


Рисунок 2 – Зависимость сопротивления углеродной пасты от временипосле нанесения на стеклянную подложку

Толщина образцов была найдена двумя способами: с помощью штангенциркуля (с ценой деления 0,05 мм) и оптического микроскопа *Levenhuk* 0701м0417.

Удельное сопротивление (ρ) рассчитывается по формуле:

$$\rho = \frac{R \cdot d \cdot H}{l}, \quad (1)$$

где R – сопротивление образца, l – длина, d – ширина и H – толщина слоя.

Спустя две недели выдержки, когда система стабилизировалась, было расчитано удельное сопротивление (ρ) сформировавшегося слоя, которое составило 21,33 Ом·м.

Поверхностное сопротивление было измерено четырехзондовым методом. Поверхностное сопротивление первой и второй системы составило 175 Ом/□ и 280 Ом/□ соответственно.

Падение сопротивление у образца можно объяснить тем, что время сушки оказалось недостаточным для полного удаления растворителя и по мере испарения остаточного растворителя при естественной сушке пленка дает усадку. Даже после окончательного удаления растворителя полимерная матрица продолжает медленно релаксировать. При этом связки полимеров продолжают перестраиваться: уменьшается свободный объем полимера, формируются дополнительные поперечные связи и снимаются внутренние напряжения. Это приводит к дополнительной усадке [8]. За счет непосредственного соприкосновения частицы проводящего наполнителя подходят ближе друг к другу, образуя большее количество проводящих каналов, что способствует снижению электрического сопротивления композита [9].

Выводы. Таким образом, в данной работе были синтезированы электропроводящие углеродные композиции на основе нитроцеллюлозы и ХСЛ. Установлено, что сопротивление синтезированных образцов изменяется во времени: уменьшилось в 1,7 раза через две недели. Полученные результаты необходимо учитывать при разработке технологии формирования стабильных углеродных электродов с воспроизводимыми характеристиками. Дальнейшее применение синтезированных композиций перспективно в оптоэлектронных устройствах, в частности в перовскитных солнечных элементах (ПСЭ), где требуется сочетание высокой проводимости, адгезионной прочности и химической стабильности электродных материалов. Предложенный состав проводящей углеродной пасты с соотношением графита и сажи 3:1 может рассматриваться как перспективный кандидат для интеграции в структуру ПСЭ [10][2].

Список литературы

1. Zhang, X. Recent Progress of Carbon-Based Inorganic Perovskite Solar Cells: From Efficiency to Stability / X. Zhang, X. Zhang, H. Wang [et al.] // Advanced Energy Materials. – 2023. – Vol. 13, № 33. – P. 2201320. – DOI: 10.1002/AENM.202201320.

2. New Approaches to the Characterization of Carbon Paste Electrodes Using the Ohmic Resistance Effect and Qualitative Carbon Paste Indexes / T. Mikysek, I. Svancara, K. Kalcher [et al.] // Analytical Chemistry. – 2009. – Vol. 81, № 15. – P. 6327–6333. – DOI: 10.1021/ac9004937.

3. Hadadian, M. The role of carbon-based materials in enhancing the stability of perovskite solar cells / M. Hadadian, J. H. Smått, J. P. Correa-Baena // Energy & Environmental Science. – 2020. – Vol. 13, № 5. – P. 1377–1407. – DOI: 10.1039/C9EE04030G.

4. A Review of Perovskites Solar Cell Stability / R. Wang, M. Mujahid, Y. Duan [et al.] // Advanced Functional Materials. – 2019. – Vol. 29, № 47. – P. 1808843. – DOI: 10.1002/ADFM.201808843.

5. Mashreghi, A. Improving perovskite/carbon interfacial contact in carbon based perovskite solar cells by changing two-step spin coating sequence / A. Mashreghi, K. Maleki // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2018. – Vol. 87. – P. 92–99. – DOI: 10.1016/j.mssp.2018.07.014.

6. Švancara, I. Carbon paste electrodes in the new millennium / I. Švancara, A. Walcarius, K. Kalcher, K. Vytřas // Central European Journal of Chemistry. – 2009. – Vol. 7, № 4. – P. 598–656. – DOI: 10.2478/s11532-009-0097-9.

7. Bifunctional Cellulose Interlayer Enabled Efficient Perovskite Solar Cells with Simultaneously Enhanced Efficiency and Stability / Z. Zhang, C. Wang, F. Li [et al.] // Advanced Science. – 2023. – Vol. 10, № 12. – P. e2207202. – DOI: 10.1002/advs.202207202

8. Physical Aging Behavior of a Glassy Polyether / X. Monnier, S. Marina, X. Lopez de Pariza [et al.] // Polymers. – 2021. – Vol. 13, № 6. – P. 954. – DOI: 10.3390/polym13060954.

9. Philip, B. The impact of solvent characteristics on performance and process stability of printed carbon resistive materials / B. Philip, E. Jewell, D. Worsley // Journal of Coatings Technology and Research. – 2016. – Vol. 13, № 5. – P. 911–920. – DOI: 10.1007/s11998-016-9802-8.

10. Carbon-based electrodes for perovskite solar cells / M. Que, B. Zhang, J. Chen [et al.] // Materials Advances. – 2021. – Vol. 2, № 17. – P. 5560–5579. – DOI: 10.1039/D1MA00352F.

[2]Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь (гранты № 26-3086 М и № 26-3092 М).

This article briefly describes the synthesis of carbon paste compositions based on a mixture of carbon black and graphite with nitrocellulose and chlorosulfonated polyethylene. It was found that the sheet resistance of the samples changes over time. Such carbon pastes are of great interest for the development of low-cost and stable electrodes in perovskite solar cells.

Волынец Мария Андреевна, студент 3 курса Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, volynetsmaria1@mail.ru.

Гога Ульяна Егоровна, студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, u.turovets@bsuir.by.

Туманов Тимур Андреевич, студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, timur.andreevi4.tumanov@gmail.com.

Научный руководитель – *Позняк Александр Анатольевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, poznyak@bsuir.by.

УДК 538.91

К. А. ГАЛИНОВСКИЙ

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОМПРЕССИОННЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ВОЛЬФРАМА, ЛЕГИРОВАННОГО ЦИРКОНИЕМ

Изучение структуры металлов, применяющихся в термоядерной энергетике, является перспективным направлением развития современного материаловедения. Благодаря своим свойствам вольфрам используется в качестве материала первой стенки и дивертора. Быстроразвивающейся областью является формирование сплавов при помощи высокоэнергетических короткоимпульсных пучков. Настоящее исследование направлено на изучение структуры и фазового состава вольфрама, легированного цирконием, при воздействии компрессионными плазменными потоками. Выявлено формирование нитрида циркония ZrN с уменьшенным параметром решетки, что обусловлено внедрением атомов W в вакансионные места, а также твердого раствора W(Zr) с постоянной решетки 0,3177 нм при 20 Дж/см^2 и 0,3184 нм при 30 Дж/см^2. Обнаружено образование высоколегированных областей с максимальной концентрацией легирующего элемента 80 ат. %. Установлено, что увеличение количества импульсов КПП приводит к более интенсивной гомогенизации поверхностного слоя.

Вольфрам является одним из наиболее перспективных металлов в термоядерной энергетике. Благодаря таким свойствам, как высокая температура плавления, большая эрозионная стойкость, а также низкое поглощение трития, вольфрам применяется в качестве материала дивертора и первой стенки [1; 2]. Ограничение использования данного металла связано с его хрупкостью, низкой пластичностью и плохой обрабатываемостью [3; 4].

Легирование материала другими элементами является перспективным методом улучшения его физико-химических свойств [5]. Хрупкое разрушение в вольфраме происходит в основном из-за слабости границ зерен со случайной ориентацией, сегрегации и осаждения газообразных междоузельных элементов. С целью улучшения свойств металла необходимо максимально уменьшить содержание атомарного кислорода и азота на границах зерен за счет образования термически стабильных тугоплавких оксидов и нитридов [1; 2]. Диспергированные оксиды могут значительно улучшить сопротивление ползучести, повысить прочность и увеличить температуру рекристаллизации вольфрама [4].

В данном исследовании предлагается использовать цирконий, обладающий высоким химическим сродством к кислороду и азоту, в качестве легирующего элемента. Быстроразвивающимся методом формирования сплавов является воздействие на материал высокоэнергетических компрессионных плазменных потоков (КПП). Генерируемые квазистационарными ускорителями, пучки плазмы позволяют расплавить металл, что приводит к гидродинамическому смешиванию и последующему затвердеванию за малый промежуток времени. Данное воздействие способствует модификации поверхностного слоя и улучшению механических свойств материала [6].

Объектом исследования являлись пластины технически чистого вольфрама размером 10 × 10 мм и толщиной 1 мм. С помощью установки ВУ-2МБС на поверхность экспериментальных образцов методом вакуумно-дугового осаждения наносилось покрытие циркония толщиной 1 мкм. Далее сформированные системы подвергались воздействию КПП, генерация которых происходила в магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии в среде остаточного газа (азота) при давлении 400 Па. Формирование потока плазмы происходило в разрядном устройстве при разрядке системы конденсаторов при напряжении 4,0 кВ. Обработка образцов проводилась тремя последовательными импульсами длительностью 100 мкс с интервалом около 20 с, необходимых для перезарядки системы конденсаторов.

Основным параметром воздействия КПП на поверхность материала являлась плотность поглощенной энергии (Q), значение которой определялось за счет изменения расстояния между образцом и электродами разрядного устройства (L). При проведении калориметрических исследований было выявлено, что при увеличении L от 6 до 12 см значение Q варьировалось в пределах от 20 до 70 Дж/см^2.

Изучение фазового состава проводилось на основе рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Rigaku Ultima IV с использованием медного излучения (λ = 0,154178 нм) в геометрии параллельных пучков. Исследование морфологии поверхности осуществлялось при помощи растрового электронного микроскопа LEO 1455 VP при ускоряющем напряжении 20 кВ, позволяющем регистрировать отраженные и вторичные электроны. Методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) определялся элементный состав модифицированного слоя посредством микроанализатора Oxford X-Max^N.

Результатом воздействия КПП на поверхность образца является быстрый нагрев поверхностного слоя. При превышении температуры плавления элемента происходит формирование расплава, который после окончания импульса плазмы практически мгновенно кристаллизуется. Поэтому основными динамическими тепловыми параметрами, определяющими структурное состояние закристаллизовавшегося слоя, являются градиент температуры и скорость охлаждения. Также данные величины отвечают за развитие термоупругих напряжений в модифицированном слое при охлаждении и формирование типа микроструктурного состояния. Проведение расчетов данных параметров показало, что при обработке КПП образцов системы W/Zr градиент температуры увеличивается от $1{,}5\cdot10^7$ К/м при 20 Дж/см^2 до $5{,}1\cdot10^7$ К/м при 70 Дж/см^2. Скорость охлаждения жидкой фазы, формирующейся при 70 Дж/см^2 составила $3{,}1\cdot10^8$ К/с, а температура поверхностного слоя достигла 4220 К.

При проведении рентгеноструктурного анализа (рис. 1) были обнаружены дифракционные линии, соответствующие фазам W, α-Zr и ZrN. Однако при 70 Дж/см^2 наблюдаются исключительно дифракционные рефлексы ОЦК фазы вольфрама с параметром решетки 0,3165 нм, что соответствует табличному значению. Данный результат свидетельствует о непроникновении атомов циркония в решетку вольфрама. При плотности поглощенной энергии 50 Дж/см^2 не были выявлены фазы циркония и нитрида, однако обнаружено формирование твердого раствора на основе вольфрама. При 20 и 30 Дж/см^2 также наблюдаются фазы α-Zr и ZrN. Постоянная решетки нитрида варьировалась от 0,4562 до 0,4567 нм, что существенно отличается от табличного значения (0,4630 нм). Важно отметить, что нитриды формируются, как правило, с широкой областью гомогенности с недостатком по азоту. В этом случае у атомов вольфрама имеется возможность заполнять такие вакансионные места в решетке. Выявлено, что параметр решетки W(Zr) уменьшался от 0,3184 до 0,3177 нм при увеличении плотности поглощенной энергии от 20 до 30 Дж/см^2.

Исследование морфологии поверхности при 50 Дж/см^2 (рис. 2) методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) выявило образование областей с высокой и низкой концентрацией легирующего элемента. В областях, обогащенных цирконием, его концентрация достигала 80 ат. %, а в низколегированных зонах уменьшалась до 5 ат. %. Размер областей с низким содержанием легирующего элемента достигал 200 мкм.

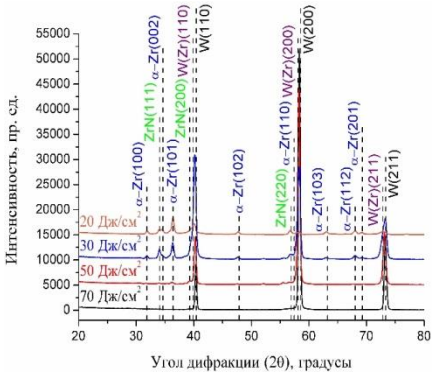


Рисунок 1 – Дифрактограмма системы W/Zr

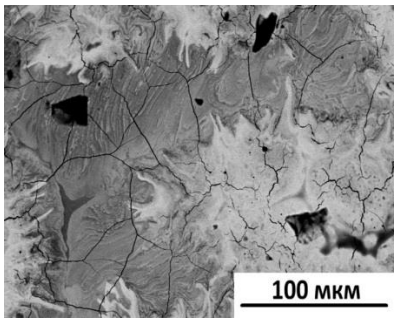


Рисунок 2 – РЭМ поверхности W/Zr при 50 Дж/см^2

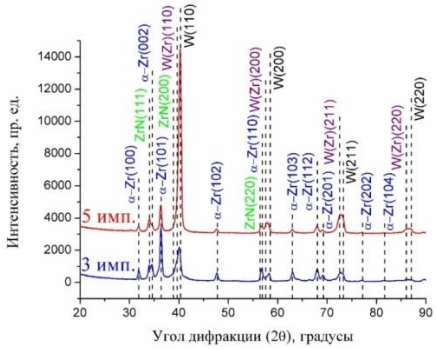


Рисунок 3 – Дифрактограмма системы W/Zr при 3 и 5 импульсах при 20 Дж/см^2

Также было проведено исследование влияния количества импульсов КПП на фазовое состояние системы W/Zr. Экспериментальные образцы были обработаны 3 и 5 импульсами КПП при 20 Дж/см^2. При изучении рентгеновской дифрактограммы (рис. 3) были обнаружены фазы W, α-Zr и ZrN, а также выявлено формирование твердого раствора на основе вольфрама с параметром решетки 0,3184 нм при 3 импульсах и 0,3187 нм при 5 импульсах. Постоянная решетки нитрида уменьшилась от 0,4567 до 0,4564 нм при увеличении количества импульсов от 3 до 5. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при обработке образцов 5 импульсами КПП наблюдается более интенсивная гомогенизация поверхностного слоя по сравнению с обработкой 3 импульсами.

В результате проведенного исследования, направленного на изучение структурно-фазового состояния вольфрама, легированного цирконием, при воздействии КПП было выявлено образование нитрида циркония ZrN с параметром решетки в пределах от 0,4562 до 4567 нм при плотностях поглощенной энергии 20 и 30 Дж/см^2. Также наблюдалось образование твердого раствора на основе вольфрама с параметром решетки 0,3184 нм при 30 Дж/см^2 и 0,3177 нм при 20 Дж/см^2. Исследование морфологии поверхности показало образование областей с низкой и высокой концентрацией легирующего элемента. Также было выявлено, что при воздействии 5 импульсами КПП происходит более эффективная гомогенизация поверхностного слоя.

Список литературы

1. Synergistic effects of trace ZrC/Zr on the mechanical properties and microstructure of tungsten as plasma facing materials / T. Zhang [et al.] // Nuclear Materials and Energy. – 2019. – Vol. 19. – C. 225–229.

2. Recent progress on the R&D of W-ZrC alloys for plasma facing components in fusion devices / R. Liu [et al.] // Nuclear Materials and Energy. – 2018. – Vol. 16. – C. 191–206.

3. Recent studies of tungsten-based plasma-facing materials in the linear plasma device STEP / H. Yin [et al.] // Tungsten. – 2019. – Vol. 1, № 2. – C. 132–140.

4. Spark plasma sintering and mechanical properties of zirconium micro-alloyed tungsten / Z. M. Xie [et al.] // Journal of nuclear materials. – 2014. – Vol. 444, № 1–3. – C. 175–180.

5. Влияние плазменного жидкофазного легирования на физико-механические свойства вольфрамовых сплавов / А. Е. Рыскулов [и др.] // Вестник НЯЦ РК. – 2024. – № 3. – С. 105–114.

6. Structure and phase composition of tungsten alloys modified by compression plasma flows and high-intense pulsed ion beam impacts / V. I. Shymanski [et al.] //Applied Surface Science. – 2019. – Vol. 491. – C. 43–52.

The study of metals used in thermonuclear energy is a promising area for the development of modern materials science. Due to its properties, tungsten is used as a material for the first wall and divertor. A rapidly developing area is the formation of alloys using high-energy short-pulse beams. The present study is aimed at investigating the structure and phase composition of tungsten alloyed with zirconium under the influence of compression plasma flows. The formation of zirconium nitride ZrN with a reduced lattice parameter was revealed, which is due to the penetration of W atoms into vacancy sites, as well as a solid solution W(Zr) with a lattice constant of 0.3177 nm at 20 J/cm^2 and 0.3184 nm at 30 J/cm^2. The formation of highly alloyed regions with a maximum alloying element concentration of 80 at. % was detected. It was found that an increase in the number of CPF pulses leads to more intense homogenization of the surface layer.

Галиновский Кирилл Александрович, студент 1 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, galinkirill147@gmail.com.

Научный руководитель – *Шиманский Виталий Игоревич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, shymanskiv@mail.ru.

УДК 53.08

Р. М. ГОЙ

КОМПЕНСАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ПРИ ГРУППОВОЙ ПОВЕРКЕ ГИГРОМЕТРОВ МЕТОДОМ РОТАЦИОННОГО УСРЕДНЕНИЯ

Рассмотрена проблема пространственной неоднородности поля влажности в рабочей камере генератора влажного газа при проведении групповой поверки гигрометров. Показано, что неоднородность распределения температуры и концентрации водяного пара является значимым источником дополнительной неопределённости результата поверки, не связанным с характеристиками поверяемых приборов. Предложен подход к снижению данной составляющей неопределённости, основанный на систематической ротации приборов по позициям внутри рабочей камеры с последующим статистическим усреднением результатов. Представлена математическая модель измерения, позволяющая разделить вклад позиции и вклад прибора. На основе модели показано, что при полной ротации по n позициям вклад неоднородности в стандартную неопределённость снижается в √n раз. Обоснована необходимость автоматизации процесса перестановки приборов для сохранения стабильности условий в камере. Приведён численный пример, демонстрирующий эффективность предложенного подхода.

Групповая поверка гигрометров в рабочей камере генератора влажного газа является эффективным способом повышения производительности метрологических работ: несколько приборов одновременно подвергаются воздействию среды с заданными параметрами влажности [1]. Требования к порядку проведения поверки средств измерений на территории Республики Беларусь регламентированы действующим законодательством [2; 4]. Однако при групповом подходе возникает проблема, которая при индивидуальной поверке не является существенной, – пространственная неоднородность условий внутри камеры. Вследствие температурных градиентов, конвективных потоков, геометрии подвода газа и наличия застойных зон каждый поверяемый прибор «видит» несколько отличающиеся значения влажности [5]. Данная неоднородность вносит систематическую составляющую в результат измерения, зависящую от положения прибора, а не от его характеристик, что приводит к увеличению неопределённости поверки.

Целью настоящей работы является обоснование метода компенсации влияния пространственной неоднородности поля влажности на результат групповой поверки гигрометров посредством ротации приборов по позициям и статистического усреднения результатов.

Источники пространственной неоднородности.

Основными физическими причинами неравномерности поля влажности в рабочей камере генератора являются: температурные градиенты вблизи стенок и крышки камеры, влияющие на локальное парциальное давление водяного пара; неравномерность распределения потока газа от входного патрубка; тепловыделение самих датчиков поверяемых гигрометров; застойные зоны с недостаточным газообменом [5]. В зависимости от конструкции генератора и числа одновременно поверяемых приборов разброс значений относительной влажности между позициями может составлять от 0,1 до 0,5 % отн. вл., что при поверке приборов с допускаемой погрешностью ±1–2 % отн. вл. является значимым вкладом в бюджет неопределённости [3].

Математическая модель.

Пусть в камере размещены N приборов на N позициях. Обозначим показание i-го прибора на j-й позиции как x_{ij}. Модель измерения запишем в виде:

$$x_{ij} = \varphi_{ref} + \delta_j + \varepsilon_i + e_{ij},$$

где φ_{ref} – опорное значение влажности, воспроизводимое генератором; δ_j – систематическое отклонение на j-й позиции (вклад неоднородности); ε_i – погрешность i-го прибора, подлежащая определению; e_{ij} – случайная составляющая с дисперсией σ_e^2.

При фиксированном размещении (без ротации) результат для i-го прибора содержит неразделимую сумму ($\delta_j + \varepsilon_i$), и вклад позиции полностью переносится на оценку погрешности прибора. Стандартная неопределённость результата поверки в этом случае:

$$u_{\text{без}} = \sqrt{(u_{ref}^2 + s_{pos}^2 + s_{rep}^2)},$$

где u_{ref} – стандартная неопределённость эталона; s_{pos} – дисперсия, обусловленная неоднородностью; s_{rep} – дисперсия повторяемости.

Метод ротационного усреднения.

Предлагается организовать измерения в несколько циклов, между которыми производится перестановка приборов по позициям. При использовании схемы латинского квадрата каждый из N приборов побывает на каждой из N позиций ровно один раз за N циклов [6]. Усреднённый результат для i-го прибора:

$$\overline{x_i} = (1/N) \sum_j x_{ij} = \varphi_{ref} + (1/N) \sum_j \delta_j + \varepsilon_i + \overline{e_i}.$$

Слагаемое $(1/N) \sum_j \delta_j$ представляет собой среднее отклонение по всем позициям. Оно одинаково для всех приборов и, следовательно, не влияет на определение разности погрешностей приборов. Стандартная неопределённость результата с ротацией:

$$u_{\text{рот}} = \sqrt{u_{ref}^2 + s_{pos}^2/N + s_{rep}^2/N}.$$

Таким образом, вклад неоднородности снижается в $\sqrt{N}$ раз.

Численный пример.

Рассмотрим групповую поверку четырёх гигрометров (N = 4) при уставке генератора влажного газа φ_{ref} = 30,0 % отн. вл. Допустим, что из-за пространственной неоднородности фактические отклонения на позициях составляют: δ_1 = −0,3; δ_2 = −0,1; δ_3 = +0,1; δ_4 = +0,3 (% отн. вл.), а истинные погрешности приборов: ε_1 = +0,2; ε_2 = −0,1; ε_3 = +0,4; ε_4 = −0,2 (% отн. вл.).

Без ротации (каждый прибор стоит на одной позиции): прибор 1 на позиции 1 показывает x_{11} = 30,0 + (−0,3) + 0,2 = 29,9; прибор 2 на позиции 2: x_{22} = 30,0 + (−0,1) + (−0,1) = 29,8; прибор 3 на позиции 3: x_{33} = 30,0 + 0,1 + 0,4 = 30,5; прибор 4 на позиции 4: x_{44} = 30,0 + 0,3 + (−0,2) = 30,1. Оценки погрешностей искажены вкладом позиций: например, для прибора 1 оценённая погрешность составляет −0,1 % при истинной +0,2 %, ошибка определения – 0,3 % отн. вл.

С полной ротацией по схеме латинского квадрата прибор 1 последовательно побывает на всех четырёх позициях. Его показания: 29,9; 30,5; 30,3; 30,1. Среднее: $\overline{x_i}$ = 30,2. Оценка погрешности: 30,2 − 30,0 = +0,2 % отн. вл. – совпадает с истинной ε_i. Аналогично для остальных приборов оценки точно совпадают с истинными погрешностями, поскольку $\sum_j \delta_j = 0$.

В реальных условиях, с учётом случайной составляющей, при u_{ref} = 0,15 % отн. вл., s_{pos} = 0,30 % отн. вл., s_{rep} = 0,10 % отн. вл. стандартная неопределённость снижается от $u_{\text{нерот}}$ = 0,35 % до $u_{\text{рот}}$ = 0,21 % отн. вл. – уменьшение на 40 %.

Необходимость автоматизации.

Ручная перестановка приборов требует вскрытия камеры, что приводит к нарушению термодинамического равновесия, потере стабильности заданной влажности и значительным временным затратам на восстановление режима. Автоматизированная система позиционирования, перемещающая приборы по заданному алгоритму внутри герметичной камеры, позволяет выполнить ротацию без разгерметизации, обеспечить воспроизводимость координат позиций и синхронизировать перестановку с циклом измерения (ротация → выдержка → регистрация).

Заключение.

Пространственная неоднородность поля влажности в рабочей камере генератора влажного газа является значимым источником неопределённости при групповой поверке гигрометров. Предложенный метод ротационного усреднения, основанный на систематической перестановке приборов по позициям с последующим усреднением результатов, позволяет снизить вклад неоднородности в стандартную неопределённость в $\sqrt{N}$раз. Практическая реализация метода требует автоматизированной системы позиционирования, обеспечивающей перемещение приборов внутри камеры без нарушения условий среды.

Список литературы

1. Берёзкин, Д. В. Методы и средства воспроизведения влажности газов / Д. В. Берёзкин, А. Н. Кропоткин // Измерительная техника. – 2008. – № 4. – С. 48–52.

2. Об обеспечении единства измерений : Закон Республики Беларусь, 5 сент. 1995 г., № 3848-XII : в ред. Закона Республики Беларусь от 27 дек. 2024 г. № 53-З. – Минск, 2024.

3. ГОСТ 34100.3-2017. Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения. – М. : Стандартинформ, 2018. – 96 с.

4. Об утверждении метрологических правил и норм : постановление Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь, 14 февр. 2025 г., № 115. – Минск, 2025.

5. Пономарёв, С. В. Измерение влажности / С. В. Пономарёв, С. В. Мищенко, А. А. Дивин. – М. : Физматлит, 2007. – 280 с.

6. Монтгомери, Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д. К. Монтгомери ; пер. с англ. – М. : Судостроение, 1980. – 384 с.

The article addresses the problem of spatial non-uniformity of the humidity field inside the working chamber of a humid gas generator during group verification of hygrometers. It is shown that the non-uniform distribution of temperature and water vapour concentration constitutes a significant component of measurement uncertainty unrelated to the characteristics of the instruments under test. A rotational averaging method is proposed, in which instruments are systematically repositioned across different locations within the chamber during successive measurement cycles, followed by statistical averaging of the results. A mathematical model separating the contributions of position and instrument is presented. It is demonstrated that complete rotation across N positions reduces the non-uniformity contribution to the standard uncertainty by a factor of √N. The necessity of an automated positioning system to preserve stable conditions inside the sealed chamber during instrument rotation is substantiated.

Гой Роберт Мечиславович, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, robert.goy@bk.ru.

Научный руководитель – *Валько Наталья Георгиевна*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, N.Valko@grsu.by.

Научный руководитель – *Романчук Виктор Антонович,* начальник сектора теплотехнических и физико-химических измерений Гродненского ЦСМС, Гродно, Республика Беларусь, sector_tfhi@csmsgrodno.by.

Научный руководитель – *Лобан Дмитрий Романович*, ведущий инженер по метрологии сектора теплотехнических и физико-химических измерений Гродненского ЦСМС, Гродно, Республика Беларусь, dkloban@gmail.com.

УДК 666.3-1-12-127

О. В. ГРИШЕЛЬ, С. М. АЗАРОВ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ПОРИСТЫХ СТРУКТУР ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

В данной работе проанализированы технологические преимущества высокопрочных пористых структур из керамических волокон. На основе сравнительного анализа обосновано превосходство керамики над полимерными и металлическими аналогами в условиях высоких температур (до 1600 °C) и агрессивных сред. Рассмотрены механизмы формирования межволоконных связей методами спекания и химического осаждения, обеспечивающие сочетание малой массы и высокой жесткости каркаса, а также влияние пористости и ориентации волокон на прочностные характеристики и термостойкость изделий. Подтверждена эффективность использования данных материалов для высокотемпературной фильтрации и создания облегченных теплозащитных конструкций. Предложено использовать в авиакосмической отрасли и энергетике благодаря сочетанию высокой статической прочности с минимальной массой, обеспечивающему создание облегчённых несущих конструкций.

Современное развитие высокотехнологичных отраслей промышленности, включая аэрокосмический сектор, энергетику и химическое машиностроение, диктует необходимость создания материалов, способных стабильно функционировать в условиях высоких тепловых и химических нагрузок. В этом контексте формирование пористых структур на основе керамических волокон представляет собой передовое технологическое решение, обладающее рядом фундаментальных преимуществ перед традиционными полимерными и металлическими системами. Согласно сравнительному анализу физико-химических свойств, ключевым достоинством керамических волокнистых каркасов является их беспрецедентная термическая стойкость: рабочий диапазон таких материалов достигает 1400–1600 °C [1]. В то время как полимерные волокна подвергаются термической деструкции уже при 100–250 °C, а металлические аналоги склонны к интенсивному окислению и потере прочности при 500–900 °C, керамика сохраняет структурную целостность и фазовую стабильность в условиях прямого воздействия высокотемпературных газовых потоков.

Механическое поведение керамических волокнистых систем определяется спецификой их микроструктуры и высокой энергией межатомных связей. В отличие от вязкоупругих полимеров или пластичных металлов, керамический каркас демонстрирует преимущественно упругий отклик вплоть до момента разрушения, что обеспечивает исключительную жесткость изделий при минимальном удельном весе. Это позволяет реализовывать концепцию «легких конструкций», обладающих высокой проницаемостью и одновременно способных выдерживать значительные статические нагрузки в условиях экстремальных температур до 1600 °C. В таких системах критическую роль играет природа связей в узлах каркаса: использование методов химического осаждения из газовой фазы спекания позволяет формировать высокопрочные когезионные перемычки, которые минимизируют концентрацию напряжений и предотвращают хрупкое лавинообразное разрушение [2].

Важным аспектом является химическая инертность материала: керамические волокна, в частности на основе оксида алюминия или карбида кремния, не вступают в реакцию с большинством кислот, щелочей и сильных окислителей. Данное свойство является критически важным для процессов глубокой фильтрации агрессивных газовых сред и расплавов, где традиционные металлические фильтры подвержены высокотемпературной коррозии и охрупчиванию, а полимерные – деструкции под воздействием растворителей и ультрафиолетового излучения. Высокая пористость в сочетании с термической стабильностью делает такие структуры идеальными носителями для катализаторов, обеспечивая развитую поверхность контакта фаз при минимальном гидравлическом сопротивлении потоку [3].

Технологический процесс формирования высокопрочных узлов связи в подобных высокопористых материалах базируется на методах высокотемпературного спекания и химического газофазного осаждения. В процессе спекания в местах контакта волокон происходит диффузионный перенос вещества, приводящий к образованию «шеек» и прочной когезионной связи на молекулярном уровне. Метод CVI, в свою очередь, позволяет прецизионно наращивать слой тугоплавкой матрицы непосредственно из газовой фазы, обеспечивая гомогенное обволакивание каждого отдельного волокна. Это создает жесткий самонесущий пространственный скелет, который препятствует взаимному проскальзыванию элементов структуры и минимизирует концентрацию локальных напряжений, что критически важно для сохранения стабильной геометрии пор в условиях высокоскоростных газовых потоков и резких температурных перепадов.

Для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик и строгого контроля качества готовой продукции применяются комплексные стандартизированные методы испытаний. Ключевым этапом является определение изменения массы при прокаливании. Данный гравиметрический анализ проводится путем нагрева навески материала до постоянной массы (обычно при температурах 1000–1100 °C), что позволяет косвенно, но с высокой точностью судить о химической чистоте материала, стабильности его фазового состава и полноте удаления технологических органических связующих [4]. Кроме того, контроль изменения массы гарантирует отсутствие в порах остаточных продуктов реакций, способных вызвать преждевременную деградацию или потерю огнеупорности изделия в процессе промышленной эксплуатации.

Особое внимание при проектировании и эксплуатации таких высокопористых структур уделяется их усталостной долговечности и поведению в условиях знакопеременных нагрузок. Несмотря на присущую керамике хрупкость и чувствительность к интенсивным высокочастотным вибрациям, которые могут провоцировать микрорастрескивание в узлах жесткой связи, керамические волокнистые материалы обладают исключительной статической выносливостью и высоким сопротивлением ползучести при экстремальных температурах [5].

В процессах фильтрации агрессивных газовых сред их использование позволяет существенно повысить эффективность сепарации мелкодисперсных фракций. Это достигается за счет реализации многоуровневой иерархической пористости и чрезвычайно развитой удельной поверхности, которая сохраняет свою геометрическую стабильность даже под воздействием значительных перепадов давления и высокоскоростных потоков. Высокая конструкционная жесткость керамического каркаса предотвращает деформацию и «схлопывание» пор, что гарантирует стабильно низкое гидравлическое сопротивление на протяжении всего жизненного цикла изделия.

На основании проведенного анализа сравнительных характеристик волокнистых материалов можно сделать вывод, что формирование пористых структур из керамических волокон обеспечивает технологические преимущества для работы в жестких условиях. Сочетание экстремально высокого температурного диапазона (до 1600 °С) и химической инертности делает эти материалы единственным эффективным решением для фильтрации агрессивных сред при температурах выше 200 °С, где полимерные и металлические аналоги подвергаются термической деструкции или коррозии.

Ключевым фактором эксплуатационной надежности является специфика механического отклика керамического каркаса. Упругий характер деформации и высокая жесткость узлов связи, сформированных методами спекания или CVI-процесса, гарантируют стабильность геометрических параметров пористости под давлением. Несмотря на чувствительность к вибрационным нагрузкам, высокая статическая выносливость и малый удельный вес позволяют успешно реализовывать концепцию «легких конструкций» в аэрокосмической и энергетической отраслях [6].

Таким образом, прецизионное управление микроструктурой и природой когезионных связей в керамических волокнистых системах открывает широкие перспективы для создания функциональных материалов нового поколения. Соблюдение стандартизированных протоколов контроля качества, включая оценку изменения массы при прокаливании, обеспечивает стабильность их состава и долговечность в самых жестких условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Дробышевская, О. В. Формирование пористой структуры керамики методом химического газофазного осаждения / О. В. Дробышевская, А. А. Бойко // Новые материалы и технологии : сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2021 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 112–115.

2. Бойко, А. А. Особенности высокотемпературного спекания оксидных керамических волокон / А. А. Бойко, Е. Н. Подденежный, Н. Е. Подденежная // Стекло и керамика. – 2015. – № 8. – С. 14–19.

3. Волокна керамические и изделия из них. Методы определения изменения массы при прокаливании : СТБ ГОСТ 28507-90. – Введ. 1991-01-01. – Минск : БелГИСС, 1996. – 6 с.

4. Подденежный, Е. Н. Сравнительный анализ свойств керамических и полимерных волокнистых материалов для фильтрации газовых сред / Е. Н. Подденежный, А. А. Бойко, О. В. Дробышевская // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2018. – № 4. – С. 25–32.

5. Сысоев, Э. П. Особенности технологии получения пористых керамических материалов на основе тугоплавких волокон / Э. П. Сысоев, С. В. Вихман // Огнеупоры и техническая керамика. – 2015. – № 6. – С. 12–18.

6. Бузник, В. М. Материалы авиационного назначения на основе кварцевых волокон / В. М. Бузник, Ю. А. Морозов, А. В. Степанов. – М. : ВИАМ, 2013. – 240 с.

The article analyzes the technological advantages of high-strength porous structures made of ceramic fibers. A comparative analysis substantiates the superiority of ceramics over polymer and metal counterparts at high temperatures (up to 1600 °C) and in aggressive environments. The mechanisms of interfiber bond formation using sintering and chemical deposition, which provide a combination of low weight and high framework rigidity, are examined, as well as the influence of porosity and fiber orientation on the strength properties and heat resistance of products. The effectiveness of these materials for high-temperature filtration and the creation of lightweight thermal protection structures is confirmed. Applications in the aerospace and energy industries are proposed due to their combination of high static strength and minimal weight, enabling the creation of lightweight load-bearing structures.

Гришель Ольга Викторовна, аспирант Белорусского национального технического университета, Минск, Республика Беларусь, olgastepan3@gmail.com.

Научный руководитель – *Азаров Сергей Михайлович,* доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология и методика преподавания» инженерно-педагогического факультета Белорусского национального технического университета, Минск, Республика Беларусь, TiMP@bntu.by.

УДК 546.621:538.971:539.21:621.785.6

А. В. ГУРБАНОВИЧ

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА СКАНИРУЮЩЕЙ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ

Выполнен литературный обзор статей о возможностях применения метода сканирующей фотоэлектронной спектроскопии (СФЭС). Рассмотрены преимущества СФЭС в сравнении со сканирующей туннельной микроскопией и методом дифракции медленных электронов. Выявлены дальнейшие перспективы применимости СФЭС-метода для исследования фольг на основе сплавов алюминия.

Атомная структура поверхности и трансформация ее в ходе процессов, протекающих на поверхности, занимают важное место в современной физике конденсированного состояния вещества. Эти сведения важны для понимания фундаментальных свойств поверхности твердых тел, создания тонких пленок и гетероструктур, исследования свойств наноматериалов. Очевидные успехи в области физики конденсированного состояния связаны с развитием экспериментальных методов изучения поверхности и теоретических подходов ее моделирования [1; 2].

Улучшение свойств алюминиевых сплавов наблюдается за счет легирования переходными металлами (хромом, железом, цирконием, титаном и другими) и редкоземельными элементами (скандием, иттрием, лантаном и прочими). Сверхбыстрая закалка сплавов алюминия увеличивает в несколько раз предел растворимости легирующих элементов. Это расширяет возможности проведения дальнейшей термической обработки пересыщенных твердых растворов. Другая особенность быстро затвердевших материалов заключается в диспергировании структурных составляющих сплавов при затвердевании, в том числе в выделении дисперсных включений неравновесных интерметаллидных фаз, состав и структура которых отличаются от равновесных фаз, что вызывает упрочнение образцов [2]. В настоящее время сплавы алюминия средней прочности успешно используются в системах хранения и транспортировки сжатого водородного топлива как альтернативной замены бензина и дизельного топлива. Одним из ключевых аспектов обеспечения безопасности при использовании сплавов является предотвращение в них водородного охрупчивания [2].

Цель данного обзора – дать оценку возможностям применения метода сканирующей фотоэлектронной спектроскопии с использованием синхротронного излучения (СИ) для исследования поверхности в алюминиевых сплавах, полученных в условиях сверхбыстрой закалки из расплава. При выборе метода характеризации поверхностных слоёв быстро затвердевших алюминиевых сплавов необходимо учитывать характеристики метода (глубину анализа, чувствительность к химическому состоянию элементов и возможность количественной оценки элементного состава). Рассмотрим преимущества сканирующей фотоэлектронной спектроскопии в сравнении со сканирующей туннельной микроскопией и методом дифракции медленных электронов, см. таблицу 1.

Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ, STM) обеспечивает атомное разрешение топографии поверхности, однако предоставляет информацию исключительно о верхнем атомном слое (глубина анализа ≤0,3 нм). Метод не позволяет исследовать подповерхностные области (второй, третий и последующие слои), где локализуются ключевые структурные изменения, обусловленные неравновесной кристаллизацией. Кроме того, СТМ не чувствителен к химическому состоянию элементов [1, 3]: измеряется туннельный ток, который зависит от локальной плотности электронных состояний и топографии поверхности, но химические элементы напрямую не идентифицируются.

Дифракция медленных электронов (ДМЭ, LEED) применима для анализа кристаллической структуры поверхности алюминиевых сплавов и исследования процессов адсорбции и окисления. Метод обеспечивает высокую чувствительность к упорядоченности поверхностного слоя (глубина анализа 0,5–2 нм). Регистрирует дифракционную картину от периодической структуры поверхности, давая информацию о кристаллической структуре и симметрии, но не о химическом составе [3]. Поскольку ДМЭ не предоставляет информации о химической природе элементов и их степенях окисления, это критически ограничивает применение метода для изучения многокомпонентных сплавов системы Al–Me.

Электронная спектроскопия для химического анализа – сканирующая фотоэлектронная спектроскопия (СФЭС, ESCA/XPS) – обладает рядом преимуществ для решения задач данного исследования, представленных в табл. 1. Рассматривая глубину анализа СФЭС, необходимо учитывать, что получаемая информация формируется электронами, выходящими с глубины 5–10 нм (3–5 длин свободного пробега), что соответствует глубине модифицированного поверхностного слоя сплавов, полученных сверхбыстрой закалкой из расплава. Это позволяет исследовать не только верхний монослой, но и подповерхностную область, где формируются градиенты состава и оксидные плёнки. Применение СФЭС также позволяет изучать особенности химического состава поверхности материалов. Уникальные значения энергий связи электронов внутренних оболочек для каждого элемента (за исключением водорода) позволяют однозначно идентифицировать элементный состав. В случае алю-

миниевых сплавов это критически важно для разделения сигналов от металлического алюминия (Al^0, $E_{св} \approx$ 72,3 эВ) и его оксидов (Al^{3+}, $E_{св} \approx 75{,}5$ эВ) Выполнение количественного анализа химического состояния возможно, поскольку точное измерение энергии связи и моделирование формы пиков позволяет определять степени окисления элементов и их химическое окружение. Для бинарных сплавов алюминия это даёт возможность оценить распределение легирующих элементов между матрицей и оксидным слоем [2].

Таблица 1 – Сравнительная характеристика методов поверхностного анализа:
СФЭС, СТМ и ДМЭ для характеризации поверхности алюминиевых сплавов

Параметр	СФЭС	СТМ	ДМЭ	Комментарий для СФЭС
Глубина анализа, нм	5–10	≤0,3	0,5–2,0	Определяется длиной свободного пробега электрона
Элементная чувствительность	Все, кроме H и He	Нет	Нет	$Z \geq 3$ (Li–U)
Определение химического состояния	Да (степень окисления)	Нет	Нет	Химический сдвиг линий
Количественный анализ	Да (относительная погрешность ~10 %)	Нет	Нет	Без эталонов, с учётом сечений фотоионизации
Чувствительность к оксидным фазам	Высокая	Низкая	Средняя	Разделение сигналов Al^0/Al^{3+} по энергии связи
Рекомендуемая область применения	Химический анализ, оксидные плёнки, многокомпонентные системы	Атомная топография, проводящие поверхности	Кристаллическая структура, упорядоченные поверхности	–

Важно отметить преимущества использования синхротронного излучения в СФЭС-экспериментах, которое обеспечивает высокую яркость и монохроматичность излучения; возможность настройки энергии фотонов для оптимизации глубины анализа; повышенное энергетическое разрешение ($\Delta E \approx 0{,}1$ эВ) для детального анализа химического сдвига.

Таким образом, для комплексной характеризации поверхностных слоёв быстро затвердевших алюминиевых сплавов метод СФЭС на синхротронном источнике является оптимальным выбором, поскольку обеспечивает одновременное получение информации об элементном составе, химическом состоянии и глубинном распределении компонентов в области, определяющей функциональные свойства материала (смачиваемость, адгезия, коррозионная стойкость).

Список литературы

1. Яминский, И. В. Сканирующая зондовая бионаноскопия: методы и аппаратура, результаты и достижения / И. В. Яминский // Вестн. Моск. ун-та. Физика. Астрономия. – 2024. – № 1. – С. 1–16.

2. Ташлыкова-Бушкевич, И. И. Влияние хрома на химический состав и свойства поверхности быстро затвердевших сплавов Al-Cr / И. И. Ташлыкова-Бушкевич, В. Г. Шепелевич, М. Аматти, М. Кискинова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – № 1. – С. 81–88.

3. Цуканов, Д. А. Исследование электрического сопротивления пленок галлия на реконструированной поверхности Si(111) / Д. А. Цуканов, М. В. Рыжкова // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94, вып. 8. – С. 1240–1249.

A literature review on the possibilities of using synchrotron-based photoelectron microscopy (SPEM) has been performed. The advantages of SPEM in comparison with scanning tunneling microscopy and the method of slow electron diffraction were considered. Additionally, further prospects for the application of SPEM in the study of aluminum alloy foils have been identified.

Гурбанович Антон Викторович, аспирант факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиотехники, Минск, Республика Беларусь, a.gurbanovich@bsuir.by.

Научный руководитель – *Ташлыкова-Бушкевич Ия Игоревна*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики факультета компьютерных систем и сетей Белорусского государственного университета информатики и радиотехники, Минск, Республика Беларусь, iya.itb@bsuir.by.

УДК 539.25; 538.91;538.97

С. А. ДЕМИДОВИЧ, А. В. МИХЕЕНКО, Ю. М. КУКУТЬ, Н. С. КОВАЛЬЧУК

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ICP CVD ОСАЖДЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ НА ТОКИ УТЕЧКИ В AlGaN/GaN HEMT

Исследовано влияние ICP CVD режимов на пассивацию гетероструктуры AlGaN/GaN. Кислородная обработка создает оксидный слой, снижая токи утечки. Ключевым результатом является разработка комбинированного подхода: предварительная модификация поверхности AlGaN кислородной плазмой с последующим осаждением SiON в мягком режиме ICP CVD.

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе гетероструктур AlGaN/GaN являются ключевыми компонентами современной силовой и СВЧ-электроники благодаря уникальным свойствам двумерного электронного газа (2DEG): высокой подвижности носителей (~2000 см²/(В·с)) и их высокой концентрации (~10^{13} $см^{-2}$) [1]. Однако надежность и производительность этих приборов ограничены такими деградационными явлениями, как коллапс тока и высокий уровень токов утечки. Эти эффекты напрямую связаны с дефектами на поверхности AlGaN-слоя, включая неконтролируемое окисление и захват носителей заряда в поверхностные состояния [2]. Качество пассивирующего покрытия и состояние границы раздела «диэлектрик-полупроводник» критически влияют на стабильность характеристик приборов. Наличие дефектов на границе AlGaN/диэлектрик может создавать пути для туннелирования носителей, усиливая токи утечки [3].

В ходе исследований использовались тестовые AlGaN/GaN HEMT структуры с длиной затвора 2,0 мкм и шириной 3,8 мм, сформированные на подложках Si. Омические контакты и затворы Ni/Au создавались методом электронно-лучевого испарения и взрывной литографии. Ключевым этапом являлась предэпитаксиальная обработка: наилучшие результаты были достигнуты при обработке поверхности кислородной плазмой в течение 10 минут при давлении 40 Па, что позволило сформировать контролируемый оксидный интерфейс и снизить начальный ток утечки. Далее проводилось осаждение диэлектрических пленок методом ICP CVD в широком диапазоне параметров: мощность ICP варьировалась от 50 до 500 Вт, давление от 1 до 17 Па, а температура подложки от 120 до 400 °C. Предварительная обработка кислородной плазмой позволила снизить начальный ток утечки сток-исток в закрытом состоянии (I_{DSS}) с 5–10 мкА до 10–100 нА. Исходный режим осаждения (низкая мощность, давление 1 Па) приводил к росту токов утечки до 50–70 мкА. Введение закиси азота (N_2O) в газовую смесь. Предварительная обработка кислородной плазмой позволила снизить начальный ток утечки сток-исток в закрытом состоянии (I_{DSS}) с 5–10 мкА до 10–100 нА. Исходный режим осаждения (низкая мощность, давление 1 Па) приводил к росту токов утечки до 50–70 мкА. Введение закиси азота (N_2O) в газовую смесь для осаждения кислородсодержащего нитрида кремния (SiON) значительно улучшило ситуацию (рисунок 1).

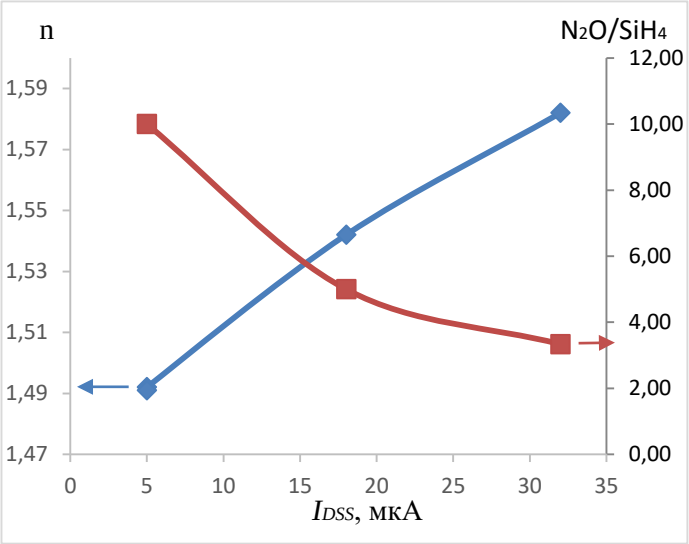


Рисунок 1 – Зависимость тока утечки сток-исток в закрытом состоянии от соотношения N_2O /SiH4 и показателя преломления плёнки

Детальный анализ зависимости времени стабилизации тока утечки от параметров осаждения (см. таблицу 1) выявил критическую роль не только состава газовой смеси, но и энергетических условий процесса. Исходный «мягкий» режим (P = 1 Па, ICP = 50 Вт, T = 120 °C) приводил к длительной (до 30 суток) релаксации тока утечки до уровня 5 мкА, что свидетельствует о нестабильности границы раздела и значительной плотности по-

верхностных состояний. Повышение температуры и давления само по себе ухудшало характеристики, однако синхронное увеличение всех трех параметров (ICP, T, P) позволило принципиально изменить ситуацию. При достижении режима P = 14 Па, ICP = 300 Вт, T = 300 °C наблюдалось не только снижение I_{DSS} до рекордных 50–100 нА, но и сокращение времени стабилизации параметров до 1–2 суток. Это указывает на формирование более плотной и качественной пленки SiON с оптимальным стехиометрическим составом, что подтверждается стабилизацией показателя преломления на уровне 1,49 при соотношении N_2O/SiH_4=10.

Таблица 1 – Время стабилизации тока утечки в зависимости от параметров процесса осаждения (ICP; T, °C; P, Па) при одинаковом соотношении газов

Время после процесса, сутки	Параметры осаждения пленки – рабочее давление (P), Па; мощность плазмы (ICP), Вт; температура подложкодержателя (T), ºC						
	P=1, ICP=50, T=120	P=5, ICP=100, T=200	P=6,8, ICP=150, T=200	P=14, ICP=300, T=300	P=17, ICP=400, T=300	P=17, ICP=400, T=400	P=17, ICP=500, T=400
	I_{DSS}, A						
0	6,00E-05	1,60E-05	4,20E-06	1,50E-06	6,70E-05	9,50E-05	7,30E-06
1				8,40E-08			
2			6,00E-07	8,40E-08	6,30E-05	6,20E-05	6,40E-05
4	8,80E-05		6,00E-07				
5		2,30E-05			2,30E-06	4,80E-06	3,20E-06
8					2,30E-06	4,80E-06	3,20E-06
14	2,50E-05						
15		3,00E-06					
18		3,00E-06					
28	5,00E-06						
30	5,00E-06						

Важно отметить, что дальнейшее форсирование режима (ICP>400 Вт) приводило к обратному эффекту – росту токов утечки до 60–90 мкА и увеличению времени стабилизации до 5–8 суток, что связано с плазменным повреждением приповерхностной области AlGaN. Полученные в оптимальном режиме пленки SiON продемонстрировали высокое качество: конформность покрытия ступеней составила ~70 % (толщина на боковой стенке 34 нм при исходной толщине 50 нм), а среднеквадратичная шероховатость поверхности Ra не превышала 0,3 нм. Апробация разработанной технологии на мощных HEMT с шириной затвора 16 мм подтвердила ее эффективность – значение I_{DSS} не превысило 2 мкА, что полностью удовлетворяет требованиям к современным силовым и СВЧ-компонентам.

Таким образом, комбинированный подход, включающий предварительную кислородную обработку и последующее осаждение SiON в оптимизированном «мягком» режиме ICP CVD, является высокоэффективным методом подавления токов утечки и повышения долговременной стабильности AlGaN/GaN HEMT. Полученные результаты создают основу для дальнейшей оптимизации технологии применительно к задачам массового производства и разработки приборов нового поколения.

Список литературы

1. Investigation of the Fabrication Processes of AlGaN/AlN/GaN HEMTs with in SITU Si3N4 Passivation / K. N. Tomosh [et al.] // Semiconductors. – 2016. – Vol. 50, No 10. – P. 1416–1420.

2. Surface Electrical Characterization of Defect Related Inhomogeneities of AlGaN/GaN/Si Heterostructures Using Scanning Capacitance Microscopy / A. Szyszka [et al.] // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2019. – Vol. 94. – P. 57–63. – DOI: 10.1016/j.mssp.2019.01.043.

3. Pre-Passivation Plasma Surface Treatment Effects on Critical Device Electrical Parameters of AlGaN/GaN HEMTs / D. J. Meyer, J. R. Flemish, J. M. Redwing // CS MANTECH. – 2008. – P. 261–264.

The influence of ICP CVD regimes on the passivation of the AlGaN/GaN heterostructure has been investigated. Oxygen treatment creates an oxide layer, reducing leakage currents. The key result is the development of a combined approach: preliminary modification of the AlGaN surface with oxygen plasma followed by the deposition of SiON in a low-damage ICP CVD regime.

Демидович Сергей Александрович, аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл», Минск, Республика Беларусь, sdemidovich@integral.by.

Михеенко Александр Викторович, ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл», Минск, Республика Беларусь, miheenkoalek@gmail.com.

Кукуть Юрий Михайлович, ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл», Минск, Республика Беларусь, ykukut@integral.by.

Научный руководитель – *Ковальчук Наталья Станиславовна*, кандидат технических наук, доцент, заместитель генирального дириректора – главный инженер, ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл», Минск, Республика Беларусь, nkovalchuk@integral.by.

УДК 535.333

И. А. ДЕМЯШКЕВИЧ

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КРАСИТЕЛЯ ДИАЛКИЛАМИНО-БЕНЗИЛИДЕН-МАЛОНОНИТРИЛА (DBMN) ПРИ ВСТРАИВАНИИ В БЕЛОК БСА И АМИЛОИДНЫЕ ФИБРИЛЛЫ

Продолжено изучение спектральных свойств молекулы органического красителя DBMN (диалкиламино-бензилиден-малононитрил) при его агрегации с бычьим сывороточным альбумином (БСА) и амилоидными фибриллами. Исследовано влияние концентрации БСА и амилоидных фибрилл на спектры поглощения и флуоресценции DBMN. Установлено, что при увеличении концентрации БСА и амилоидных фибрилл наблюдается значительное увеличение квантового выхода флуоресценции. При агрегации с амилоидными фибриллами также имеет место значительный батохромный сдвиг спектра флуоресценции (~100 нм). Наблюдаемые спектральные сдвиги объясняются на основе теории межмолекулярных взаимодействий и модели молекулярного ротора.

Флуоресцентные молекулярные роторы, чувствительные к вязкости и полярности микроокружения, широко применяются для детекции белковых агрегатов и амилоидных структур. Одним из перспективных зондов является диалкиламино-бензилиден-малононитрил (DBMN), обладающий донорно-акцепторными группами и выраженным переносом заряда в возбужденном состоянии. Цель работы – исследование спектральных изменений DBMN при связывании с бычьим сывороточным альбумином (БСА) и амилоидными фибриллами, а также анализ механизмов, ответственных за увеличение квантового выхода флуоресценции.

Методика исследований. Спектры поглощения растворов регистрировались с использованием спектрофотометра Specord M200 (Carl Zeiss, Германия). Измерение спектров и квантового выхода флуоресценции производили на спектрофлуориметре СМ2203 (Солар, РБ). Спектральное разрешение установок составляло 1 нм. Использовался краситель DBMN фирмы Sigma-Aldrich (США), без дополнительной очистки, БСА (фракция V), амилоидные фибриллы, полученные инкубацией инсулина при 37 °C. Концентрации DBMN составляли 2,8 и 4 мкмоль/л, концентрации БСА варьировали от 0,2 до 1 мг/мл, амилоидных фибрилл – от 0,0097 до 0,07 мг/мл.

Результаты.

Ранее нами была исследована зависимость флуоресцентных свойств молекулы диалкиламино-бензилиден-малононитрила (DBMN) от полярности и вязкости растворителя [3], в результате которых мы показали выраженную зависимость спектров поглощения и флуоресценции от полярности растворителя (наблюдается смещение спектров поглощения и флуоресценции в красную область – батохромный сдвиг). В продолжение изучения свойств данной молекулы, нами проведены экспериментальные исследования спектров поглощения и флуоресценции DBMN при агрегации с БСА и амилоидными фибриллами.

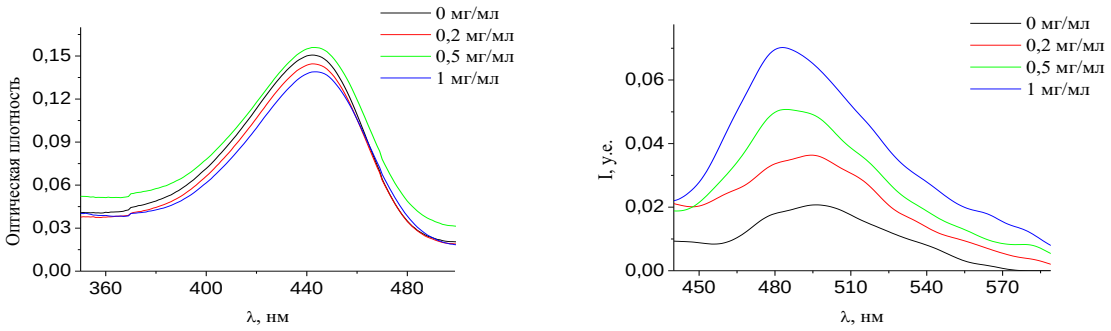
В водном растворе DBMN (рис.1б, черный спектр) демонстрирует слабую флуоресценцию с максимумом около 490 нм ($\lambda_{возб}$ = 420 нм). Это связано с тем, что возбужденная молекула эффективно расходует энергию на безызлучательную релаксацию через вращение вокруг свободных связей. Добавление БСА вызывает незначительный батохромный сдвиг спектра поглощения ($\Delta\lambda \approx 2$ нм) и многократное увеличение интенсивности флуоресценции (рис.1б, красный, зеленый и синий спектры).

БСА – глобулярный белок-транспортер, содержащий гидрофобные карманы (сайты связывания). DBMN интеркалирует в эти карманы, что приводит к умеренному ограничению вращения, а значит подавляет безызлучательный канал дезактивации возбужденного состояния молекулы красителя. Данная иммобилизация DBMN в жесткой матрице белка подтверждается значительным увеличением интенсивности флуоресценции с ростом концентрации БСА (от 0,2 мг/мл до 1 мг/мл), что соответствует классическому поведению молекулярных роторов при их связывании с белковой матрицей.

Ещё более выраженные изменения наблюдаются в присутствии амилоидных фибрилл. Так при увеличении концентрации фибрилл от 0,0097 мг/мл до 0,07 мг/мл интенсивность флуоресценции возрастает от ~8,7 раз до более чем 25 раз, а максимум испускания смещается от 490 нм до 582 нм (рис.2б). Амилоидные фибриллы представляют собой жесткие, упорядоченные β-складчатые структуры с протяженными гидрофобными канавками, поэтому DBMN не просто связывается, а **полностью иммобилизуется** в этих канавках, что приводит к **максимальному подавлению вращательной релаксации**. Этим объясняется наибольшее увеличение интенсивности флуоресценции среди всех исследованных сред. Также можем отметить, что данная зависимость интенсивности флуоресценции DBMN от концентрации амилоидных фибрилл носит линейный характер (рис.3).

Значительный батохромный сдвиг (92 нм) спектра флуоресценции DBMN при связывании с амилоидными фибриллами обусловлен тем, что жесткое микроокружение фибриллы подавляет вращательные степени свободы молекулы, стабилизируя её в плоской конформации с максимальным π-сопряжением, что снижает энергию

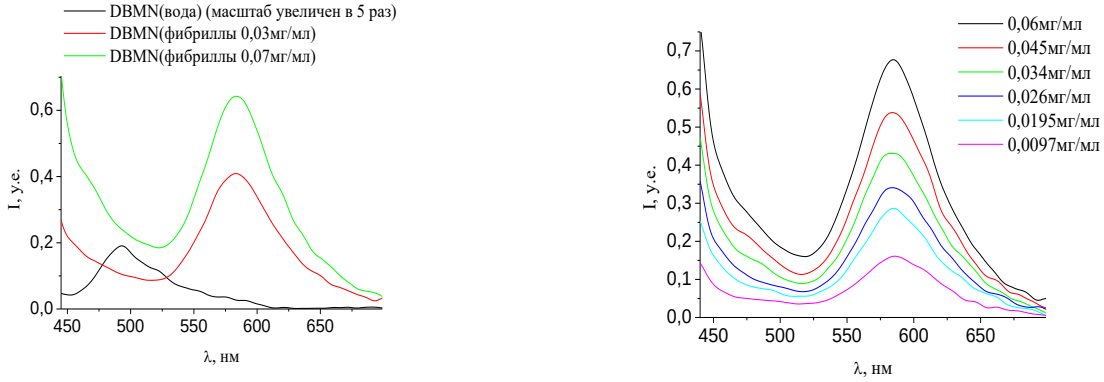
$S_0 \rightarrow S_1$ перехода. Исключение возможности образования скрученных состояний с внутримолекулярным переносом заряда, характерных для полярной среды, приводит к флуоресценции из локально-возбужденного состояния с меньшей энергией. Неполярная среда фибрилл изменяет соотношение энергий основного и возбужденного состояний, способствуя дополнительной стабилизации состояния S_1.



а *б*

Рисунок 1 – Спектры поглощения (а) и флуоресценции (б) водного раствора DBMN (4 мкмоль/л) при концентрациях БСА: 0,2; 0,5 и 1 мг/мл.

Полученные данные хорошо согласуются с классической моделью молекулярного ротора. Так в свободном виде вращение фрагментов DBMN вокруг связей обеспечивает эффективную безызлучательную релаксацию, а при иммобилизации в жёсткой матрице белка или фибриллы вращение ограничивается и основным каналом дезактивации становится флуоресценция. Дополнительный вклад вносит снижение полярности микроокружения, что подтверждается батохромным сдвигом спектров и стабилизацией возбуждённого состояния с внутримолекулярным переносом заряда.



а *б*

Рисунок 2 – Спектры флуоресценции водного раствора DBMN при различной концентрации фибрилл (концентрация DBMN 2,8 мкмоль/л при длине волны возбуждения 420нм)

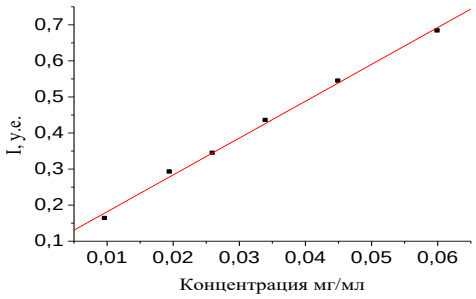


Рисунок 3 – График зависимости интенсивности флуоресценции раствора DBMN от концентрации амилоидных фибрилл

Представленные результаты убедительно подтверждают механизм увеличения квантового выхода при агрегации с БСА и фибриллами на основе модели молекулярного ротора и демонстрируют потенциал DBMN как чувствительного зонда для детекции как нативных белков (БСА), так и патологических амилоидных агрегатов. Высокая чувствительность к структурным особенностям белковых агрегатов позволяет рекомендовать DBMN для изучения кинетики амилоидогенеза и скрининга потенциальных ингибиторов этого процесса.

Список литературы

1. Spectral properties of thioflavin T in solvents with different dielectric properties and in a fibril-incorporated form / A. A. Maskevich, V. I. Stsiapura, V. A. Kuzmitsky [et al.] // Journal of Proteome Research. – 2007. – Vol. 6, no. 4. – P. 1392–1401.

2. Thioflavin T as a molecular rotor: fluorescent properties of thioflavin T in solvents with different viscosity / V. I. Stsiapura, A. A. Maskevich, V. A. Kuzmitsky [et al.] // J Phys Chem B. – 2008; 112: 15893–15902.

3. Демяшкевич, И. А. Спектральные свойства красителя диалкиламино-бензилиден-малононитрила (DBMN) / И. А. Демяшкевич, Д. М. Чумаченко // Физика конденсированного состояния – 2025 : материалы XXXIII Междунар. науч.-практ. конф. аспир., магистр. и студ., 3–4 апр. 2025 г., Гродно / ГрГУ им. Янки Купалы ; редкол.: Г. А. Гачко (гл. ред.), Н. Г. Валько, С. С. Ануфрик, А. А. Маскевич, А. Е. Герман. – Гродно : ГрГУ, 2025. – С. 30–32.

In this work, we continued to investigate the spectral properties of the organic dye DBMN (dialkylaminobenzylidene malononitrile) upon its aggregation with bovine serum albumin (BSA) and amyloid fibrils. The effect of BSA and amyloid fibril concentrations on the absorption and fluorescence spectra of the molecule was investigated. With increasing BSA and amyloid fibril concentrations, a significant increase in the fluorescence quantum yield was observed, as well as a significant bathochromic shift of fluorescence (~100 nm) upon aggregation with amyloid fibrils. The observed spectral shifts are explained based on the theory of intermolecular interactions.

Демяшкевич Игорь Анатольевич, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, digor84@gmail.com.

Научный руководитель – *Маскевич Александр Александрович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, amaskevich@grsu.by.

УДК 621.318.1

Н. А. ДУБИНИН, Г. С. РИМСКИЙ, А. Л. ЖЕЛУДКЕВИЧ

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ДОПИРОВАННОГО САМАРИЕМ МАГНЕТИТА

Методом соосаждения проведен синтез наноразмерного магнетита Fe_3O_4 допированного самарием. С использованием рентгеноструктурного анализа, установлено, что все дифракционные пики полученных образцов проиндексированы в рамках инверсной структуры шпинели (пространственная группа $Fd\bar{3}m$). При допировании ионы Sm^{3+} замещают ионы Fe^{3+} в октаэдрических позициях. Уменьшение параметра (a) кристаллической решетки объясняется её деформацией. Рассчитан средний размер кристаллитов, который изменяется от 11,5 до 15,7 нм для полученных наночастиц Sm:Fe_3O_4 с концентрацией Sm от 1 ат.% до 5 ат.%. Исследование температурных зависимостей удельной намагниченности осуществлено пондеромоторным методом в магнитном поле 8,6 кЭ в интервале температур 80 – 700 К. Наночастицы Fe_3O_4 имеют удельную намагниченность 78,9 $А·м^2·кг^{-1}$ при 80 К и T_C = 740 К. При допировании самарием наблюдается рост T_C = 800 К на фоне снижения удельной намагниченности до 53,1 $А·м^2·кг^{-1}$ для образца 5 ат.% самария.

Ферриты с кубической структурой шпинели типа AB_2O_4, среди которых наиболее ярким представителем является магнетит Fe_3O_4, привлекают пристальное внимание исследователей благодаря своим уникальным физическим свойствам. В этой структуре ионы железа распределены между тетраэдрическими (позиции А) и октаэдрическими (позиции В) узлами, что обуславливает сложное магнитное упорядочение и целый ряд фазовых переходов, включая переход Вервея [1]. Перспективным направлением модификации физико-химических свойств магнетита является допирование ионами редкоземельных элементов, в частности самарием. Легирование самарием оказывает существенное влияние на кристаллическую структуру, морфологию наночастиц и параметры магнитных переходов, что связано с предпочтительным вхождением ионов Sm^{3+} в определенные кристаллографические позиции [2]. Эти особенности, наряду с возможностью управления морфологией и магнитными характеристиками наночастиц, открывают широкие перспективы применения магнетита в высокочастотных устройствах, биомедицине и создании функциональных нанокомпозитов [3-6].

Целью данной работы было синтезировать наноразмерный магнетит Fe_3O_4 допированный самарием и исследовать его магнитные свойства.

В качестве оптимального синтеза наноразмерного магнетита (Fe_3O_4) допированного самарием (Sm:Fe_3O_4) выбран метод химического соосаждения. Для синтеза в качестве исходных реагентов использованы: железо (II) сульфат гептагидрат ($FeSO_4 \cdot 6H_2O$) и железо (III) нитрат нонагидрат ($Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$). В качестве легирующего

материала был использован самария (III) нитрат гексагидрат ($Sm(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$). Процентное содержание основного химического вещества была не ниже 99,9 %. Водные растворы $FeSO_4 \cdot 6H_2O$, $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ и $R(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ смешивались в необходимом молярном соотношении. Растворы готовились двумя методами смешивания. Первый метод: к раствору $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ добавляли растворенное в дистиллированной воде вещество $R(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, а затем после нескольких минут перемешивания вливали в него водный раствор, содержащий $FeSO_4 \cdot 6H_2O$. Второй метод: к раствору $FeSO_4 \cdot 6H_2O$ добавляли $R(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, а затем после нескольких минут перемешивания вливали в него водный раствор, содержащий $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$.

Изначально известно, что изменение последовательности смешивания растворов солей влияет на намагниченность насыщения этих наночастиц [7]. Весь процесс смешивания проводился в атмосфере аргона (Ar) во избежание частичного окисления Fe^{2+} до метагидроксида железа (α-FeOOH). Для получения наночастиц $R:Fe_3O_4$ (R = Sm) с концентрацией 1 ат.%, 2,5 ат.% и 5 ат.% $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, $FeSO_4 \cdot 4H_2O$ и $(Sm(NO_3)_3 \cdot 6H_2O)$ смешивали в мольных соотношениях 1,97:1,00:0,03 и 1,925:1,00:0,075 и 1,85:1,00:0,15 соответственно. Далее в раствор при постоянном перемешивании на магнитной мешалке по каплям добавлялся аммиак (NH_4OH) с концентрацией 25% и кислотность раствора доводилась до ~ 10pH.

Затем раствор выливали в автоклав высокого давления из нержавеющей стали с тефлоновым покрытием, где продукты реакции выдерживали при 140 °C в течение 18 часов. Автоклав охлаждали до комнатной температуры. Полученный черный осадок несколько раз промывали этиловым спиртом и дистиллированной водой, затем извлекали магнитной декантацией. Порошок сушили в вакуумной печи при температуре 90 °C в течение 12 ч.

Аттестация полученных образцов проведена с помощью рентгенофазового анализа в Cu–Kα-излучении. Рентгенограммы снимались при комнатной температуре в диапазоне углов 2Θ = 10–70º с шагом 0,02° и временем экспозиции 3 секунды в каждой точке. Для простоты исходный образец Fe_3O_4 обозначен как FO, а допированные образцы с содержанием самария 1,25, 2,5 и 5 ат.% и обозначены как 1,25SmFO, 2,5SmFO, 5SmFO, соответственно.

Рентгенограммы образцов исходного магнетита FO и образцов магнетита допированного лантаном и самарием представлены на рисунке 1.

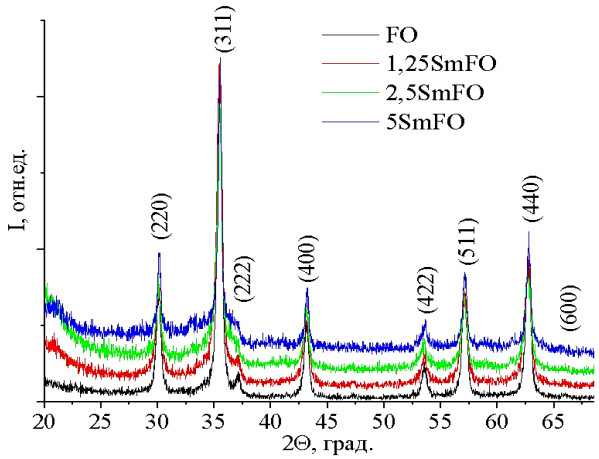


Рисунок 1 – Рентгенограмма исходного и допированного самарием магнетита

Все наблюдаемые дифракционные пики проиндексированы в рамках инверсной структуры шпинели (пространственная группа $Fd\bar{3}m$) (номер карты JCPDS: 85-1436). Рентгеновские спектры свидетельствуют о том, что допирование самарием не оказывает существенного влияния на кристаллическую структуру FO. При допировании ионы Sm^{3+} (ионный радиус = 0,108 нм) замещают ионы Fe^{3+} (ионный радиус = 0,065 нм) в октаэдрических позициях (рисунок 2). Параметр кристаллической решетки *a* уточнен с помощью метода Ритвельда и составляет 0,839 и 0,830, 0,833, 0,836 нм для образцов FO и 1,25SmFO, 2,5SmFO, 5SmFO, соответственно. Уменьшение параметра решетки можно объяснить деформацией кристаллической решетки, обусловленной допированием редкоземельными элементами, в образцах FO [8].

Рассчитанный средний размер кристаллитов, составляет примерно 11,5, 13,5, 15,7 нм для образцов 1,25SmFO, 2,5SmFO и 5SmFO, соответственно. С увеличением допирования наблюдается увеличение размера кристаллитов. Увеличение размера частиц, вероятнее всего является следствием эффекта, вызванного напряжением вследствие легирования более высокой концентрации крупных ионов редкоземельных элементов в меньшие позиции ионов Fe^{3+} [9; 10].

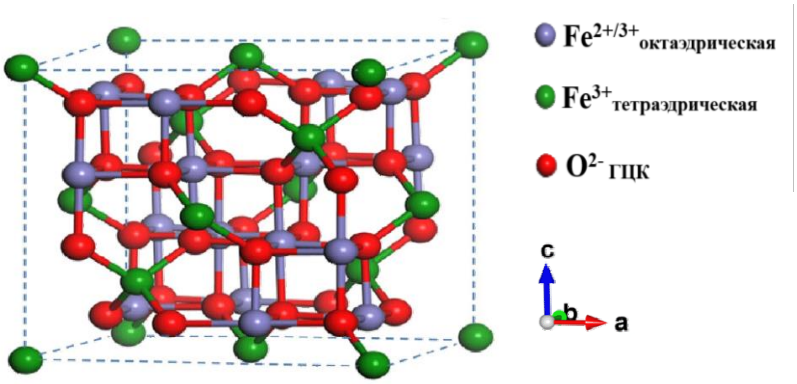


Рисунок 2 – Схематическое изображение элементарной ячейки Fe_3O_4 в кубической конфигурации пространственной группы $Fd\bar{3}m$

Исследование температурных зависимостей удельной намагниченности осуществлено пондеромоторным методом в магнитном поле 0,86 Тл (8,6 кЭ) в интервале температур 80–700 К. Полученные температурные зависимости удельной намагниченности допированного самарием магнетита представлены на рисунке 3.

Магнетит Fe_3O_4 – феррит с кубической гранецентрированной решеткой кислорода, содержащей по одному иону Fe^{2+} и два иона Fe^{3+} на молекулу. В структуре формируются две антипараллельные магнитные подрешетки: магнитные моменты Fe^{3+} компенсируются, а суммарная спонтанная намагниченность определяется ионами Fe^{2+}. При достижении температуры Кюри T_C тепловое движение разрушает магнитный порядок, превращая ферромагнетик в парамагнетик. Чем сильнее обменное взаимодействие, тем выше T_C. Для объемного магнетита T_C 850 К [11], а удельная намагниченность составляет 54,9 А·м²·кг$^{-1}$.

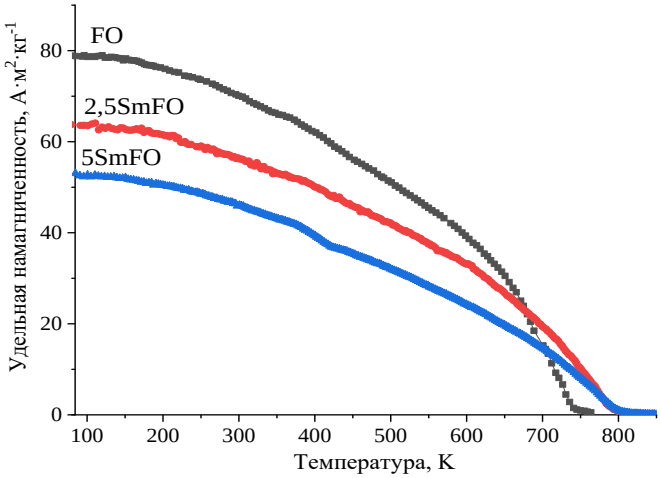


Рисунок 3 – Температурные зависимости удельной намагниченности допированного самарием магнетита

В нашем случае наночастицы Fe_3O_4 имеют удельную намагниченность 78,9 А·м²·кг$^{-1}$ при 80 К и T_C = 740 К. При допировании самарием наблюдается рост температуры Кюри до T_C = 800 К на фоне снижения удельной намагниченности до 53,1 А·м²·кг$^{-1}$, для наночастиц Sm:Fe_3O_4 с концентрацией Sm 5 ат.%[3].

Список литературы

1. Verwey, E. J. W. Electronic Conduction of Magnetite (Fe_3O_4) and its Transition Point at Low Temperatures / E. J. W. Verwey // Nature. – 1939. – Vol. 144, Iss. 3642. – P. 327–328.

2. Белов, К. П. Электронные процессы в магнетите («Загадки магнетита») / К. П. Белов // Успехи физических наук. – 1993. – Т.163, № 5. – С. 53–66.

3. Atomic-scale structure and properties of highly stable antiphase boundary defects in Fe_3O_4 / K. P. McKenna [et al.] // Nat. Commun. – 2014. – Vol. 5. – Art. 5740.

[3]Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (грант № Т23РНФМ-023).

4. Controlled PEGylation of Monodisperse Fe_3O_4 Nanoparticles for Reduced Non-Specific Uptake by Macrophage Cells / J. Xie [et al.] // Adv. Mater. – 2007. –Vol. 19, Iss. 20. – P. 3163–3166.

5. Large magnetoresistance in tunnel junctions with an iron oxide electrode / P. Seneor [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 1999. – Vol. 74. – P. 4017–4019.

6. The Iron Oxides Strike Back: From Biomedical Applications to Energy Storage Devices and Photoelectrochemical Water Splitting / P.Tartaj [et al.] // Adv. Mater. – 2011. – Vol. 23, Iss. 44. – P. 5243–5249.

7. Laha, S. S. Structural origin for low-temperature relaxation features in magnetic nanoparticles / S. S. Laha, R. Regmi, G. Lawes // J Phys D: Appl Phys. –2013. – Vol.46. – Art.325004.

8. Ferroic ordering and charge-spin-lattice order coupling in Gd-doped Fe_3O_4 nanoparticles relaxor multiferroic system / S. S. Laha [et al.] // J. of the Amer. Ceram. Soc. – 2017. – Vol. 100, Iss. 4. – P. 1534–1541.

9. T1–T2 dual-modal MRI of brain gliomas using PEGylated Gd-doped iron oxide nanoparticles / N. Xiao [et al.] // J. Colloid Interface Sci. – 2014. – Vol. 417. – P. 159–165.

10. Magnetically retrievable Ce-doped Fe_3O_4 nanoparticles as scaffolds for the removal of azo dyes / A. Aashima [et al.] // RSC Advances. – 2019. – Vol. 9, Iss. 40. – P. 23129–23141.

11. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства / С. П. Губин [и др.] // Успехи химии. – 2005. – № 74(6). – С. 539–574.

Nanoscale magnetite Fe_3O_4 doped with samarium was synthesized using the coprecipitation method. X-ray diffraction analysis revealed that all diffraction peaks of the obtained samples are indexed within the inverse spinel structure (space group $Fd\bar{3}m$). Upon doping, Sm^{3+} ions replace Fe^{3+} ions in octahedral positions. The decrease in the lattice parameter (a) is explained by lattice deformation. The average crystallite size was calculated and varied from 11.5 to 15.7 nm for the obtained Sm:Fe_3O_4 nanoparticles with Sm concentrations from 1 at.% to 5 at.%. The temperature dependences of the specific magnetization were studied using the ponderomotive method in a magnetic field of 8.6 kOe in the temperature range of 80–700 K. Fe_3O_4 nanoparticles have a specific magnetization of 78.9 $A \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$ at 80 K and T_C = 740 K. When doped with samarium, an increase in TC = 800 K is observed against the background of a decrease in the specific magnetization to 53.1 $A \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$ for a sample of 5 at.% samarium.

Дубинин Никита Андреевич, аспирант, младший научный сотрудник Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, nikitka.dubinin@gmail.com.

Научный руководитель – *Желудкевич Александр Ларионович*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, zheludkevich27@gmail.com.

Римский Григорий Семенович, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, grigorij.rimskij@mail.ru.

УДК 544.22

Н. А. ДУБИНИН, Г. С. РИМСКИЙ, А. Л. ЖЕЛУДКЕВИЧ

СИНТЕЗ НИКЕЛЬ-ЦИНКОВЫХ ФЕРРИТОВ-ШПИНЕЛЕЙ С ЗАМЕЩЕНИЕМ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА ИОНАМИ ГАДОЛИНИЯ И ИЗУЧЕНИЕ ИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ

Выполнен синтез никель-цинковых ферритов-шпинелей с замещением ионов железа ионами гадолиния золь-гель методом с последующим термическим синтезом. Исследование кристаллической структуры проведено методом рентгенофазового анализа при комнатной температуре в Cu-Kα-излучении в диапазоне углов $20° \leq 2\theta \leq 90°$. Все дифракционные пики на рентгеновских дифракционных спектрах соответствуют кубической структуре шпинели с пространственной группой $Fd\bar{3}m$ без явных признаков пиков примесных фаз. Изучение полевых зависимостей удельной намагниченности выполнено на вибрационном магнитометре при температурах 4 K и 290 K в магнитных полях ±3 Тл. Обнаружено, что при температуре 4 K все образцы $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_{2-x}Gd_xO_4$ демонстрируют ферромагнитную природу. Замещение ионов железа ионами редкоземельного гадолиния ослабляет обменные взаимодействия Fe^{3+}–O^{2-}–Fe^{3+}. При увеличении замещения ионов железа ионами Gd^{3+} наблюдается тенденция к небольшому увеличению коэрцитивной силы и снижению остаточной намагниченности, что связано с усилением магнитной анизотропии и дефектами кристаллической решётки, вызванными замещением.

Целью работы было синтезировать наноразмерные ферриты системы $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_{2-x}Gd_xO_4$ и исследовать влияние замещения ионов Fe ионами Gd на кристаллическую структуру и магнитные свойства.

Исходные элементы, использованные для получения образцов никель-цинковых ферритов-шпинелей, имели следующие характеристики по чистоте: железа (III) нитрат нонагидрат ($Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) и цинка нитрат гексагидрат ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) – 99 %, никеля (II) нитрат гексагидрат ($Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) – 99,95 %, гадолиния (III) нитрат гексагидрат ($Gd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$) – 99,99 %. Рассчитанные количества нитратов смешивались в дистиллированной воде до получения гомогенного раствора при постоянном перемешивании. После чего в раствор засыпали лимонную кислоту с мольным соотношением нитратов 2:1. Уровень pH раствора поддерживался на

уровне 7 с помощью 35 %-го раствора аммиака. Температуру раствора при постоянном перемешивании повышали до 80 °С и выдерживали 8 часов до образования геля. Затем температура повышалась до 140 °С до тех пор, пока не произойдет самовозгорание. Прогоревший порошок измельчали в яшмовой ступке. Полученные порошки спекали при температуре 400 °С в течение 4 часов. В результате получали порошки никель-цинковых ферритов-шпинелей красноватого цвета. На рисунке 1 изображены этапы по получению наноразмерных ферритов системы $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_{2-x}Gd_xO_4$.

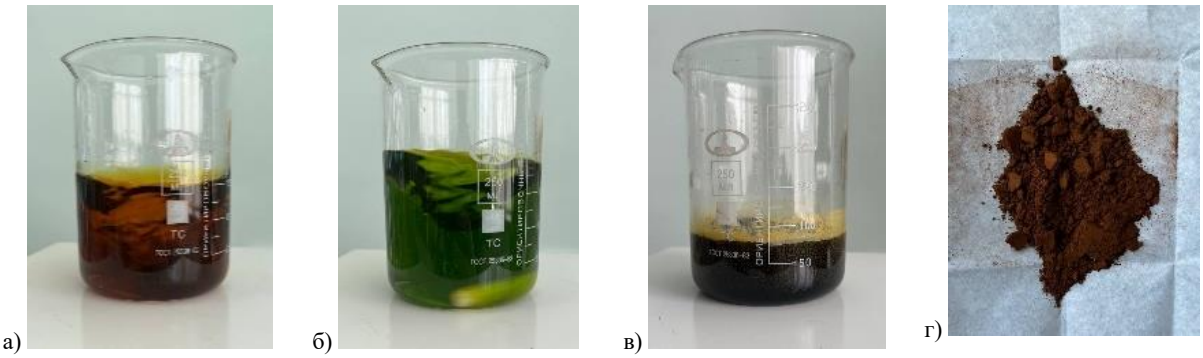


Рисунок 1 – а) этап смешивания солей нитратов; б) этап добавления аммиака до pH= 7; в) образовавшийся гель; г) готовый образец ферритов системы $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_{2-x}Gd_xO_4$

Исследование кристаллической структуры никель-цинковых ферритов-шпинелей при замещении ионов железа ионами гадолиния проведено методом рентгенофазового анализа при комнатной температуре в Cu-Kα-излучении в диапазоне углов $20° \leq 2\theta \leq 90°$. Получение рентгенограмм осуществлялось с шагом сканирования 0,02° и временем экспозиции 3 с. На рисунках 2 и 3 показаны спектры порошковой рентгеновской дифракции исходного соединения $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ (рисунок 2) и образцов феррита системы $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_{2-x}Gd_xO_4$ (рисунок 3).

Все дифракционные пики на рентгеновских дифракционных спектрах соответствуют кубической структуре шпинели с пространственной группой $Fd\bar{3}m$ без явных признаков пиков примесных фаз. Наблюдаемые дифракционные пики отнесены к плоскостям отражения (111), (220), (311), (222), (400), (422), (511) и (440). Для изучения влияния замещения Gd^{3+} на структурные параметры был проведен подробный структурный анализ всех образцов с использованием программного обеспечения FullProf. Уточнение параметров кристаллической ячейки проводилось с учетом некоторых фиксированных параметров, таких как углы α=β=γ=90° для структуры ГЦК, в то время как другие параметры, такие как фон, постоянные решетки, заполнения и масштабные коэффициенты, принимались в качестве свободных параметров. Вклад прибора в уширение пиков не учитывался. Рассчитанные структурные параметры, такие как параметр кристаллической решетки, объем элементарной ячейки, рентгеновской плотности и факторов недостоверности, показаны в таблице 1.

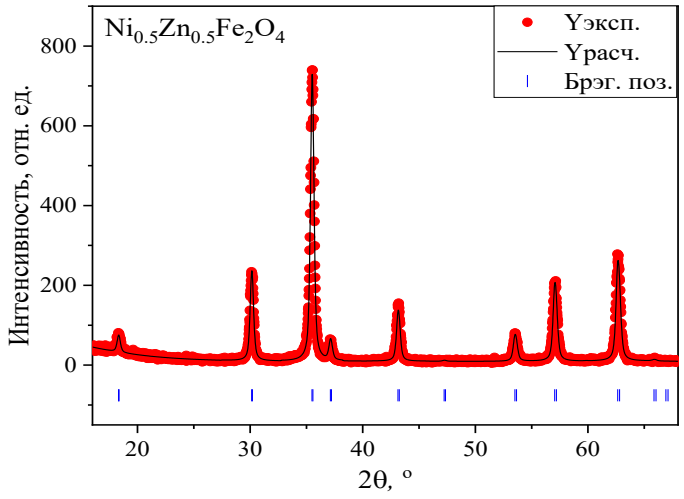


Рисунок 2 – Рентгенограмма исходного феррита $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$.

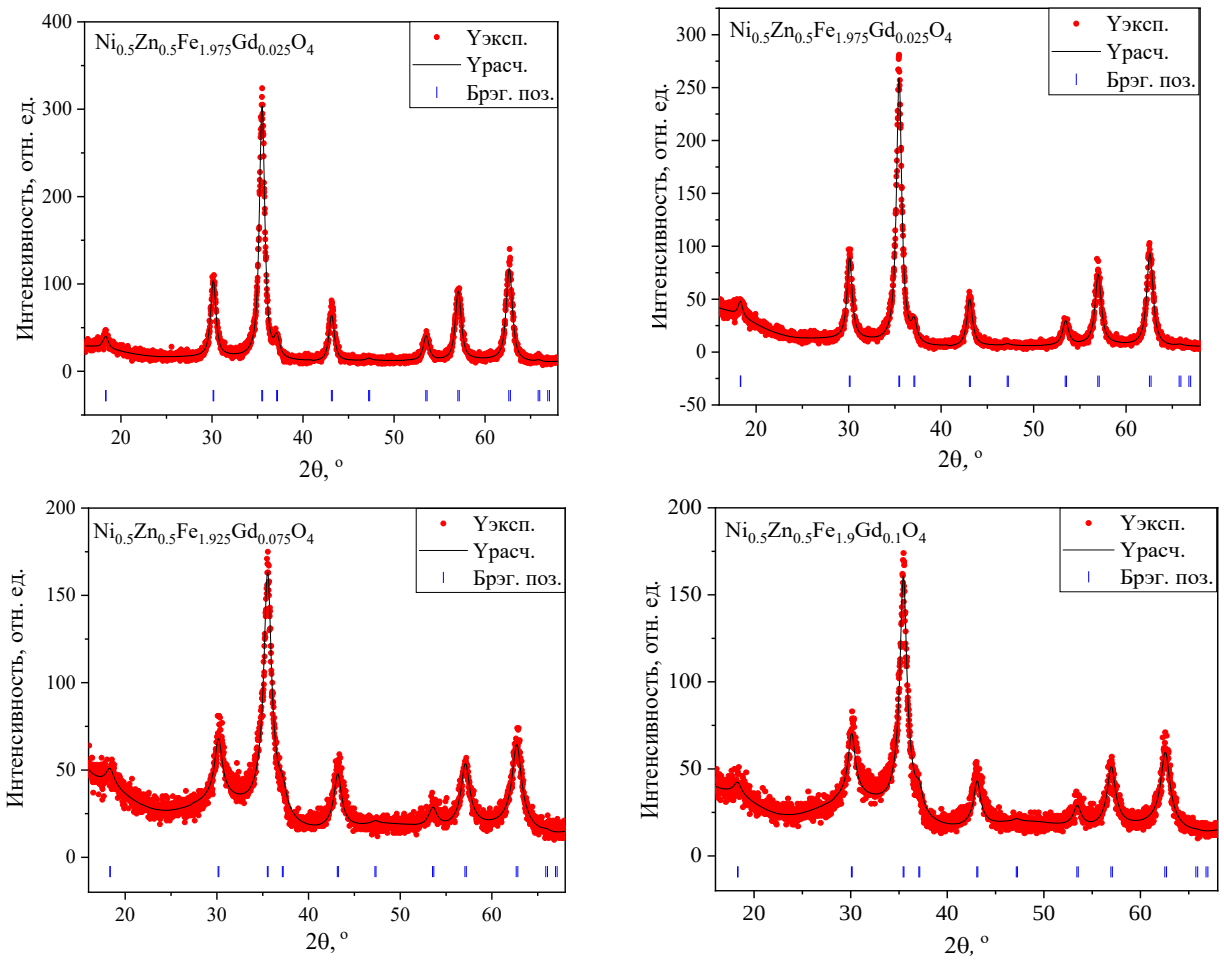


Рисунок 3 – Рентгенограммы образцов феррита с замещением ионов железа ионами гадолиния $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_{2-x}Gd_xO_4$

Таблица 1 – Значения параметра кристаллической ячейки *a*, объёма *V* и рентгеновской плотности ρ_{XRD}, а также факторы недостоверности для образцов никель-цинковых ферритов-шпинелей при замещении ионов железа ионами гадолиния

Образцы	***a*, Å**	***V*, Å^3**	**ρ_{XRD}, г/см^3**	**R_{wp}**	**R_{exp}**	**χ^2**
$Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$	8,3827	589,056	5,36	5,34	3,03	0,25337
$Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_{1,975}Gd_{0,025}O_4$	8,3864	589,832	5,41	3,96	3,27	0,25123
$Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_{1,95}Gd_{0,05}O_4$	8,3889	590,362	5,46	5,27	4,65	0,25107
$Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_{1,925}Gd_{0,075}O_4$	8,3901	590,607	5,52	4,88	5,56	0,24995
$Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_{1,9}Gd_{0,1}O_4$	8,3932	591,270	5,57	5,7	7,53	0,24885

Изучение полевых зависимостей удельной намагниченности выполнено на вибрационном магнитометре при температурах 4 К и 290 К в магнитных полях ±3 Тл. Измеряемый образец в виде порошка помещался в желатиновую капсулу, которая с помощью пластмассового (полипропиленового) держателя закреплялась на конце вибратора и устанавливалась между полюсами сверхпроводящего электромагнита соленоидального типа. Точность определения магнитного момента образца составляла не менее 10^{-2} А·м^2·кг$^{-1}$, точность определения температуры – не менее 0,5 К.

Типичные полевые зависимости удельной намагниченности при температуре 4 и 290 К на примере ферритов системы $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_{2-x}Gd_xO_4$ представлены на рисунках 4*а*, 4*б*.

Обнаружено, что при температуре 4 К все образцы $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_{2-x}Gd_xO_4$ демонстрируют ферромагнитную природу. Замещение ионов железа ионами редкоземельных элементов ослабляет обменные взаимодействия Fe^{3+}–O^{2-}–Fe^{3+}. Величина намагниченность насыщения с увеличением концентрации замещения ионами Gd^{3+} уменьшается для всех составов. Максимальное значение насыщения наблюдается для исходного соединения $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$: 128 ему/г при 4 К и 67,9 ему/г при 300 К.

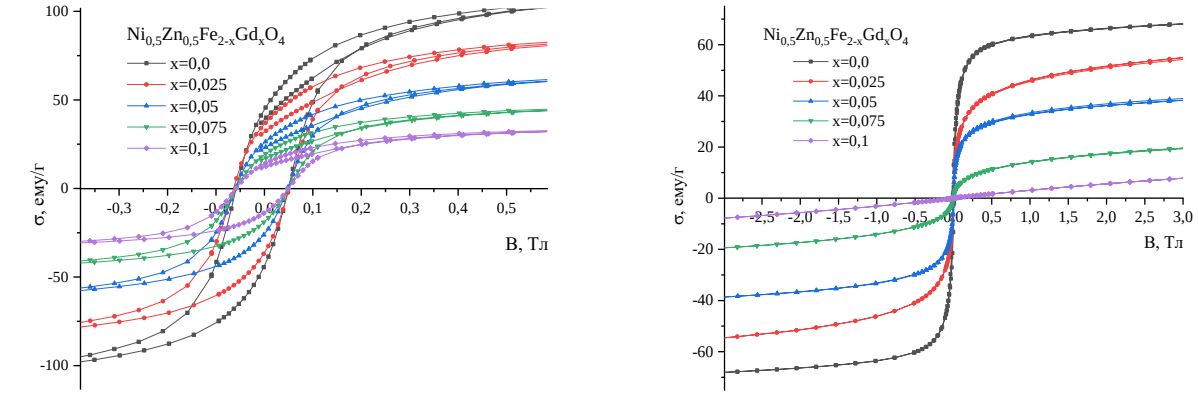


Рисунок 4 – Полевые зависимости удельной намагниченности ферритов систем $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_{2-x}Gd_xO_4$ при температурах: а) 4 K; б) 290 K

Полевые зависимости намагниченности для всех образцов при температуре 4 K демонстрируют типичную ферритовую гистерезисную петлю с небольшим значением коэрцитивной силы. При увеличении замещения ионов железа ионами Gd^{3+} наблюдается тенденция к небольшому увеличению коэрцитивной силы и снижению остаточной намагниченности, что связано с усилением магнитной анизотропии и дефектами кристаллической решётки, вызванными замещением [1]. Поскольку коэрцитивная сила является мерой магнитокристаллической анизотропии, малые частицы с нулевой петлей гистерезиса демонстрируют низкую анизотропию и не блокируются. Кроме того, при более высоких температурах тепловая энергия превышает энергию анизотропии, что приводит к нулевому значению коэрцитивной силы.

Намагниченность при 300 K демонстрирует магнитомягкое поведение, что проявляется в полном отсутствии гистерезиса и остаточной удельной намагниченности. Это указывает на малую величину магнитной анизотропии, когда тепловой энергии при комнатной температуре достаточно для полной разупорядоченности магнитных моментов после снятия внешнего поля.

Отсутствие выхода на насыщение в ферритах при 4 K и 290 K может указывать на возможное существование сильных межкластерных антиферромагнитных взаимодействий, смешанных с ферромагнитными внутри кластеров [2]. Ненасыщенная намагниченность может быть также связана с присутствием малых наночастиц, имеющих морфологию типа, ядро-оболочка, с ферримагнитно расположенным ядром и поверхностным слоем, подобным спиновому стеклу[4].

Список литературы

1. Kesavamoorthi, R. / Substitution effects on rare-earth ions doped nickel zinc ferrite nanoparticles / R. Kesavamoorthi, C. R. Raja // J. Supercond. Nov. Magnetism. – 2017. – Vol. 30. – P. 1207–1212.

2. The influence of ions doping on the structural, dielectric and magnetic properties of Ni-Zn ferrites / G. S. Luo [et al.] // J. Mater. Sci. Mater. Electron. – 2017. – Vol. 28. – P. 7259–7263.

Nickel-zinc spinel ferrites were synthesized by substituting gadolinium ions for iron ions using a sol-gel method followed by thermal synthesis. The crystal structure was studied by X-ray diffraction at room temperature using Cu-Kα radiation in the angular range of $20° \leq 2\theta \leq 90$. All diffraction peaks in the X-ray diffraction spectra correspond to the cubic spinel structure with the $Fd\bar{3}m$ space group, with no obvious signs of impurity phase peaks. The field dependences of the specific magnetization were studied using a vibrating magnetometer at temperatures of 4 K and 290 K in magnetic fields of ±3 T. It was found that at a temperature of 4 K, all $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_{2-x}Gd_xO_4$ samples exhibit a ferromagnetic nature. Substitution of rare-earth gadolinium ions for iron ions weakens the $Fe^{3+} – O_2 – Fe^{3+}$ exchange interactions. With increasing substitution of Gd^{3+} ions for iron ions, a slight increase in coercivity and a decrease in remanent magnetization are observed, which is associated with increased magnetic anisotropy and crystal lattice defects caused by the substitution.

Дубинин Никита Андреевич, аспирант, младший научный сотрудник, Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, nikitka.dubinin@gmail.com.

Научный руководитель – *Желудкевич Александр Ларионович*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь zheludkevich27@gmail.com.

Римский Григорий Семенович, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, grigorij.rimskij@mail.ru.

[4]Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (грант № Т23РНФМ-023).

УДК 535.37

А. С. ДУБРОВЩИК

ТУШЕНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ СТИРИЛОВОГО ПРОИЗВОДНОГО БЕНЗОТИАЗОЛИЯ ИОНАМИ ЙОДА

Статья посвящена исследованию процессов тушения флуоресценции молекулярных роторов – особых флуоресцентных зондов, чувствительных к вязкости среды. Показано, что тушение стирилового производного бензотиазолия ионами йода описывается динамическим механизмом, о чем свидетельствует линейная зависимость обратного квантового выхода флуоресценции от концентрации тушителя.

Молекулярные роторы достаточно важны как для медицины (изучение флуоресценции молекулярных роторов, внедренных в живые клетки, оценка вязкости биологических сред), так и для динамических процессов отслеживания агрегации белков. Молекулярные роторы способны дать динамические данные в естественной клеточной среде, помочь исследовать некоторые взаимодействия на молекулярном уровне. Они также являются отличными индикаторами температуры. Эти исследование может помочь не только в прикладном применение, но и для более научного понимание. Все перечисленные применения молекулярных роторов имеют не только важное прикладное значение, но также позволяют расширить наши представления о фундаментальным процессах, происходящих на молекулярном уровне.

За последние десятилетия флуоресцентные молекулярные зонды, называемые молекулярными роторами, оказались чрезвычайно полезными для исследования вязкости, агрегации белков и основных молекулярных взаимодействий в биологически значимых условиях. Открытие функции, подобной молекулярному ротору, относится к 1980 году, когда *Лоу и др*. продемонстрировали, что флуоресцентные производные малонотитрила донор-акцептор демонстрируют более высокую интенсивность флуоресценции при растворении в растворителях с увеличивающейся вязкостью. Такое поведение было приписано конкуренции между нерадиационными и радиационными путями распада. Внутримолекулярная скручивания или вращение приводит к нерадиационного распада из возбужденного состояния обратно в основное состояние. Вязкая среда замедляет это вращение или скручивание, ограничение доступа к этой нерадиационного распада пути. Это приводит к увеличению квантового выхода флуоресценции.

Термин «молекулярный ротор» относится к соединению молекулы, состоящие из двух и более фрагментов способные вращаться друг относительно друга. Одну часть с большим моментом инерции называют статором, а другую с меньшим ротором. Различаются разные классификации молекулярных роторов, в частности в растворах, парах, твёрдой фазу, закреплённые на поверхности. Внутримолекулярное вращение осуществляется под внешними воздействиями: свет, электрическое поле и т. д.

Также существует группа соединений молекулярных роторов, в которых при электроне возбуждении способны переходить в скрученное состояния в результате переноса заряда и последующим вращение одной части молекулы относительно другой. Квантовый выход флуоресценции осуществляется в зависимости от вязкости.

Молекулярные роторы представляют собой зонды вязкости на основе флуоресценции.В последние время для определения вязкости среды используется молекулярные роторы, так как их флуоресцентная способность зависит от вязкости окружения. По сравнению с другими методами (FRAP – Fluorescence Recovery After Photobleaching, Восстановление флуоресценции после фотообесцвечивания) он имеет ряд преимуществ особенно для их применения в качестве зондов локальной вязкости.

Объектом исследования является органический флуоресцентный краситель, представляющий собой стироловое производное бензотиазолия. Химическая структура представлена на рисунке 1. В качестве растворителей использовали бидистиллированную воду. Источником ионов йода являлась соль йодид калия, которую добавляли к исследуемому раствору красителя.

Спектры поглощения растворов красителей регистрировали на спектрофотометре Specord 200 (Carl Zeiss, Германия). Спектры стационарной флуоресценции растворов измеряли на спектрофлуориметре СМ 2203 (Solar, Беларусь). В данном спектрофлуориметре измерения спектров флуоресценции осуществляются в L-формате, т. е. под углом 90° к направлению возбуждающего света.

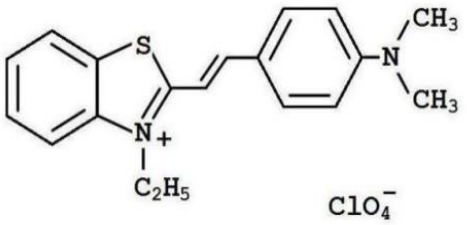


Рисунок 1 – Химическая структурная формула стирилового производного бинзотизолия

Были получены спектры флуоресценции. Далее был рассчитан квантовый выход флуоресценции.Измерение квантового выхода $Ф$ флуоресценции красителей проводили сравнительным методом Уильямса [4]. Согласно данному методу, спектры поглощения и флуоресценции соединений в различных растворителях измеряли для 5-ти и более концентраций (в пределах оптической плотности от 0,05 до 0,12). Строили зависимость интегральной интенсивности I флуоресценции от оптической плотности D на длине волны возбуждения 500 нм. Экспериментальные точки на графике зависимости $I(D)$ аппроксимировали линейной функцией с помощью метода наименьших квадратов и определяли угловой коэффициент B этой функции. Все описанные измерения выполняли для исследуемых соединений и для некоторого стандартного соединения, квантовый выход которого в используемом растворителе известен. При этом квантовый выход исследуемого соединения $Ф$ вычисляется через квантовый выход стандартного соединения $Ф_{ст}$ согласно выражению.

$$Ф = Ф_{ст}\frac{B}{ст}\left(\frac{n}{n_{ст}}\right)^2$$

В качестве стандартного соединения для измерения квантового выхода использовали родамин 6Ж в этаноле, квантовый выход которого равен $Ф_{ст} = 0{,}98$ [3].

Вычисления квантового выхода флуоресценции исследуемого соединения в водном растворе с различным содержанием йода производили согласно выражению

$$Ф = Ф_0\frac{S_c}{S_0}\frac{D_c}{D_0}\left(\frac{n_c}{n_0}\right)^2$$

где $Ф$ и $Ф_0$ – искомое значение квантового выхода для раствора с процентным содержанием йода C % и известное значение квантового выхода соединения в растворе при отсутствии йода; S_c и S_0 – площади под спектром флуоресценции соединения для соответствующих растворов; D_C и D_0 – оптические плотности на длине волны возбуждения для соответствующих растворов; n_c и n_0 – показатели преломления растворов.

После получение квантового выход нужно качественно оценить, какой механизм тушения проявляется в случае наличия воды в растворе, необходимо построить график в координатах Штерна-Фольмера, а именно зависимость отношения $Ф_0/Ф$ от концентрации C воды. В результате построения получили график, представленный на рисунке 2.

Из вида полученной зависимости можно сделать вывод, что тушение флуоресценции йода можетпроходить путем динамического тушения, когда образуется комплекс. В случае динамического тушения тушитель должен диффундировать к флуорофору в течение времени нахождения в возбуждённом состояние. В результате флуорофора возвращается в исходные состояния без излучения фотона. Динамическое тушение флуоресценции описывает уравнения Штерна-Фольмера:

$$\frac{F_0}{F} = 1 + k_q\tau_0|Q| = 1 + K_{дин}|Q|$$

где F_0 и F – интенсивность флуоресценции в отсутствие и присутствие тушителя; k_q бимолекулярная константа тушителя; τ_0 – время затухания флуоресценции в отсутствие тушителя; $|Q|$ –концентрация тушителя; $K_{дин}$ – штерн-фольмеровская константа тушения. Прямо линейная зависимость обычно показывает на существование в растворе одного типа флуорофоров, однако доступных для тушения. Для вывода константы тушение был построен график в координатах Штерна-Фольмера (рисунок 2). График был аппроксимирован и была выведена константа тушения $K_{дин} = 24{,}044 \pm 0{,}6439$ (л/моль).

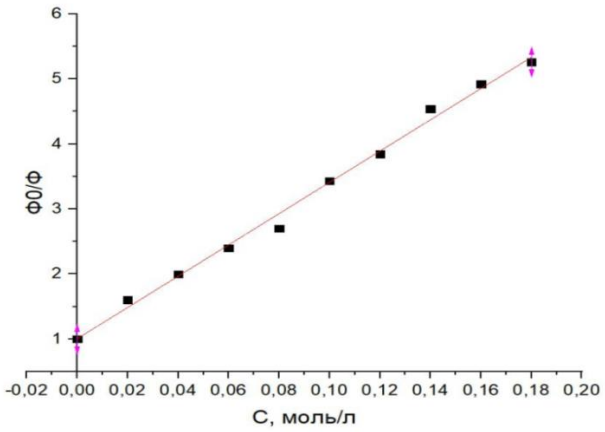


Рисунок 2 – Зависимость величины $Ф_0/Ф$ от концентрации йода

Список литературы

1. Лакович, Дж. Основы флуоресцентной спектроскопии / Дж. Лакович ; пер. с англ. – М. : Мир, 1986. – С. 261–294.
2. Ужинов, С. Н. Молекулярные роторы – люминесцентные сенсоры локальной вязкости и вязкого течения в растворах и организованных системах / С. Н. Ужинов, Л. Н. Иванов, Р. А. Мельников // Успехи химии. – 2011. – Т. 80, № 12. – С. 1231–1247.
3. Ханг, Дж. Fluorescence spectra of Rhodamine 6G for high fluence excitation laser radiation / Дж. Ханг, Дж. Кастильо, А. Маркано-Олайзола // Journal of Luminescence. – 2003. – Т. 101. – С. 263–268.
4. Уильямс, А. Т. Р. Relative fluorescence quantum yield using a computer-controlled luminescence spectrometer / А. Т. Р. Уильямс, С. А. Уинфелд, Дж. Н. Миллер // Analyst. – 1983. – Т. 108. – С. 1067.

Дубровщик Александр Сергеевич, студент, 4 курс физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, alex14122004@mail.ru.

Научный руководитель – *Лавыш Андрей Валентинович*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, Lavysh_AV@grsu.by.

УДК 538.951

К. А. ЖУК

КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ СПЛАВОВ МАГНИЯ МЛ-5, ПОЛУЧЕННЫХ ЛИТЬЁМ И КОМПАКТИРОВАНИЕМ СТРУЖКИ БЕЗ НАГРЕВА

Исследованы образцы сплава магния МЛ-5, полученные литьем из стружки, и образцы, полученные компактированием стружки без нагрева. Обнаружено, что коорозионная стойкость образцов, полученных литьем, практически не отличается по коррозионной стойкости от образцов, полученных компактированием стружки без нагрева. Полученные результаты указывают на возможность изготовления деталей из сплава МЛ-5, используя отходы производства, что представляет экономический и практический интерес.

Сплав магния МЛ-5 – это распространенный литейный сплав, состоящий из: Mg-90 %, Al-9 %, Zn-1 %. Сплав активно используется в машиностроении, авиастроении, приборостроении, в том числе в агрессивных средах. Следует отметить, что магний – один из самых легких металлов, что позволяет использовать его во многих областях промышленности для облегчения конструкции.

Для снижения себистоимости изделий из магния актуальным является разработка методов использования магниевого вторсырья. Поэтому целью данной работы было исследовать образцы сплава магния МЛ-5, полученные литьем из стружки без нагрева заготовок и образцы, полученные компактированием стружки также без нагрева заготовок на предмет коррозионной стойкости к раствору NaCl.

Задачей было определить, влияет ли температура режущего инструмента на коррозионную стойкость образцов сплава магния ML5, полученные литьем из стружки и образцы, полученные компактированием стружки также без нагрева. Для решения данной задачи цилиндрические заготовки, полученные литьем из стружки ML5 и образцы, полученные компактированием стружки также без нагрева длиной 60 мм и диаметром 12 мм разрезались на три равные части по 20 мм каждая (рисунок 1): начало, центр и конец заготовки.

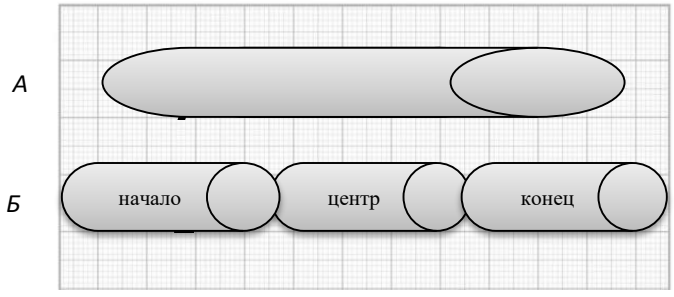
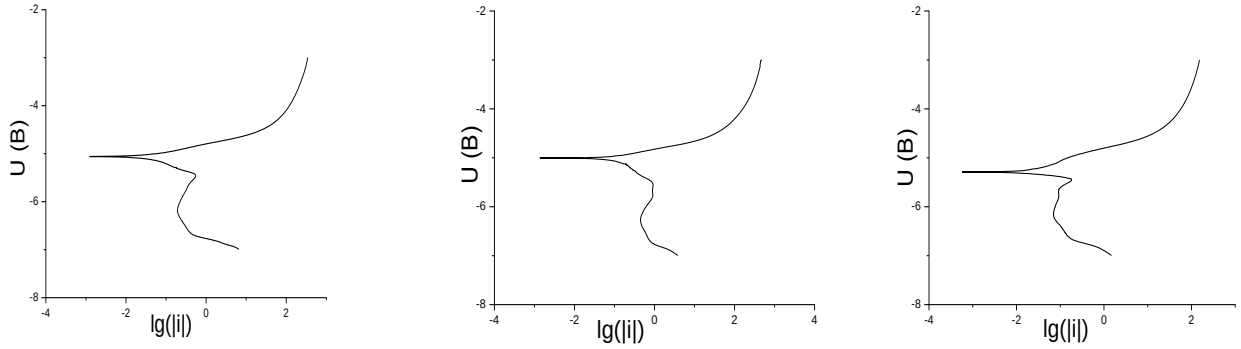


Рисунок 1 – Схема получения контрольных образцов.
А – магниевый цилиндр, полученный после пресовки, Б – разрезанные образцы

Исследование коррозионной стойкости образцов производилось на установке «POTENTIOSTAT-GALVANOSTAT PS-30» в 3 %-м растворе NaCl. Исследование проводилось на следующих настройках: стартовое значение напряжение в –3000 мВ, конечное значение напряжение 1000 мВ, скорость развертки в 1,65 мВ/с. При заданных условиях продолжительность каждого измерения занимало 40 минут. На ри-

сунках 1 и 2 представлены диаграммы Эванса, полученные при исследовании всех трех частей заготовки (начало, центр и конец) из сплава магния МЛ-5, полученные литьем из стружки без нагрева заготовок и образцы, полученные компактированием стружки также без нагрева.

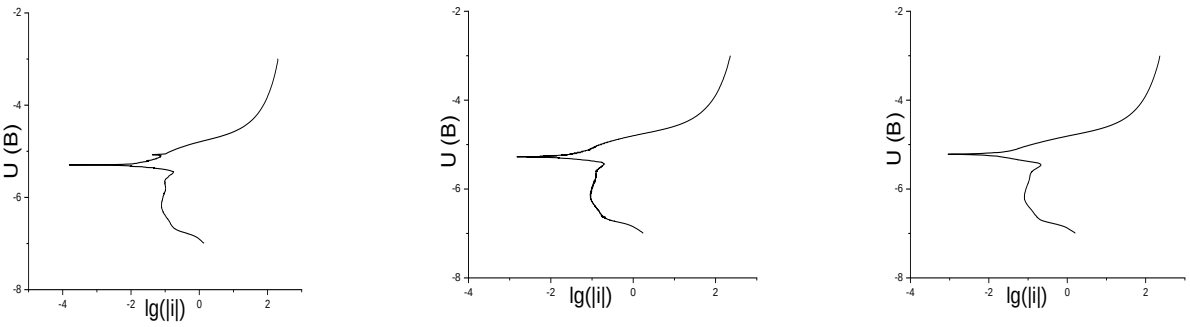


1 *2* *3*

1 – начало заготовки, 2 – центр; 3 – конец

Рисунок 2 – Диграммы Эванса литого сплава ML-5 из стружки

1 *2* *3*



1 – начало заготовки, 2 – центр, 3 – конец

Рисунок 3 – Диграммы Эванса сплава ML-5, полученнный компактированием стружки без нагрева

Анализ диаграмм Эванса для литых сплавов МЛ 5 из стружки, представленных на рисунке 2 и сплавов, полученных компактированием стружки без нагрева, представленных на рисунке 3, одинаковые по виду и по форме, что указывает на то, что процесс коррозии протекает одинаково в обоих случаях. Это означает, что образцы, полученные из отходов производтвапрактически не отличаюся по коррозионной стойкости от «чистого» образца. Данные из исследованная доказывают, что при исспользовании более дешевых образцов (образцов полученных из отходов производства), при повторной выплавке получаются образцы достойного качества, что положительно скажется на стоимости изделий из данного сплава.

Обнаружено, что коорозионная стойкость образцов, полученных литьем ,практически, не отличается по коррозионной стойкости от образцов, полученных компактированием стружки без нагрева. Так, в частности, ток коррозии для первой части загтовки (начало) сплава, полученного литьем из стружки, состаляет 0,2540 А/м^2, а для сплава, полученного компактированием стружки – 0,2576 А/м^2.

Показано, что ток коррозии в различных частях заготовки изменяется в пределах 5 %. Так, в частности, у образцов из стружки, полученных литьем, в первой части заготовки (начало) коррозионная стойкость на 4,2% выше, чем у центральной части и на 4,65 % выше, чем в конце заготовки.При этом, отличие тока коррозии у образца, полученного из стружки и образца, полученного из стружки путём компатирования, составляет в среднем 1,4% в начале, 0,7% в середине и 0,3% конце в пользу образца из стружки. У образцов, полученных методом компатированния стружки, коррозионная стойкость в первой части на 3,55% выше, чем у центральной части и на 3,6% выше, чем в для третьей части заготовки (конец). Обнаруженная закономерность объясняется в первую очередь с тем, что образец, полученный в начале заготовки, более короткое время провёл в условиях повышенного давления, что приводит к изменению микроструктуры.

Полученные результаты указывают на возможность изготовления деталей из сплава МЛ-5, используя отходы производства, что представляет экономический и практический интерес.

Список литературы

1. Воздействие мощного импульсного пучка ионов углерода на морфологию и элементный состав поверхностного слоя магниевого сплава / Н. Г. Валько, Н. А. Павлова, А. Е. Лигачев [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2025. – № 6. – С. 18–22.
2. Методы коррозионных испытаний. Общие требования : ГОСТ 9.905–82. – Введ. 01.07.83. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 5 с.
3. Единая система защиты от корозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний : ГОСТ 9.308-85. – Введ. 01.01.87. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 21 с.
4. Лебедева, М. И. Практикум Аналитической химии / М. И. Лебедева. – Тамбов : ТГТУ, 2002. – 80 с.

Samples of magnesium alloy ML-5, obtained by casting from shavings, and samples obtained by compacting shavings without heating were studied. It was found that the corrosion resistance of the samples obtained by casting is practically the same as the corrosion resistance of the samples obtained by compacting shavings without heating. These results indicate that it is possible to manufacture parts from ML-5 alloy using production waste, which is of economic and practical interest.

Жук Кирилл Александрович, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, kirillzuk039@gmail.com.

Научный руководитель – *Валько Наталья Георгиевна*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, N.Valko@grsu.by.

УДК 543.3:543.4/5: 664

А. А. ЗУБРИЦКИЙ

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА БИООБЪЕКТОВ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА

Обоснована актуальность мониторинга микроэлементного состава хлебобулочных изделий для контроля их пищевой ценности. Проведена пробоподготовка биообъектов (выжимок кизила, яблока и тыквы). Проведен анализ микро- и макроэлементного состава полученной фитокомпозиции с расчетом интегрального скора. Экспериментально апробировано внесение фитокомпозиции в рецептуру хлебобулочных изделий. Определена оптимальная дозировка (10 % к массе муки).

Хлебобулочные изделия являются краеугольным камнем рациона питания человека, выступая в качестве основного поставщика энергии, пищевых волокон, витаминов и микроэлементов. Микроэлементный профиль хлебобулочных изделий детерминируется качеством исходного сырья (муки, воды, вспомогательных веществ) и особенностями технологических процессов, а также может коррелировать с экологическим состоянием региона культивации зерновых. Присутствие эссенциальных элементов, таких как железо, цинк, селен, медь и марганец, определяет нутритивную ценность продукта, тогда как наличие токсичных тяжелых металлов (свинца, кадмия, мышьяка, ртути) представляет потенциальную угрозу для здоровья потребителей. Следовательно, строгий мониторинг микроэлементного состава хлебобулочных изделий на всех этапах производственной цепочки является приоритетной задачей пищевой индустрии, направленной на обеспечение безопасности и качества продукции. Для эффективного решения данной задачи необходимы высокоточные, экспрессные и надежные аналитические методики. Среди них метод (РФА) занимает особое место.

Особенностью РФА от других физических методов анализа, является его высокая помехоустойчивость, он не требует сложной пробоподготовки, не изменяет химический состав, дает возможность анализировать один и тот же образец многократно. Так же можно отметить его оперативность и малую себестоимость исследования анализируемой пробы.

Подготовка пробы образцов кизила, тыквы и яблока.

Выжимки тыквы и яблок высушивали в сушильном шкафу до влажности 10%, а выжимки кизила до 15%.

Влажность продукта определяли согласно ГОСТ 28561-90. После достижения необходимой влажности продукт измельчали. Измельчение продукта проводили в ножевой мельнице до фракций 160–0 мкм.

Результаты микро- и макроэлементного состава фитопорошков кизила, яблока и тыквы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Состав микро- и макроэлементов порошков кизила, яблока и тыквы (мкг/г продукта)

Элемент	Кизил	Тыква	Яблоко
Макроэлементы:			
Калий	7455,81±161,45	10345,19±239,48	6849,53±193,84
Кальций	786,26±45,095	1798,91±85,89	805,17±57,16
Сера	2036,94±344,30	1137,77±323,73	927,24±291,60
Хлор	852,12±126,87	2282,47±261,63	463,20±117,03

Микроэлементы:			
Железо	7,26±1,02	21,54±2,12	40,33±3,02
Марганец	2,04±0,72	5,02±1,44	4,51±1,35
Молибден	0,24± 0,12	2,41±0,47	2,47±0,47
Никель	0,26±0,24	1,67±0,78	5,79±1,45
Селен	0,014±0,01	0,04±0,02	1,50±0,12
Медь	7,80±1,16	6,34±1,32	6,28±1,31
Цинк	9,93±0,96	16,09±1,53	10,84±1,25

Из всех представленных в таблице 1 микро- и макроэлементов особое внимание стоит обратить на такие элементы как: марганец, медь и селен. Так как в пищевом статусе населения выявлен их дефицит.

Для получения фитокомпозиции полученные порошки смешивали друг с другом в нужном весовом соотношении. Оптимальной по органолептическим и пищевым характеристикам стала фитокомпозиция для обогащения хлебобулочных изделий, которая содержит кизил, яблоко и тыкву в соотношении по массе 1:9:12.

Состав предложенной фитокомпозиции исследован по составу микро- и макроэлементов.

Таблица 2 – Состав микро- и макроэлементов фитокомпозиция на основе плодов кизила и вторичного сырья яблок и тыквы

Элемент	Содержание, мг/100 г	Интегральный скор, %
Макроэлементы:		
Калий	966,22	38,65
Кальций	148,10	14,81
Сера	119,82	9,22
Хлор	162,05	7,05
Микроэлементы:		
Железо	3,14	31,44
Марганец	0,51	25,72
Молибден	0,26	366,92
Селен	0,07	100,53
Медь	0,70	70,20
Цинк	1,50	15,03

После изучения микро- и макроэлементного состава фитокомпозиции, на факультете биологии и экологии проведены тесты для изучения влияния дозировки фитокомпозиции на качество хлебобулочных изделий. В лабораторных условиях произведена выработка опытных образцов. Растительную добавку вносили в количестве 5–20 % к массе муки.

После изучения всех образцов установлена самая оптимальная дозировка фитокомпозиции к массе муки составляет 10%. Образцы хлебобулочных изделий с оптимальной фитокомпозицией имеют более высокую пористость мякиша и удельный объем, а также формоустойчивость. Так же показано, что чиабатта, произведенная с применением фитокомпозиции, имеет высокие органолептические показатели, при этом следует отметить приятный привкус яблока.

Доказано, что применение фитокомпозиции на основе порошков из яблока, тыквы и кизила, положительно влияют на выпекание различных образцов хлебобулочных изделий (в частности чиабатта), что в дальнейшем её употребление может привести к нормализации наличия полезных витамин и веществ в организме современного человека.

Список литературы

1. Вагизов, Ф. Г. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ – РСФА / Ф. Г. Вагизов. – Казань : Казан.й федерал. ун-т, 2024. – 150 с.

2. Методическое пособие по подготовке проб для РФА / под ред. И. В. Соколова. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2017. – 48 с.

3. Иванов, А. А. Применение РФА для анализа биологических объектов / А. А. Иванов, Е. С. Петрова // Журнал аналитической химии. – 2021. – Т. 76, № 5. – С. 432–440.

4. Крупская, Т. К. Биоэлементный контроль продуктов питания методом рентгенофлуоресцентного анализа / Т. К. Крупская, Ю. А. Лычагина // IV Международный Балтийский морской форум (22–28 мая 2016 г.): материалы Междунар. морского форума. – Калининград : Изд-во БГАРФ, 2016. – С. 1387–1390.

The relevance of monitoring the trace element composition of bakery products for controlling their nutritional value has been substantiated. The sample preparation of biological objects (juices of dogwood, apple, and pumpkin) has been carried out. The micro- and macroelement composition of the obtained phyto-composition has been analyzed, and the integral score has been calculated. The

addition of phyto-composition to the recipe of bakery products has been experimentally tested. The optimal dosage (10% of the flour weight) has been determined.

Зубрицкий Алексей Андреевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, aaturuntul53@gmail.com.

Научный руководитель – *Ануфрик Славамир Степанович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, anufrick@grsu.by.

УДК 537.9,544.653.23

С. М. ИВАНЮТА, В. В. ДУДИЧ, Д. А. СИМОНЕНКО, Э. А. БЕРДОВА

СРАВНЕНИЕ МЕМРИСТОРНЫХ ЭФФЕКТОВ В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ АНОДНЫХ ОКСИДОВ ТИТАНА И НИОБИЯ

Исследуются механизмы резистивного переключения в МДМ-структурах на основе диоксида титана (TiO_2) и пентаоксида ниобия (Nb_2O_5) полученных методом электрохимического анодирования. Рассмотрено влияние морфологии оксидных слоёв и материала верхнего электрода на электрофизические характеристики мемристорных ячеек. Экспериментально подтверждено, что использование электродов с высокой работой выхода (никель) в сочетании с пористой структурой оксида позволяет достичь коэффициента переключения до 50 и снизить напряжение переключения до 2 В.

Современный этап развития вычислительной техники характеризуется поиском новых принципов хранения и обработки данных. Традиционные технологии памяти сталкиваются с физическими ограничениями масштабирования и проблемами высокого энергопотребления. В этом контексте мемристор, теоретически описанный Леоном Чуа в 1971 году и экспериментально реализованный в 2008 году, рассматривается как базовый элемент резистивной памяти нового поколения [1; 2].

Оксиды вентильных металлов используются при формировании различных элементом интегральных микросхем [3; 4] и полупроводниковых приборов [5–9]. Особый интерес к пленкам на основе этих материалов проявляется при изготовлении мемристорных структур, способных изменять своё сопротивление в зависимости от прошедшего через них электрического заряда [10]. В данной работе проведено исследование мемристорного эффекта в пленках на основе анодных оксидов титана и ниобия с целью определения зависимости параметров этого эффекта от структуры оксидных пленок.

Мемристорные свойства диоксида титана (TiO_2) и пентаоскида ниобия (Nb_2O_5) обусловлены способностью этого материала изменять свою проводимость под действием внешнего электрического поля за счет перераспределения кислородных вакансий. Несмотря на обилие исследований, актуальной задачей остается поиск оптимальных сочетаний морфологии оксидов и материалов электродов для снижения напряжений формовки и увеличения стабильности параметров.

В качестве подложек для синтеза использовалась титановая фольга марки ВТ1-00 (чистота 99,9 %) толщиной 50 мкм и ниобиевая фольга толщиной 100 мкм марки Нб1. Формирование оксидных слоев проводилось методом электрохимического анодирования, который является наиболее гибким инструментом для управления наноструктурой поверхности.

Пленки оксида титана были синтезированы в электролите на основе этиленгликоля с добавлением 0,3% фторида аммония при плотности анодного тока 10 мА/см^2. Для предотвращения химического травления стенок пор процесс проводился в «ледяной бане» при температуре ~2 °С. РЭМ-анализ показал формирование упорядоченных ячеек диаметром около 300 нм. Фотографии пленок представлены на рисунке 1*а*.

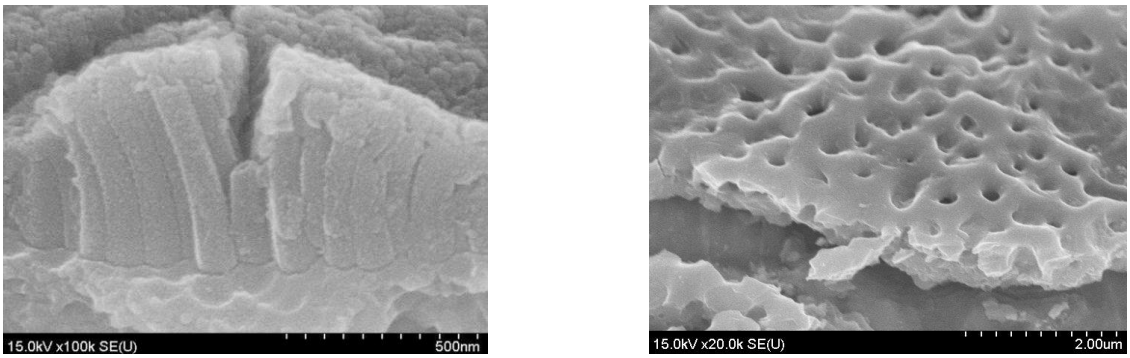
Пленки оксида ниобия были синтезированы в 1% растворе хлорида натрия при плотности анодного тока 50 мА/см^2, что приводило к формированию пористой структуры с расстоянием между соседними порами от 0,5 до 1,0 мкм и диаметром формируемых пор от 50 до 300 нм. Фотографии пленок представлены на рисунке 1*б*.

Верхние электроды наносились методом электронно-лучевого напыления в вакууме с теневой маской. Использовался никель с работой выхода 5,1–5,4 эВ. Диаметр контактов составлял 300 мкм, толщина – до 500 нм.

Исследования с помощью растровой электронной микроскопии подтвердили, что температурный режим анодирования критически влияет на качество оксида. При комнатной температуре в фторсодержащих электролитах наблюдается интенсивное вытравливание верхнего слоя, что приводит к ухудшению мемристорного эффекта. Охлаждение электролита до -5°С – 2°С позволяет сохранить «сотовую» структуру на поверхности, что способствует более стабильному формированию филаментов.

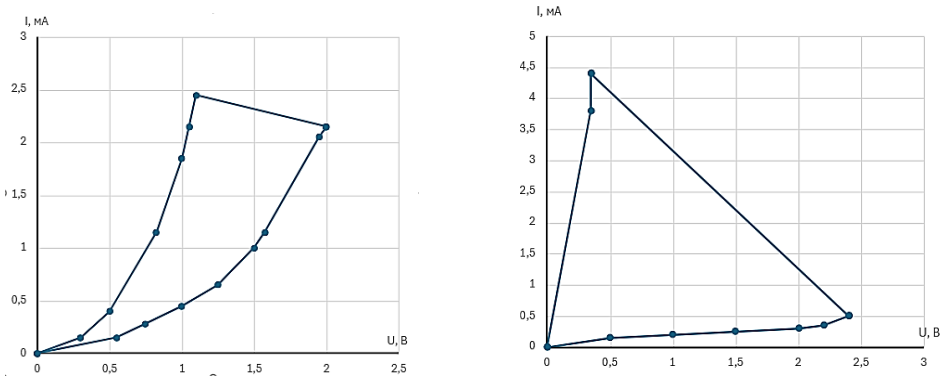
Полученные мемристорные структуры с размерами мемристорной ячейки памяти ~300 мкм были исследованы при помощи измерителя характеристик полупроводниковых приборов Л2-56, который дает возможность визуально производить наблюдение и измерение статических свойств полупроводниковых приборов посредством наблюдения вольтамперных характеристик одновременно для двух и трехэлектродных полупроводнико-

вых приборов на экране, встроенной осциллографической трубки. Вольтамперные характеристики МДМ-структур Ni/TiO_2/Ti и Ni/Nb_2O_5/Nb с положительным смещением представлены на рисунке 2.



а *б*

Рисунок 1 – РЭМ изображения поверхности: а) пористого оксида титана; б) пористого оксида ниобия



а *б*

Рисунок 2 – Вольт-амперные характеристики МДМ-структур: а) Ni/TiO_2/Ti; б) Ni/Nb_2O_5/Nb

Как видно из рисунка 2 эффект перехода от высокоомного состояния в низкоомное для оксида титана имеет место при 2 В, в то время как аналогичный параметр для оксида ниобия составляет 2,5 В. Полученный результат может быть объяснен тем, что структура оксида титана имеет более развитую поверхность по сравнению со структурой оксида ниобия, как это видно на рисунке 1. Более высокое значение удельной поверхности оксида титана обеспечивает более высокую плотность поверхностных переходов, обеспечивающих переход от высокоомного к низкоомному состоянию при подаче смещающего напряжения. Коэффициент переключения при переходе высокоомного состояния в низкоомное достигает 50 (рис. 2*б*). Исследуемые мемристорные структуры представляют интерес для их использования при разработке микросистем энергонезависимой памяти в интегральной электронике. При этом важно отметить, что исследуемые материалы оксид титана и оксид ниобия используются при изготовлении различных элементов интегральных микросхем [11–14].

Список литературы

1. Memristor – The Missing Circuit Element / L. O. Chua [et. al] // IEEE Transactions on Circuit Theory. – 1971. – Vol. 18. – P. 507–519.

2. Stewart, R. A hybrid nanomemristor/transistor logic circuit capable of self-programming / R. Stewart, J. Borghetti, Li Zhiyong, J. Straznicky // PNAS. – 2009. – Vol. 106 (6). – P. 1699–1703.

3. Lazarouk, S. K. 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections Through Optical Interposer / S. K. Lazarouk, A. A. Leshok, T. A. Kozlova, A. V. Dolbik, L. D. Vi, V. K. Ilkov, V. A. Labunov // International Journal of Nanoscience. – 2019. – Vol. 18, No. 3-4. – P. 1940091.

4. Lazarouk, S. Porous alumina as low-ε insulator for multilevel metallization / S. Lazarouk, S. Katsouba, A. Leshok, A. Demianovich, V. Stanovski, S. Voitech, V. Vysotski, V. Ponomar // Microelectronic Engineering. – 2000. – Vol. 50 (1-4). – P. 321–327.

5. Lazarouk, S. Stable electroluminescence from reverse biased n-type porous silicon-aluminum Schottky junction device / S. Lazarouk, P. Jaguiro, S. Katsouba, G. Masini, S. La Monica, G. Maiello, A. Ferrari // Appl. Phys. Lett. – 1996. – Vol. 68. – P. 1646–1648.

6. Lazarouk, S. Anodic Nanoporous Titania for Electro-optical Devices / S. Lazarouk, Z. Xie, V. Chigrinov, H. S. Kwok // Japanese Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 46 (7A). – P. 4390–4394.

7. Лазарук, С. К. Эффективность лавинных светодиодов на основе пористого кремния / С. К. Лазарук, А. А. Лешок, В. А. Лабунов, В. Е. Борисенко // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39, № 1. – С. 149–152.

8. Lazarouk, S. Optical characterization of reverse biased porous silicon light emitting diode / S. Lazarouk, S. Katsouba, A. Tomlinson, S. Benedetti, C. Mazzoleni, V. Mulloni, G. Mariotto, L. Pavesi // Materials Science and Engineering: B. – 2000. – Vol. 69–70. – P. 114–117.

9. Berashevich, J. A. Electroluminescence in Porous Silicon at a Reverse Bias Voltage Applied to the Schottky Barrier / J. A. Berashevich, S. K. Lazarouk, V. E. Borisenko // Semiconductors. – 2006. – Vol. 40, № 2. – P. 234–239.

10. Зарядовые свойства пленок анодных оксидов вентильных металлов, используемых в мемристорных устройствах / Ле Динь Ви [и др.] // Технические средства защиты информации : тез. докл. XVII Белорус.-рос. науч.-техн. конф., Минск, 11 июня 2019 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол. : Т. В. Борботько [и др.]. – Минск : БГУИР, 2019. – С. 45.

11. Trezza, M. Superconducting properties of Nb thin films deposited on porous silicon templates / M. Trezza, S. L. Prischepa, C. Cirillo, R. Fittipaldi, M. Sarno, D. Sannino, P. Ciambelli, M. B. S. Hesselberth, S. K. Lazarouk, A. V. Dolbik, V. E. Borisenko, C. Attanasio // Journal of Applied Physics. – 2008. – T. 104, No 8. – P. 083917.

12. Lazarouk, S. Porous and pillar structures formed by. anodization for vertical alignment of nematic liquid crystal / S. Lazarouk, A. Muravski, D. Sasinovich, V. Chigrinov, H. S. Kwok // Japanese Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 46, № 10R. – P. 6889.

13. Lazarouk, S. Visible Electroluminescence from Al-Porous Silicon Reverse Bias Diodes Formed on the Base of Degenerate n-Type Silicon / S. Lazarouk, V. Bondarenko, P. Pershukevich, S. La Monica, G. Maiello // MRS Online Proceedings Library Archive. – 1994. – Vol. 358. – P. 659–664.

14. Lazarouk, S. K. High Field Porous Anodization of Aluminium Films with a Photolithographic Mask / S. K. Lazarouk // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. World Scientific Press. – 2013. – P. 355–358.

The article investigates the mechanisms of resistive switching in MDM structures based on titanium dioxide (TiO_2) and niobium pentaoxide (Nb_2O_5) obtained by electrochemical anodizing. The influence of the morphology of the oxide layers and the upper electrode material on the electrophysical characteristics of memristor cells is considered. It has been experimentally confirmed that the use of electrodes with high output performance (nickel) in combination with a porous oxide structure makes it possible to achieve a switching coefficient of up to 50 and reduce the forming voltage to 2 V.

Иванюта Сергей Михайлович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, saratnik101@gmail.com.

Дудич Владислав Валерьевич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, dudich@bsuir.by.

Симоненко Дарья Александровна, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, simonenk0daria1@gmail.com.

Бердова Эвелина Андреевна, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, evelinaberdova975@gmail.com.

Научный руководитель – *Лешок Андрей Александрович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, leshok@bsuir.by.

УДК 533.9.082.5;543.423;621.373.826

Д. С. ИЛЬЧЕНКО, Г. С. ТАМАШЕВСКАЯ, М. П. ПАТАПОВИЧ

ПОСЛОЙНЫЙ АНАЛИЗ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ

Показана возможность проведения послойного анализа многокомпонентных сплавов методом лазерной многоканальной атомно-эмиссионной спектрометрии с помощью двухимпульсного атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1. Представлено краткое обсуждение полученных результатов.

Метод лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии основан на регистрации эмиссионных спектров приповерхностной плазмы. Он является одним из методов качественного, полуколичественного и количественного анализа образцов. Особенности взаимодействия лазерного излучения с поверхностью изучаемого объекта определяются проводящими свойствами. Например, при исследовании металлов, а следовательно, и сплавов, инициализация плазмы может быть представлена моделью свободных электронов. При этом электроны проводимости, поглощая излучение, переходят в состояние с более высокой энергией и взаимодействуют с другими частицами, передавая им свою энергию [1–3].

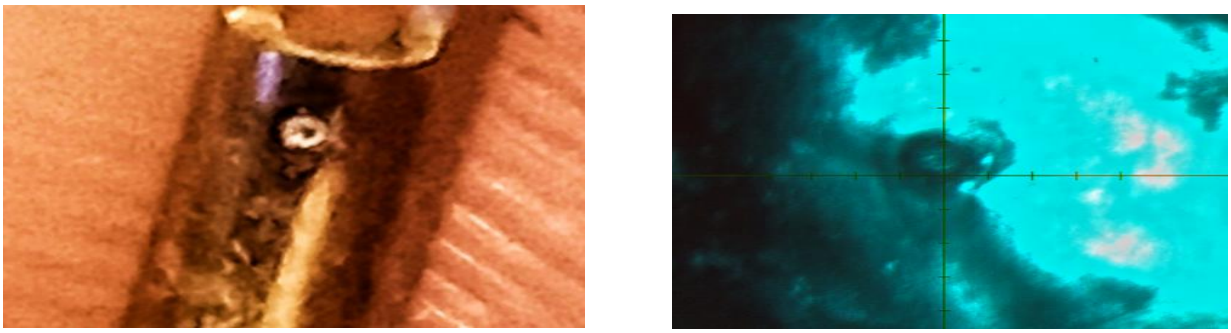
Конструкционный материал, который преимущественно применяется в технике, является сплавом, имеющим макроскопически однородную структуру. Традиционно такой объект состоит из смеси химических эле-

ментов: основы, малых добавок, неудаленных примесей. Соответственно, особенность взаимодействия лазерного излучения с поверхностью такого исследуемого образца определяется проводящими свойствами.

Атомно-эмиссионная многоканальная спектрометрия позволяет проводить качественный, полуколичественный и количественный анализ различных объектов. Данный метод основан на регистрации спектров плазмы, образованной при абляции вещества под воздействием лазерного излучения. При изучении металлов и сплавов применяется модель свободных электронов: электроны проводимости поглощают лазерное излучение и переходят в состояние с более высокой энергией, взаимодействуя при этом с другими электронами в веществе [1].

Исследование атомно-эмиссионных спектров различных материалов с помощью лазерных импульсов, сдвинутыми друг относительно друга во времени, а также для создания аналитических методик качественного и количественного анализа использовался лазерный двухимпульсный спектрометр LSS-1. Прибор может быть использован для проведения как интегральной, так и дифференциальной (послойный анализ) оценки содержания элементов в изучаемых образцах. Двухимпульсный неодимовый лазер с возможностью регулирования энергии накачки, временного интервала между импульсами, числом воздействующих лазерных импульсов и параметром расфокусировки является источником возбуждения спектров. Установленное программное обеспечение Laesspectrometer позволяет измененять параметры лазерного излучения и управлять параметрами лазера. Имеется возможность проводить количественный анализ различных веществ и сохранять зарегистрированные спектры в формате MS Office Excel для последующей обработки [3].

В ходе проведенных предварительных исследований были выбраны оптимальные режимы работы и длины волн аналитических линий элементов: Zn (481,205 нм), Cu (510,992 нм). Рабочие условия следующие: энергия импульсов – от 20 до 60 мДж, параметр расфокусировки – 0 мм, межимпульсный интервал – 10 мкс. Параметры лазерного излучения могут быть изменены через программное обеспечение Laesspectrometer. В роли объекта исследования выступали сплавы, содержащие в своем составе такие химические элементы, как медь и цинк. Число воздействующих лазерных импульсов на поверхность изучаемого образца равнялось 20. На рис. 1 представлен внешний вид поверхности исследуемого сплава после воздействии на него серии сдвоенных лазерных импульсов (а), а также фото этой же поверхности, снятое камерой микроскопа (*б*).



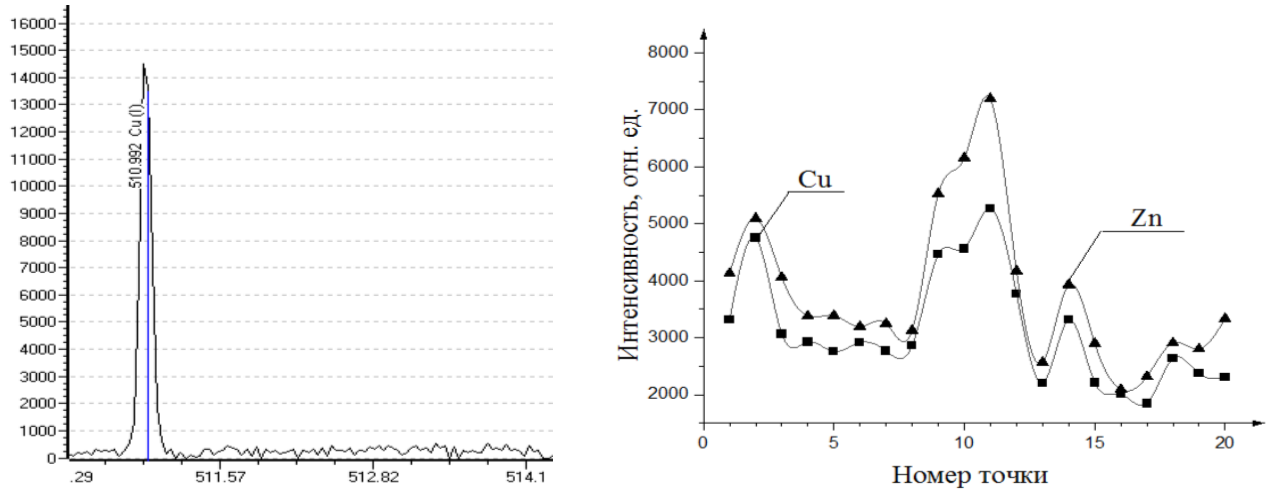
а *б*

Рисунок 1 – Снимок поверхности исследуемого образца (а)
фото, снятое камерой микроскопа (б)

Для проведения послойного анализа изучаемых материалов были получены спектры, демонстрирующие не только присутствие химических элементов в составе многокомпонентного сплава, но и позволяющие оценить интенсивность, а значит, и их концентрацию по всему объему образца. Поэтому в качестве примера на рис. 2 представлен фрагмент спектра, полученный при воздействии серии 20-ти сдвоенных лазерных импульсов, свидетельствующий о наличии меди в составе многокомпонентного сплава (*а*). Также, на рис. 2*б* продемонстрировано распределение интенсивности спектральных линий меди и цинка от номера точки, соответствующей номеру воздействующего сдвоенного импульса. Следовательно, можно говорить о проведенном послойном анализе.

Из приведенных данных можно заключить о неравномерном распределении изучаемых элементов по всей толщине исследуемого материала.меди в приповерхностных слоях многокомпонентного сплава.

Таким образом, проведенные спектроскопические исследования приповерхностной лазерной плазмы позволяют установить послойный анализ многокомпонентных сплавов с целью дальнейшего изучения требуемых свойств.



а *б*

**Рисунок 2 – Фрагмент полученного спектра (а)
и зависимость интенсивности линий элементов от номера точки (б)**

Список литературы

1. Воропай, Е. С. Атомно-эмиссионный многоканальный спектральный анализ: научное и практическое применение / Е. С. Воропай, К. Ф. Ермалицкая, А. П. Зажогин, М. П. Патапович, А. Р. Фадаиян // Вестн. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1. – 2009. – № 1. – С. 14-20.

2. Laser-induced vaporization of a metal surface / M. Aden [et al.] // J. of Physics. D, Appl. Physics. – 1992. – Vol. 25, № 1. – P. 57–65.

3. Laser ablation for analytical sampling: what can we learn from modeling? / A. Bogaerts [et al.] // Spectrochimica Acta, Part B : Atomic Spectroscopy. – 2003. – Vol. 58, № 11. – P. 1867–1893.

The possibility of performing layer-by-layer analysis of multicomponent alloys by laser multichannel atomic emission spectrometry using a dual-pulse atomic emission spectrometer LSS-1 is shown. A brief discussion of the obtained results is presented.

Ильченко Дарья Сергеевна, студент 1 курса уровня высшего образования факультета электросвязи УО «Белорусская государственная академия связи», Минск, Республика Беларусь.

Тамашевская Галина Сергеевна, студентка 1 курса уровня высшего образования факультета электросвязи УО «Белорусская государственная академия связи», Минск, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Патапович Мария Петровна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физических и математических основ информатики факультета инжиниринга и технологии связи УО «Белорусская государственная академия связи», Минск, Республика Беларусь, mpetpat@mail.ru.

УДК 621.785

Н. А. КАНАНОВИЧ, Б. А. АСМЫКОВИЧ, А. А. ГРИЦУК

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ 40Х

Проведены сравнительные исследования микроструктуры, микротвердости и фазового состава образцов из стали 40Х после ионно-плазменного азотирования, электронно-лучевой закалки и комбинированного воздействия. Наилучшие результаты получены после ионно-плазменного воздействия с последующим модифицированием электронным лучом. При этом максимальная твердость у поверхности составила $HV_{0,1}$ 850, глубина упрочненного слоя возросла до 1800 мкм.

Конструкционная легированная сталь 40Х характеризуется высокой твердостью и износостойкостью. Ее используют в условиях высоких механических нагрузок и трения благодаря прочности и износостойкости. Из нее изготавливают детали машин и механизмов – оси, валы, шестерни, поршни.

На машиностроительных предприятиях для упрочнения деталей из стали 40Х применяют прежде всего объемную закалку, технологии химико-термической обработки, в том числе газовое и ионно-плазменное азотирование (ИПА). ИПА является энергосберегающей технологией, которая позволяет получать за 10–16 часов модифицированные слои толщиной 300–600 мкм с микротвердостью $HV_{0,1}$ 500–600.

Электронно-лучевая обработка (ЭЛО) даёт возможность локально воздействовать на структуру металлов и сплавов благодаря сверхбыстрому нагреву и последующему охлаждению в вакууме. В работе [1] на образцах из

стали 45 получали упрочненные слои толщиной 0,3–0,45 мм с микротвердостью порядка HV 900–1100. В работе [2] показано, что после ЭЛО на образцах из стали 45 формировался упрочненный слой, имеющий мартенситную структуру с микротвердостью $HV_{0,05}$ 900. Технологии электронно-лучевой обработки являются перспективными, т.к. с их помощью можно обрабатывать изделия со сложными контурами с минимальными деформациями.

Развитие промышленности требует создания деталей с поверхностными слоями, обладающими комплексом заданных свойств. Варьировать сочетанием физико-механических и эксплуатационных характеристик деталей и инструмента, работающих в особо тяжелых условиях, в значительной степени помогает использование комбинированных методов обработки, позволяющих получать градиентные по структуре и свойствам износо- и коррозионностойкие поверхностные слои. В основе данного подхода лежит идея комплексного использования достоинств и нивелирование недостатков разных методов при одновременном или последовательном проведении различных технологических процессов. При этом сложение двух видов обработки, как правило, обеспечивает появление новых эффектов, не принадлежащих каждому отдельному способу.

В работе [3] было показано, что электронно-лучевая обработка азотированных слоев ведет к растворению хрупкой нитридной фазы и перераспределению атомов азота глубже в материал. Так, для стали 40Х комбинированный способ обработки позволил увеличить показатель износостойкости вдвое в сопоставлении с азотированием, обеспечив твердость на уровне HV 800–850 [3]. Кроме того, высокоэнергетическое действие способствует измельчению зерна и удалению дефектов поверхности [4].

Целью данной работы явилось изучение закономерностей формирования структуры и распределения микротвердости в стали 40Х после последовательного применения ионно-плазменного азотирования и электронно-лучевой обработки.

Материалы и методика эксперимента.

Для проведения исследований изготавливали образцы из стали 40Х в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами 40×20×15 мм. Химический состав стали 40Х представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав (мас. %) стали 40Х

Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
Основа	0,36 – 0,44	0,17 – 0,37	0,5 – 0,8	0,8 – 1,1	до 0,3	до 0,035	до 0,035

Для проведения исследований использовали три группы образцов:

- после электронно-лучевой обработки;
- после ионно-плазменного азотирования;
- подвергнутые комбинированному воздействию, включающему ИПА с последующей ЭЛО.

Электронно-лучевой нагрев образцов выполняли на установке ЭЛА-15 по следующему режиму: ускоряющее напряжение 60 кВ, ток луча 29 мА, ток фокусировки 715 мА, площадь зоны нагрева 1,2 $см^2$, время нагрева 5 с. Ионно-плазменное азотирование проводили на оборудовании производства ФТИ НАН Беларуси при температуре 540 °С в течение 16 часов в среде азота, водорода и аргона.

Рентгенофазовые исследования осуществляли на дифрактометре Explorer GNR в излучении CuK_{α}. Микроструктуру образцов исследовали на оптическом микроскопе МИ-1. Твердость образцов измеряли на приборе AFFRI-URBV-VRS, микротвердость – на AFFRI-DM8 с нагрузкой на индентор 100 гс Шлифы образцов для выполнения металлографических и микродюрометрических исследований изготавливали путем вырезания на автоматическом отрезном станке METKON с водным охлаждением места реза, что позволило избежать перегрева поверхности материала. Для подготовки шлифов использовали пробоприготовительное оборудование Metkon – пресс Ecopress 100 и шлифовально-полировальный станок Digiprep. В качестве травителя использовали 4%-ный раствор HNO_3 в этиловом спирте.

Результаты исследований и их обсуждение.

Распределение микротвердости по глубине образцов из стали 40Х после ИПА, ЭЛО и комбинированной обработки представлено на рисунке 1.

Из рисунка видно, что образец после ЭЛО имеет микротвердость у поверхности $HV_{0,1}$ 700, при переходе к основе $HV_{0,1}$ 250, глубина упрочненного слоя составила 1750 мкм. После ИПА максимальная микротвердость достигала $HV_{0,1}$ 780 , глубина модифицированного слоя – 500 мкм. На образце после комбинированной обработки твердость у поверхности возросла до $HV_{0,1}$ 850, глубина упрочненного слоя возросла до 1800 мкм.

На рисунке 2 показана микроструктура образца из стали 40Х после комбинированного воздействия, включающего ИПА с последующей ЭЛО, при различных увеличениях. В приповерхностном слое наблюдается структура крупноигольчатого мартенсита, образующегося вследствие закалки электронным лучом.

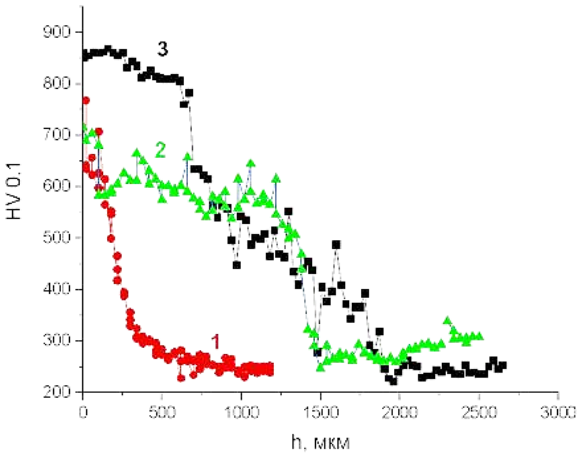
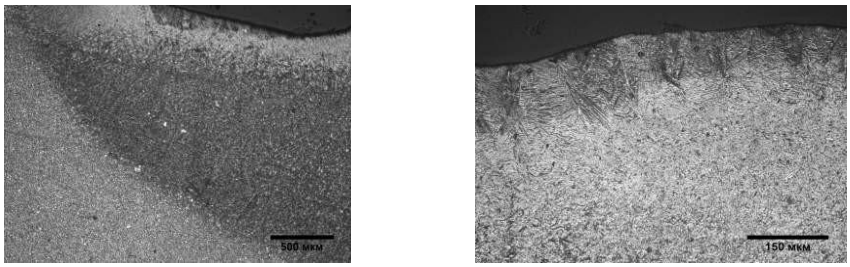


Рисунок 1 – Распределения микротвёрдости на образцах из стали 40Х:
1 – после ИПА, 2 – после ЭЛО, 3 – после комбинированной обработки



а *б*

Рисунок 2 – Микроструктура образца стали 40Х после комбинированной обработки при различных увеличениях:
а – × 50; б – × 200

Рентгенофазовый анализ показал, что в образце из стали 40Х преобладающей фазой является α-железо. В образце после ЭЛО не происходит существенных изменений в фазовом составе. После ионно-плазменного азотирования в поверхностном слое был выявлен α-твердый раствор азота в железе и обнаружены нитриды железа Fe_4N. В образце после комбинированной обработки (рисунок 3) наблюдается смещение пиков α-железа в область меньших углов, что указывает на образование пересыщенного твердого раствора внедрения.

Количественный фазовый анализ показал, что масштабный фактор мартенситной фазы составляет 1,6 единиц. Такое увеличение подтверждает формирование объемной доли мартенситной фазы с высокой плотностью дефектов решетки. Это согласуется с данными [5; 6], утверждающими, что легирование азотом способствует формированию азотистого мартенсита. Также были обнаружены нитриды железа Fe_4N. Вероятно, ЭЛО способствовала частичному растворению нитридных фаз и пересыщению α-твердого раствора азотом.

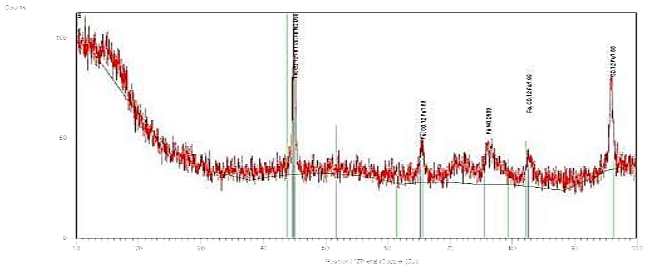


Рисунок 3 – Рентгеновская дифрактограмма образца из стали 40Х после комбинированной обработки, включающей ИПА с последующим электронно-лучевым воздействием

Сравнительные исследования микроструктуры и микротвердости образцов из стали 40Х после ИПА, ЭЛО и комбинированной обработки показали, что наилучшие результаты получены после ионно-плазменного воздействия с последующим модифицированием электронным лучом. При этом максимальная твердость у поверхности составила $HV_{0,1}$ 850, глубина упрочненного слоя возросла до 1800 мкм. Рентгенофазовый анализ образцов после комбинированной обработки показал, что в упрочненном слое преобладающими фазами являются α-твердый раствор азота в железе и нитриды железа Fe_4N.

Список литературы

1. Śliwiński, P. Electron Beam Hardening of Low-Alloy Steel / P. Śliwiński, K. Kubik, M. Kopyściański // METAL 2022 : 31st International Conference on Metallurgy and Materials. – Brno, Czech Republic, 2022. – P. 1–6.

2. Anchev, A. Improving in microhardness of C45 steel obtained via electron beam hardening using a one-factor-at-a-time technique / A. Anchev, B. Stoyanov, M. Atanasova, Y. Argirov, B. Petkov // International Journal of Innovative Research and Scientific Studies. – 2025. – Vol. 8, № 5. – P. 1255–1270. – DOI: 10.53894/ijirss.v8i5.9089.

3. Petrov, P. Surface Hardening of Alloy Steels Using a High Intensity Electron Beam / P. Petrov // Materials and Manufacturing Processes. – 1998. – Vol. 13, № 4. – P. 563–574.

4. Cai, J. Microstructure and properties of low carbon steel after surface alloying induced by high current pulsed electron beam / J. Cai, Q. Guan, K. Zhang, S. Hao // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. B. – 2005. – Vol. 242, № 1–2. – P. 367–370.

5. Белый, А. В. Плотность ионного тока и параметры поверхностного слоя хромсодержащих сплавов / А. В. Белый, Г. Е. Ремнев, В. В. Углов // Взаимодействие излучений с твердым телом : тез. докл. 3-й Междунар. конф., Минск, 21–24 сент. 1999 г. – Минск : БГУ, 1999. – С. 89–92.

6. Рашев, Ц. В. Высокоазотистые стали / Ц. В. Рашев, А. В. Елисеев, Л. Ц. Жекова, П. В. Богев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2019. – № 62 (7). – С. 503–510. – https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-7-503-510.

This article presents the results of an experimental study of the combined hardening of 40X steel after ion-plasma nitriding and electron beam processing. Metallographic studies, microhardness measurements, and X-ray phase analysis were conducted. The formation of nitrogen martensite was established, achieving microhardness of 850 HV and a hardened layer depth of 1800 μm.

Кананович Никита Александрович, научный сотрудник, Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, nikita.kananovich@gmail.com.

Асмыкович Бажен Анатольевич, студент, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, bazhen77asmas@gmail.com.

Грицук Андрей Анатольевич, научный сотрудник, Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Поболь Игорь Леонидович*, доктор технических наук, профессор, Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, pobol@phti.by.

УДК 539.1.044:543.42

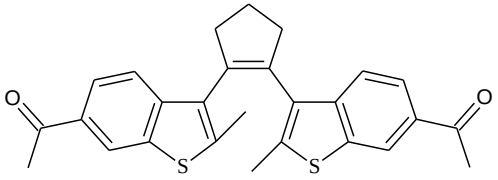
П. В. КАРПАЧ

ФОТОУПРАВЛЯЕМАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ ФОТОХРОМНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ В ПЛЁНКАХ

Методами электронной абсорбционной и флуоресцентной спектроскопии изучена фотоиндуцированная модуляция флуоресценции комплексов полупроводниковых квантовых точек (КТ) и диарилэтенов (ДАЭ) в аморфных пленках.

В устройствах молекулярной электроники и фотоники в качестве фотоуправляемых переключателей и сред памяти [1] перспективно применение фотохромных диарилэтенов (ДАЭ) [2]. Фотохромизм ДАЭ состоит в обратимой валентной изомеризации, т.е. в фотоиндуцированном переходе из открытой формы А в циклическую форму В. Открытый бесцветный изомер ДАЭ (А), поглощая УФ излучение, превращается в окрашенный (циклический) изомер ДАЭ (В), который под действием видимого излучения, поглощаемого им, снова превращается в исходный открытый изомер. Эти превращения осуществляются только под действием света, поглощаемого соответствующими формами. Они являются термически необратимыми, поскольку термическая релаксация фотоиндуцированного циклического изомера ДАЭ (В) в исходную открытую форму при комнатной температуре не реализуется. Объединение флуорофора (например, полупроводниковой квантовой точки (КТ) и фотохромной группы может приводить к модуляции интенсивности флуоресценции.

В настоящей работе с применением методов электронной абсорбционной и флуоресцентной спектроскопии исследованы фотоиндуцированные изменения флуоресценции комплексов фотохромного соединения ДАЭ4 и КТ в аморфных плёнках.



Спектры поглощения (рисунок 1) регистрировались с применением спектрофотометра SPECORD 200 (CarlZeiss, Германия). Спектры флуоресценции (рисунок 2) регистрировали с помощью спектрофлуориметра

СМ2203 (Солар, Беларусь). Измерение длительности затухания флуоресценции выполнены на лабораторной установке, описанной ранее [3], работающей в режиме времякоррелированного счета фотонов [4]. В качестве источника возбуждения использовался пикосекундный диодный лазер PDL 800B с лазерной головкой LDH-407 (PicoQuant, Германия), генерирующий импульсы света с длиной волны 408 нм, длительностью 70 пс и частотой следования до 40 МГц. Система регистрации включала в себя фотоприемный блок PMA-182, а также систему для времякоррелированного счета фотонов TimeHarp200 фирмы PicoQuant (Германия). Полуширина аппаратной функции, т.е. регистрируемая с помощью установки полуширина импульса возбуждающего света составляла приблизительно 0,3 нс. Кривые затухания флуоресценции регистрировали в диапазоне приблизительно 22 нс, который был разбит на 600 каналов (временная ширина канала – 36 пс). Для анализа экспериментальных данных использован метод нелинейных наименьших квадратов.

Для облучения образцов использовались светодиоды с максимумами полос излучения при 365 нм (LED365) и 514 нм (LED514). Полуширины полос излучения светодиодов LED365 и LED514 составляли 9 нм и 32 нм, а оптическая мощность – 0.45 Вт и 3 Вт, соответственно. Время облучения, необходимое для перевода молекул ДАЭ из открытой формы А в циклическую форму В и обратно, определялось на основании спектров поглощения, измеренных в состоянии равновесия.

В качестве твердофазных фотохромных систем использовались аморфные твердофазные пленки на стеклянных поддложках, полученные из растворов КТ в хлороформе в присутствии молекул ДАЭ.

Спектры электронного поглощения (рисунок 1) свидетельствуют о демонстрации фотохромных свойств твердофазных аморфных пленок, содержащих комплексы ДАЭ4+КТ525.

Из рисунка 2 видно, что в спектрах флуоресценции изучаемых комплексов ДАЭ+КТ (в аморфных пленках) после облучения УФ-светом, который способствует образованию окрашенной формы, наблюдается уменьшение интенсивности флуоресценции КТ. При последующем облучении видимым светом вместе с переходом молекул ДАЭ в открытую неокрашенную форму происходит увеличение интенсивности флуоресценции КТ. Наблюдаемое обратимое изменение интенсивности флуоресценции КТ можно объяснить как изменением квантового выхода флуоресценции КТ вследствие индуктивно-резонансного переноса энергии возбуждения (FRET) от КТ к фотоиндуцированной циклической окрашенной форме ДАЭ, так и эффектом внутреннего фильтра (перепоглощением свечения КТ фотохромом).

Для получения информации о вкладе FRET в модуляцию интенсивности флуоресценции КТ молекулами ДАЭ в пленках, была исследована кинетика затухания флуоресценции КТ до и после облучения УФ и видимым светом. Изменения средней длительности флуоресценции <□> и <□□> КТ в пленках при фотоизомеризации находящихся вблизи молекул ДАЭ могут являться индикатором проявления механизма FRET.

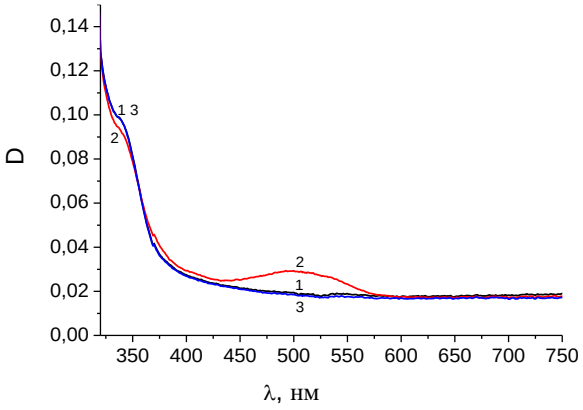


Рисунок 1 – Спектры поглощения комплекса ДАЭ4+КТ525 в аморфной плёнке до облучения (кривая 1), после УФ облучения (кривая 2), после видимого облучения (кривая 3)

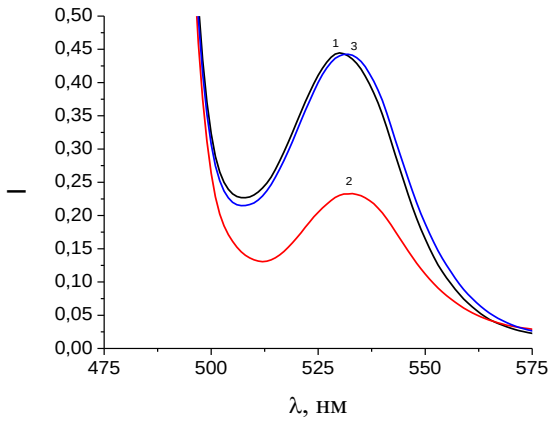


Рисунок 2 – Спектры флуоресценции комплекса ДАЭ4+КТ525 в аморфной плёнке до облучения (кривая 1), после УФ облучения (кривая 2), после видимого облучения (кривая 3)

Из полученных данных было выявлено, что кинетика затухания флуоресценции исследованных комплексов ДАЭ+КТ не может быть удовлетворительно описана лишь одной компонентой, т.е. кинитека затухания флуоресценции изучаемых комплексов носит немоноэкспоненциальный характер (для коректной интерпретации полученных результатов были использовани 2 экспоненты) (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры кинетики затухания флуоресценции ДАЭ4 в аморфной пленке

Состояние пленки	□1	□1, ns	S1, %	□2	□2, ns	S2, %	<□>, ns	<□□>, ns	□2
до облучения	0,620 +/– 0,006	6,52 +/– 0,07	38,4	0,380 +/– 0,007	17,08 +/– 0,12	61,6	13,03 +/– 0,11	10,5291	1,03
после УФ облучения	0,577 +/– 0,006	4,36 +/– 0,06	29,1	0,423 +/– 0,006	14,48 +/– 0,11	70,9	11,54 +/– 0,11	8,6415	1,11
после облучения видимым светом	0,642 +/– 0,008	7,19 +/– 0,08	41,8	0,358 +/– 0,008	17,94 +/– 0,16	58,2	13,44 +/– 0,14	11,0373	1,04

Полученные результаты показывают, что обратимые фотопревращения ДАЭ под действием УФ и видимого света влияют на время жизни флуоресценции КТ, что предполагает значительный вклад механизма FRET в модуляцию интенсивности флуоресценции КТ.

Список литературы

1. Molecular switches / ed. by B.L. Feringa. – Wiley-VCH, Weinheim, 2001.

2. Irie, M. Photochromism of diarylethene molecules and crystals: memories, switches, and actuators / M. Irie, T. Fukaminato, K. Matsuda, S. Kobatake // Chem. Rev. – 2014. – Vol. 11. – P. 12174–12277.

3. Комплекс аппаратных и программных средств для исследования кинетики затухания флуоресценции / А. А. Маскевич [и др.] // Вестник Гродн. гос. ун-та им. Янки Купалы. – 2013. – Т. 3, № 159. – С. 107–119.

4. O'Connor, D. V. Time-correlated Single Photon Counting / D. V. O'Connor, D. Phillips. – N. Y. : Acad. Press, 1984. – 283 p.

Photoinduced modulation of fluorescence of complexes of semiconductor quantum dots (QDs) and diarylethenes (DAEs) in amorphous films was studied using electron absorption and fluorescence spectroscopy methods.

Карпач Павел Викторович, инженер по метрологии Гродненского центра стандартизации, метрологии и сертификации, Гродно, Республика Беларусь, pavel_karpach@mail.ru.

Научный руководитель – *Василюк Геннадий Тимофеевич*; доцент, кандидат физико-математических наук; Гродненского государственного университета им. Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, vasilyuk@grsu.by.

УДК 535.3,539.216.2

А. С. КИМ

МОДИФИКАЦИЯ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЛЁНОК ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ НИКЕЛЯ

Обнаружена широкая полоса отражения с максимумом при $\lambda \approx 820$ нм, обусловленная формированием включений никеля, который с увеличением флюенса сдвигается в длинноволновую область до $\lambda \approx 2300$ нм. Характерная для исходной пленки узкая полоса отражения при $\lambda = 315$ нм не наблюдается в отражении имплантированной стороной, а в отражении неимплантированной стороной её интенсивность как минимум в три раза меньше, и она смещается в длинноволновую область в интервале $\Delta\lambda = 4$–49 нм.

Имплантация низкоэнергетичных ионов металлов в полимерные пленки вследствие формирования на длине пробега ионов углеродных и металлических включений позволяет получать многослойные структуры металло-полимерного композита с разными показателями преломления, в которых возможно проявление поверхностного плазмонного резонанса на металлических наночастицах [1; 2]. Они могут использоваться в электро-и магнитооптических устройствах с широким спектром применений. В данной работе представлены результаты измерения спектральных зависимостей отражения пленок полиэфирэфиркетона (ПЭЭК), имплантированных ионами никеля.

Пленки ПЭЭК $(C_{19}H_{12}O_3)_n$ толщиной 25 мкм были имплантированы однозарядными ионами никеля Ni^+, ускоренными до энергии 40 кэВ. Имплантация проводилась в интервале флюенсов $F = 2{,}5\times10^{16} – 1{,}5\times10^{17}$ см$^{-2}$ при плотности ионного тока 4 мкА/см^2 ионно-лучевым ускорителем ИЛУ-3 при комнатной температуре. Моделирование распределения имплантированных ионов в полимерной пленке с помощью программы SRIM-2011 показало, что толщина модифицированного слоя не превышает 100 нм.

Спектры отражения измерялись при комнатной температуре в диапазоне длин волн 200–3000 нм однолучевым спектрофотометром PHOTON-RT. Спектральные зависимости коэффициентов отражения при угле падения 8º. Спектральное разрешение было не хуже 0.5 нм, а погрешность измерения амплитуды не превышала $\pm$0,5 %. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия показала, что содержание никеля в слое увеличивается от 0.04 до 0.65 ат. %.

На рис. 1 и 2 показаны спектральные зависимости коэффициента отражения исходной (кривые 1) и имплантированных (кривые 2–5) пленок при падении света на имплантированную и неимплантированную стороны соответственно.

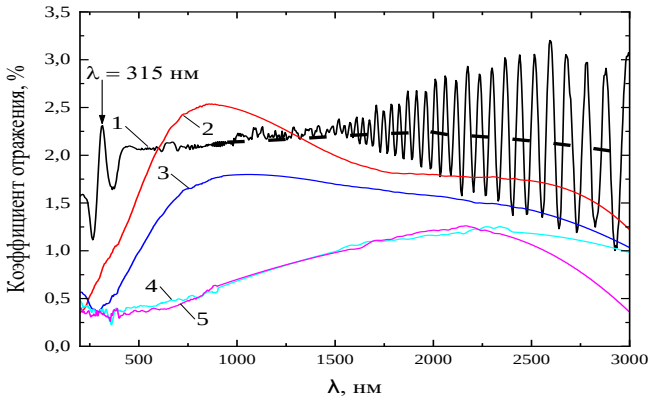


Рисунок 1 – Спектральная зависимость отражения исходной (1) и имплантированных ионами никеля (2–5) плёнок полиэфирэфиркетона при падении света имплантированную сторону.
***F*, см$^{-2}$: 2 – 2.5·10^{16}; 3 – 1·10^{17}; 4 – 1.25·10^{17}; 5 – 1.5·10^{17}**

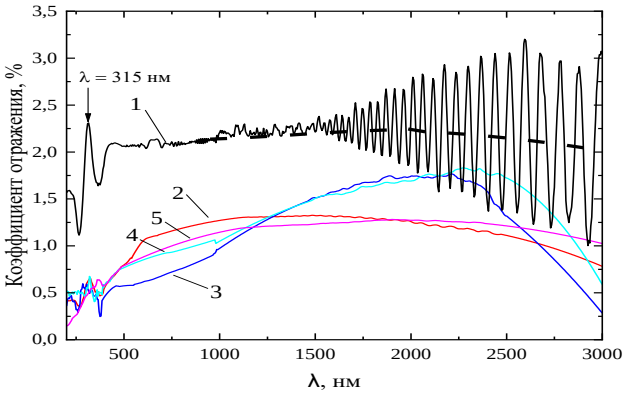


Рисунок 2 – Спектральная зависимость отражения исходной (1) и имплантированных ионами никеля (2–5) плёнок полиэфирэфиркетона при падении света на неимплантированную сторону.
***F*, см$^{-2}$: 2 – 2.5·10^{16}; 3 – 1·10^{17}; 4 – 1.25·10^{17}; 5 – 1.5·10^{17}**

Резкое увеличение отражения исходной пленкой при λ = 354 нм обусловлено прозрачностью полимера при больших длинах волн и дополнительным вкладом в отражение от границы раздела неимплантированная сторона пленки воздух. Спектральные зависимости отражения обеих сторон имплантированных пленок для лучшего восприятия сглажены при $\lambda > 1000$ нм путем исключения интерферационных осцилляций.

Из сравнения рис. 1 и 2 можно заключить, что формирующиеся при имплантации включения в приповерхностном слое в отражательной способности пленки в области ее прозрачности особенно отчетливо проявляются с имплантированной стороны при первых двух флюенсах имплантации (рис. 1, кривые 2, 3), которое характеризуется появлением широкой полосы отражения с максимумом при $\lambda \approx 820$ нм. При этом с увеличением флюенса она уширяется и ее максимум смещается в сторону длинных волн до $\lambda \approx 2300$ нм. Появление этой полосы отражает формирование в приповерхностной области со стороны имплантации никельсодержащих включений, который имеет максимальный коэффициент отражения при $\lambda \approx 850$ нм и уменьшается в области больших длин волн [2].

Зависимость положения этого максимума отражения при падении света на имплантированную и неимплантированную стороны показана на рис. 3.

Сдвиг в длинноволновую область широкой линии отражения, обусловленной формированием никельсодержащих включений, может быть связан с неравномерным распределением размера формирующихся никельсодержащих включений по толщине модифицированного слоя. Так в [3,4] показано, что распределение размера частиц по толщине модифицированного слоя является одной из причин разницы между отражением от имплантированной и не имплантированной стороны прозрачной матрицы, содержащей кластеры металлов.

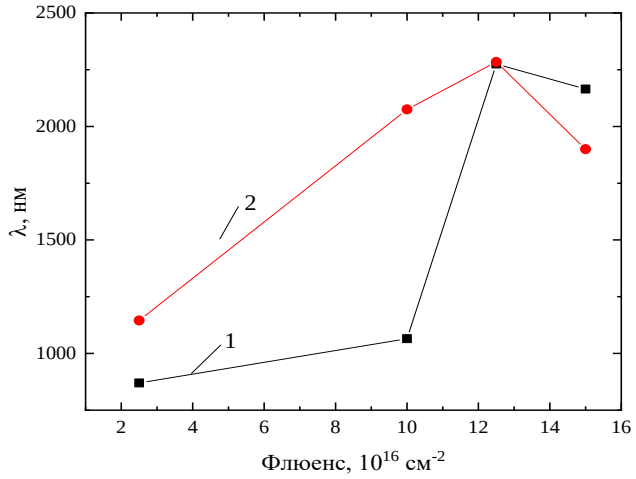


Рисунок 3 – Зависимость положения максимума широкой полосы отражения плёнок полиэфирэфиркетона, имплантированных ионами никеля, от флюенса имплантации при падении света на имплантированную (1) и неимплантированную (2) стороны

При третьем и четвертом флюенсах имплантации как спектральные зависимости (рис. 1 и 2, кривые 4, 5), так и интегральный коэффициент отражения от обеих сторон близки друг к другу, что вызвано завершением процессов карбонизации и полной реструктуризацией приповерхностного слоя, а также доминированием в отражении при этих флюенсах более сложных включений по типу металлическое ядро углеродная оболочка. Зависимость интегрального коэффициента отражения от флюенса имплантации при падении света на имплантированную и неимплантированную стороны показана на рис. 4.

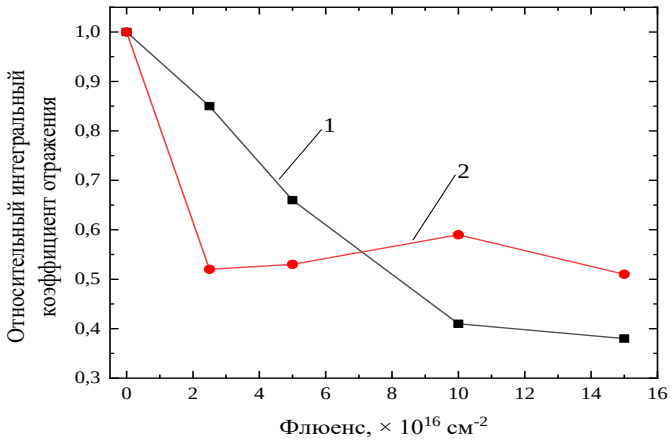


Рисунок 4 – Зависимость относительного интегрального коэффициента отражения плёнок полиэфирэфиркетона, имплантированных ионами никеля, от флюенса при падении света на имплантированную (1) и не имплантированную (2) стороны

На спектральной зависимости отражения исходной плёнкой в ультрафиолетовой области (рис. 1 и 2, кривые 1) наблюдается узкая полоса отражения при $\lambda = 315$ нм с шириной на полувысоте $\Delta\lambda \approx 40$ нм, обусловленная исходной молекулярной структурой полимера. Вследствие полного разрушения молекулярной структуры полимера в приповерхностном слое со стороны имплантации, эта линия не наблюдается в отражении имплантированной стороной (рис. 1, кривые 2–5). В отражении неимплантированной стороной (рис. 2, кривые 2–5) наблюдаются узкие и близкие по полуширине линии отражения с интенсивностью как минимум в три раза меньше, которые смещены в длинноволновую область спектра на $\Delta\lambda = 4$–49 нм. Изменение интенсивности и спектрального положения этих линий обусловлены комформационной перестройкой надмолекулярной структуры приповерхностного слоя с неимплантированной стороны.

Таким образом интегральный коэффициент отражения пленок ПЭЭК при имплантации ионов никеля уменьшается в три раза имплантированной стороной, а неимплантированный – в два раза, что обусловлено формированием никельсодержащих и углеродных включений в модфицированном слое. Обнаружена широкая

полоса отражения с максимумом при λ = 820 нм, обусловленная формированием включений никеля, положение которого с увеличением флюенса в отражении имплантированной стороной смещается в область длинных волн до λ = 2400 нм из-за неравномерного распределением его включений по толщине модифицированного слоя. В отражении неимплантированной стороной максимум этой полосы находится в интервале λ = 1500–2000 нм. Характерная для исходной пленки узкая полоса отражения при λ = 315 нм в отражении имплантированной стороной не наблюдается из-за полной деструкции приповерхностной области полимера. В тоже время в отражении неимплантированной стороной ее интенсивность уменьшается в три раза, и она смещается в длинноволновую область спектра на Δλ = 4–49 нм.

Список литературы

1. Stepanov, A. L. Optics of metal nanoparticles fabricated in organic matrix by ion implantation / A. L. Stepanov, R. I. Khaibullin // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2004. – Vol. 7, № 2. – P. 108–125.

2. Refractive Index Info [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://refractiveindex.info (дата обращения: 10.03.2026).

3. Stepanov, A. L. Reflectance of the dielectric layers containing formed by ion implantation / A. L. Stepanov, F. E. Hole, P. F. Townsend // J. Non-Cryst. Solids – 1999. – Vol. 244. – P. 275–279.

4. Kreibig, U. Optical Properties of Metal Clusters / U. Kreibig, M. Vollmer. – Berlin : Springer, 1995. – 535 p. – (Springer Series in Materials Science; Vol. 25).

A broad reflection band with a maximum at λ ≈ 820 nm, caused by the formation of nickel inclusions, which shifts to the long-wavelength region up to λ ≈ 2300 nm with increasing fluence, was observed. The narrow reflection band at λ = 315 nm characteristic of the original film is not observed in the reflection from the implanted side, while in the reflection from the unimplanted side its intensity is at least three times lower and it shifts to the long-wavelength region within the range Δλ = 4-49 nm.

Ким Андрей Сергеевич, магистрант физического факультета Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, kimandrej03@mail.ru.

Научный руководитель – *Лукашевич Михаил Григорьевич*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор физического факультета Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, Lukashevich@bsu.by.

УДК 537.312,538.935

А. С. КИМ

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЛОЁВ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ НИКЕЛЯ

Представлены результаты измерения температурных зависимостей сопротивления в интервале T = 300–77 K тонких слоев ПЭЭК, модифицированных имплантацией никеля. Показано, что с увеличением флюенса имплантации сопротивление слоя уменьшается. Независимо от флюенса слои имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления и практически линейную температурную зависимостью, что обусловлено доминированием прыжкового, а перколяционного механизма проводимости.

Имплантация низкоэнергетичных ионов металлов в полимеры является эффективным методом изменения их электропроводности от величин, характерных для хороших изоляторов, до полупроводников и даже металлов. В результате торможения ионов на длине среднего пробега в приповерхностной области появляются углеродные включения в виде кластеров аморфного и графитоподобного углерода, а также зарождаются и увеличиваются в размере нановключения имплантированного металла, его оксидов или более сложные включения по типу металлическое ядро-углеродная оболочка [1]. Эти процессы в основном определяют увеличение проводимости приповерхностного слоя и плавный переход от процессов сильной локализации (прыжковая или туннельная проводимость) [2; 3], до металлического (диффузионного) переноса электронов через процессы слабой локализации электронов [4], обусловленные квантовой интерференцией электронных волн. В данной работе проведено исследование имплантации ионов никеля на электропроводящие свойства полиэфирэфиркетона путем изучения температурной зависимости сопротивления и установления основного механизма электронного транспорта в модифицированном слое.

Пленки ПЭЭК $(C19H12O3)_n$ толщиной 25 мкм были имплантированы ионами никеля Ni^+, ускоренными до энергии 40 кэВ. Имплантация проводилась в интервале флюенсов $2{,}5\times10^{16}$–$1{,}5\times10^{17}$ $см^{-2}$ при плотности ионного тока 4 мкА/$см^2$ ионно-лучевым ускорителем ИЛУ-3 при комнатной температуре. Моделирование распределения имплантированных ионов в полимерной пленке с помощью программы SRIM-2011 показало, что толщина модифицированного слоя не превышает 100 нм. Образцы вырезались в виде прямоугольного параллелепипеда с

размером 4×2 мм. Омические контакты наносились приклеиванием медных проволочек электропроводящей эпоксидкой на основе серебра. Температурная зависимость сопротивления измерялась в парах жидкого азота при постепенном (не менее 30 минут) опускании держателя с образцом и датчиком температуры в сосуд с жидким азотом. Измерения проводились в режиме генератора тока. Погрешность измерения сопротивления и температуры не превышала 0.5 %.

На рис. 1 показаны результаты измерения температурной зависимости сопротивления, отнесенного к сопротивлению при комнатной температуре, для пленок ПЭЭК, имплантированных ионами никеля в интервале флюенсов от $2.5 \cdot 10^{16}$ до $1 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$ при плотности ионного тока 4 мкА/см^2.

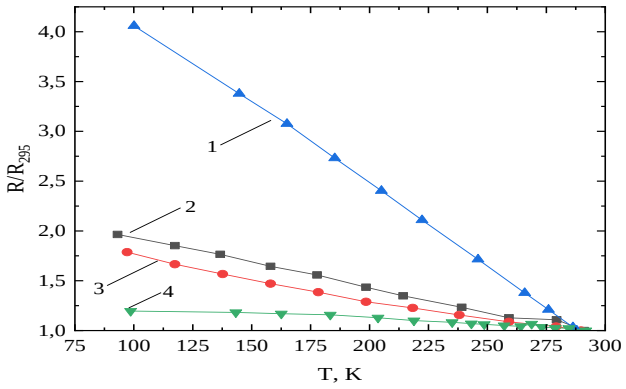


Рисунок 1 – Температурная зависимость сопротивления полиэфирэфиркетона, имплантированного ионами никеля флюенсами F, см$^{-2}$: 1 – $2.5 \cdot 10^{16}$; 2 – $5 \cdot 10^{16}$; 3 – $7.5 \cdot 10^{16}$; 4 – $1 \cdot 10^{17}$

Можно видеть, что при всех флюенсах имплантации с понижением температуры сопротивление модифицированного слоя увеличивается, т. е. температурный коэффициент сопротивления отрицателен. Как и следовало ожидать, сопротивление слоя с увеличением флюенса имплантации уменьшается, что можно объяснить формированием графитоподобных и никельсодержащих включений. Так рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия показала, содержание никеля в слое увеличивается от 0.04 до 0.65 ат. %. В таких неупорядоченных средах можно ожидать прыжкового или туннельного переноса электронов для которых характерно экспоненциальное увеличение сопротивления при понижении температуры: $R \sim \exp(T_0/T)^p$ с разными коэффициентами T_0 и $p = 1 / (1 + d)$, где d – 1, 2, 3 – размерность процессов электронного транспорта [2; 3] или процессов слабой электронной локализации [4], которые предсказывают логарифмическую зависимостью сопртивления от температуры.

На рис. 2 показана интерполяция результатов измерений экспоненциальными зависимостями с разным коэффициентом p.

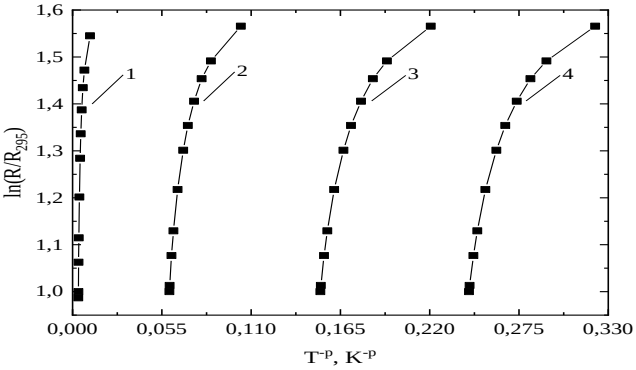


Рисунок 2 – Температурная зависимость сопротивления полиэфирэфиркетона, имплантированного ионами никеля флюенсом $2.5 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$ в масштабе $\ln(R/R_{300K})$ – T^{-p} при различных показателях p: 1 – 1; 2 – 1/2; 3 – 1/3; 4 – ¼

Видно, что хорошей их линеаризации не наблюдается ни для одного показателя. Вместе с тем, при четвертом флюенсе имплантации сопротивление слоя увеличивается менее чем в два раза, что может быть обусловлено доминированием процессов слабой локализации [4]. Однако интерполяция по [4] также не согласуется с измерениями. Это позволяет заключить, что процессы сильной и слабой локализации не являются доминирующими в модифицированном слое. Следовательно, определяющим механизмом электронного транспорта в нем может быть перколяционная проводимость по случайной сетке сопротивлений, показывающая близкую к линейной температурной зависимости сопротивления. Дополнительным подтверждением отсутствия перехода

диэлектрик-металл в модифицированном слое может служить наклон температурной зависимости локальной энергии активации (рис. 3), который согласно [6] позволяет определить на какой стороне перехода диэлектрик-металл находятся исследуемые образцы.

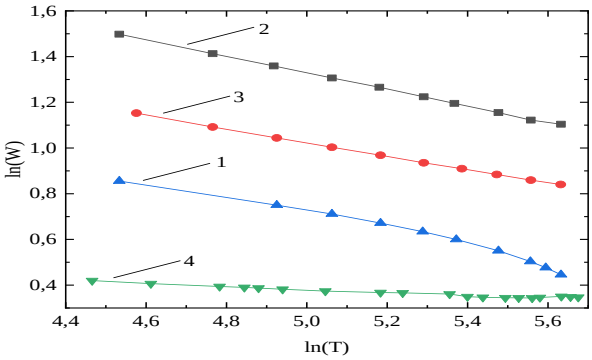


Рисунок 3 – Зависимость локальной энергии активации проводимости от температуры в плёнках полиэфирэфиркетона, имплантированных ионами никеля флюенсами F, см$^{-2}$: 1 – 2.5·10^{16}; 2 – 5·10^{16}; 3 – 7.5·10^{16}; 4 – 1·10^{17}

Таким образом основным механизмом электронного транспорта в модифицированном имплантацией ионов никеля слое полиэфирэфиркетоне являются не процессы сильной или слабой локализации, а перколяционная провордимость по случайной сетке сопротивлений графитоподобных и никельсодержащих включений.

Список литературы

1. Stepanov, A. L. Optics of metal nanoparticles fabricated in organic matrix by ion implantation / A. L. Stepanov, R. I. Khaibullin // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2004. – Vol. 7, № 2. – P. 108–125.

2. Мотт, Н. Электронные процессы в некристаллических веществах / Н. Мотт, Э. Дэвис. – М. : Мир, 1982. – 664 с

3. Шкловский, Б. И. Электронные свойства легированных полупроводников / Б. И. Шкловский, Ф. Л. Эфрос. – М. : Наука, 1979. – 416 с.

4. Abeles, B. Structural and electrical properties of granular metal films / B. Abeles, P. Sheng, M. Coutts, Y. Arie // Adv. Phys. – 1975. – Vol. 24. – P. 407–461.

5. Bergman, G. Weak localization in thin films / G. Bergman // Phys. Rev. B. – 1984. – Vol. 107, № 1. – P. 1–58.

6. Conductivity of weakly insulating amorphous nickel–silicon films below the metal–insulator transition / A. Heines [et al.] // Phys. Stat. Sol. (B) – 1998. – Vol. 205. – P. 237–240.

The results of temperature-dependent measurements of resistance in the range of T = 300–77 K for thin PEEK layers modified with nickel implantation are presented. It is shown that layer resistance decreases with increasing implantation dose. Regardless of the dose, the layers exhibit a negative temperature coefficient of resistance and a nearly linear temperature dependence, which is due to the percolation mechanism of conductivity.

Ким Андрей Сергеевич, магистрант физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, kimandrej03@mail.ru.

Научный руководитель – *Лукашевич Михаил Григорьевич*, доктор физико-математических наук, профессор, физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, Lukashevich@bsu.by.

УДК 538.91

А. С. КИРКОРОВ

ИЗМЕРЕНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕДИ, ОБРАБОТАННОЙ КОМПРЕССИОННЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

Была изучена возможность измерения внутренних напряжений в меди до и после обработки её компрессионными плазменными потоками, методом дифракции рентгеновских лучей. Рассчитаны компоненты тензора внутренних напряжений меди методом $\sin^2\psi$.

На сегодняшний день актуальной темой исследований в области материаловедения является модификация структуры и фазового состава поверхностных слоев различных материалов с целью улучшения их физико-механических свойств. С целью модифицирования свойств материалов активно применяются пучки заряжен-

ных частиц (ионы и электроны), а также плазменные потоки. Особенно в этом отношении выделяют компрессионные плазменные потоки [1], генерируемые квазистационарными плазменными ускорителями, а также сильноточные электронные пучки. Однако обработка материалов компрессионными плазменными потоками может также привести к появлению в них внутренних напряжений: возникают как напряжения сжатия, которые могут привести к повышению прочности и улучшению окислительных свойств, так и растяжения, вызывающие деформацию или трещины. Применение рентгеноструктурного анализа [2], как одного из метода неразрушающего контроля, для исследования внутренних напряжений в материалах, обработанных компрессионными плазменными потоками, позволит лучше понять процессы, происходящие в исследуемых образцах, а также определить возможные дефекты в них.

Анализ напряжений проводился на необлученных и облученных образцах меди, используя метод $\sin^2\psi$. Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре Ultima IV Rigaku в геометрии параллельных пучков (фокусировка Брэгга–Брентано) при длине волны рентгеновского излучения 0,154178 нм. На дифрактометре снимались два дифракционных максимума (рисунок 1): Cu (111) и Cu (200), при различных углах наклона ψ и поворота φ. Для каждого максимума проводилась съёмка при φ = 0°, 45°, 90°, 180°, 225°, 270° и угле наклона ψ = 0°, 18,782°, 27,087°, 33,895°, 40,087°, 46,051°, 52,062°, 58,415°, 65,6°, 75°. В качестве параметра ненапряженной решётки использовалось табличное значение 0,3615 нм.

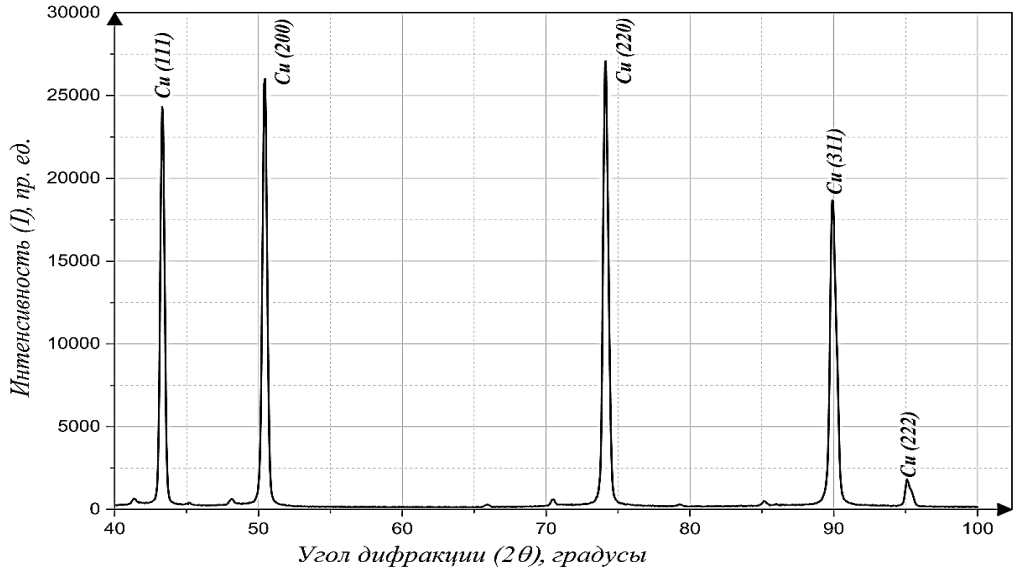


Рисунок 1 – Рентгеновская дифрактограмма Cu до обработки

Измерение напряжений методом $\sin^2\psi$ основано на использовании обобщённого закона Гука [3], записанного с введением параметров a_1 и a_2 (1).

$$a_1 = \frac{1+\nu}{E}[\sigma_{11}cos^2\varphi + \sigma_{12}sin2\varphi + \sigma_{22}sin^2\varphi - \sigma_{33}]sin^2\psi + \frac{1+\nu}{E}\sigma_{33} - \frac{\nu}{E}[\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}]$$
$$a_2 = \frac{1+\nu}{E}[\sigma_{13}cos\varphi + \sigma_{23}sin\varphi]sin2\psi \quad (1)$$

где a_0 – параметр ненапряжённой решётки, $a_{\varphi\psi}$ – измеряемый параметр решётки, σ_{ij} компоненты тензора напряжений, ν коэффициент Пуассона (0,3 для меди), E модуль Юнга (165 ГПа для меди).

Таким образом для нахождения компонент тензора напряжений строится линейная зависимость параметров a_1 и a_2 от $\sin^2\psi$ и $\sin2\psi$ соответственно, затем решается система линейных уравнений (2), где слагаемые, стоящие при $\sin^2\psi$ и $\sin2\psi$ определяются через угол наклона прямой, а свободные слагаемые находятся исходя из её расщепления.

$$y = a + bx$$

$$\sigma_{13} = \frac{b_0 E}{1+\nu}$$

$$\sigma_{23} = \frac{b_{90} E}{1+\nu}$$

$$\begin{cases} \frac{1+\nu}{E}\left[\sigma_{11} - \sigma_{33}\right] = b_0 \\ \frac{1}{E}\sigma_{33} - \frac{\nu}{E}\left[\sigma_{11} + \sigma_{33}\right] = a_0 \\ \frac{1+\nu}{E}\left[\sigma_{22} - \sigma_{33}\right] = b_{90} \\ \frac{1+\nu}{E}\left[\frac{1}{2}\sigma_{11} - \sigma_{33} + \sigma_{12} + \frac{1}{2}\sigma_{22}\right] = b_{45} \end{cases} \quad (2)$$

Зависимость параметра a_1 от $\sin^2\psi$ для необработанной меди представлены на графиках ниже (рисунок 2).

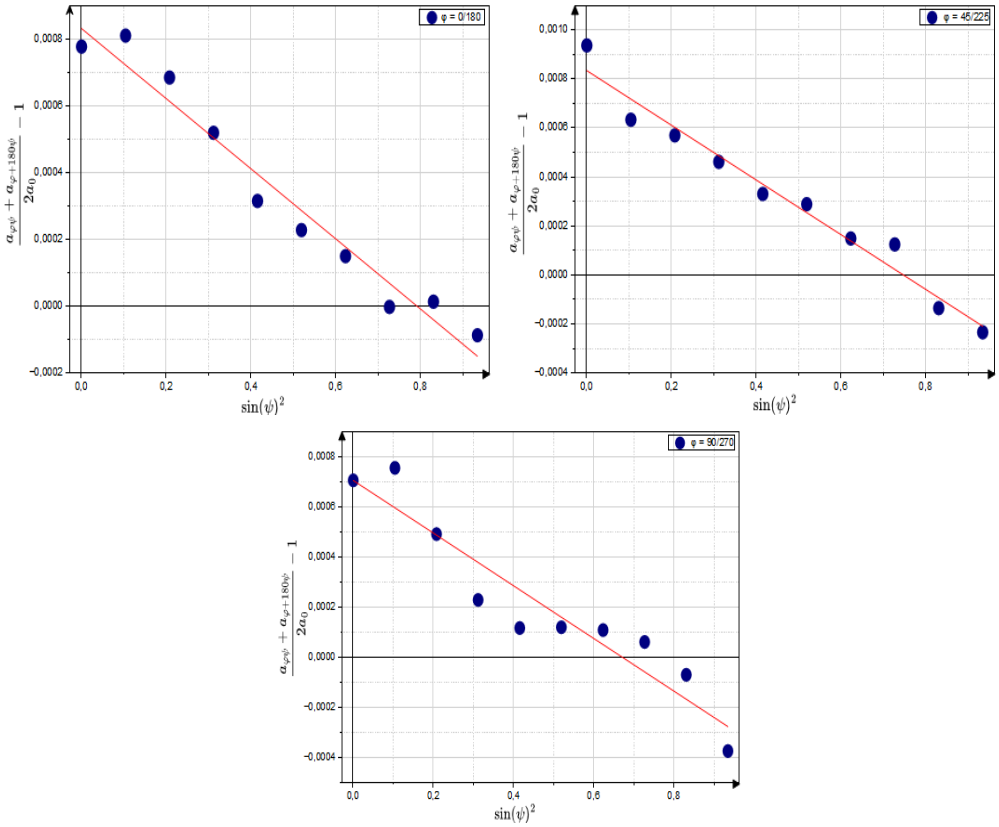


Рисунок 2 – Линейная зависимость параметра a_1 от $\sin^2\psi$ для Cu до обработки

Также были построены зависимости параметра a_2 от $\sin 2\psi$ для необработанной меди. На основании полученных данных рассчитаны компоненты тензора внутренних напряжений согласно представленным формулам (1). Расчет для образцов меди, модифицированных плазменным потоком, продемонстрировал изменение компонентов тензора внутренних напряжений, что указывает на повышение уровня дефектности модифицированного слоя.

Список литературы

1. Шиманский, В. И. Окисление циркониевого сплава, обработанного компрессионными плазменными потоками / В. И. Шиманский, В. В. Шевелёва, В. М. Асташинский, А. М. Кузьмицкий // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. – 2022. – № 4. – С. 93–101.

2. Углов, В. В. Остаточные напряжения в оксидно-упрочненных сталях, облученных высокоэнергетическими ионами висмута / В. В. Углов, В. А. Скуратов, С. В. Злоцкий // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014.
3. U.Welzel, J. Ligot, P. Lamparter, A. C. Vermeulen and E. J. Mittemeijer // Appl. Cryst. – 2005. – Vol. 38. – P. 1–29.

In this work, the possibility of measuring internal stresses in copper, before and after treatment with compression plasma streams, by X-ray diffraction was studied. The components of the internal stress tensor of copper are calculated by the method $\sin^2\psi$.

Киркоров Алексей Сергеевич, студент 4 курса Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, rrtrrrrffgfd@gmail.com.
Научный руководитель – *Шиманский Виталий Игоревич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики твердого тела и нанотехнологий Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, shymanskiv@mail.ru.

УДК 535.375.5

Е. В. КИЧКО

СПЕКТРЫ КР ЦИСТЕИНА В ВОДНОЙ СРЕДЕ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ pH

Проведено комплексное исследование колебательных спектров серосодержащей аминокислоты – цистеина – методами комбинационного рассеяния КР света и ИК Фурье-спектроскопии. Экспериментальные спектры сопоставлены с результатами литературных данных по отнесению колебательных полос, что позволило провести интерпретацию изменений, происходящих при вариации pH растворов.

L-цистеин ($C_3H_7NO_2S$) – классифицируется как условно незаменимая серосодержащая аминокислота, играющая ключевую роль в антиоксидантной защите и формировании третичной структуры белков. В данной работе рассматриваются структурные особенности цистеина, обусловленные наличием тиольной группы, и анализируются его спектроскопические маркеры. Особое внимание уделено зависимости частот колебаний от конформационного состояния молекулы.

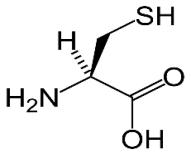


Рисунок 1 – Структурная формула цистеина [1]

Цистеин характеризуется уникальными физико-химическими параметрами, нетипичными для остальных аминокислот белковой природы, благодаря высокой реакционной способности сульфгидрильной (-SH) группы. Способность к обратимому окислению с образованием дисульфидных связей (-S-S-) определяет не только архитектуру биополимеров, но и метаболическую активность клетки. Изучение спектральных характеристик цистеина необходимо для мониторинга состояния белков и разработки сенсоров на его основе.

Анализ проводился для L-цистеина в кристаллическом состоянии и в водных растворах при различных значениях pH. Основные методы исследования: ИК Фурье спектроскопия и спектроскопия комбинационного рассеяния.

ИК-спектроскопия дает детальную информацию о функциональных группах остова аминокислоты, таких как аминогруппа NH_2 и карбоксильная группа COOH (рисунок 2).

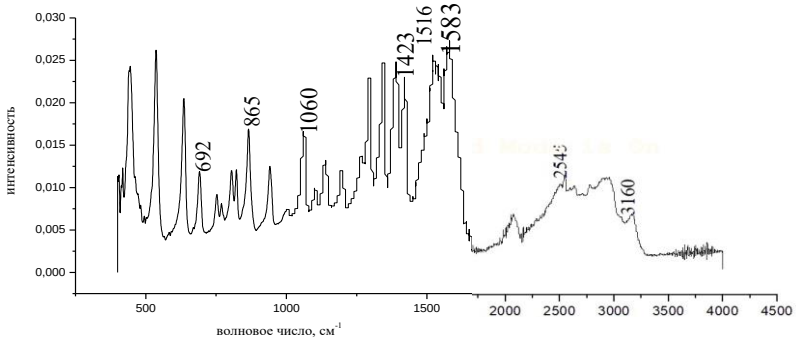


Рисунок 2 – ИК-спектр цистеина в кристаллическом состоянии

КР-спектроскопия особенно эффективна для анализа цистеина, так как она чувствительна к колебаниям связей сера-водород и сера-сера, которые часто проявляются слабо в ИК-спектрах (рисунок 3).

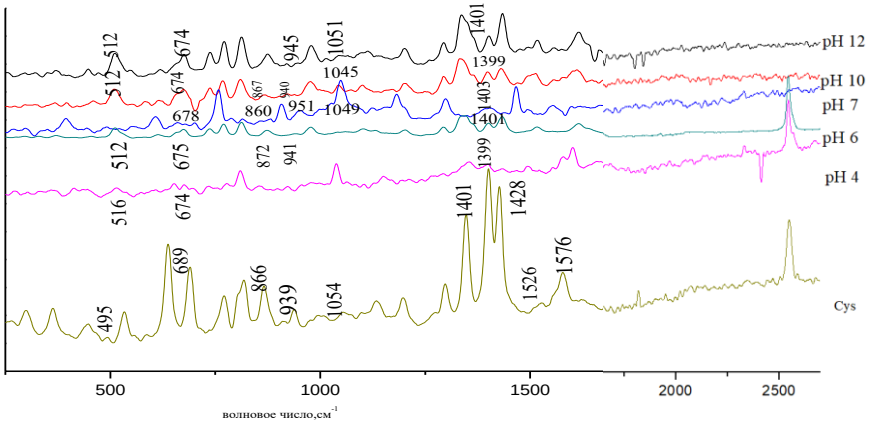


Рисунок 3 – КР спектры водных растворов цистеина с различным pH показателем для кислых и щелочных сред

В таблице 1 представлены основные частоты колебаний, соответствующие КР и ИК спектрам цистеина [2; 3; 4], как для кристаллического состояния, так и для водных растворов с разным показателем pH.

Таблица 1 – Интерпретация характеристических полос для ИК и КР L-цистеина

ИК Cys в кристалле, υ, $см^{-1}$	КР Cys в кристалле, υ, $см^{-1}$	КР р-ра, υ, $см^{-1}$ (pH = 4.01)	КР р-ра, υ, $см^{-1}$ (pH = 6.89)	КР р-ра, υ, $см^{-1}$ (pH = 7.0)	КР р-ра, υ, $см^{-1}$ (pH = 10.0)	КР р-ра, υ, $см^{-1}$ (pH = 12.0)	Группа
-	495	516	512	492	512	510	C-S
690	689	674	675	678	674	674	C-S
865	866	879	872	860	867	-	C-C
942	939	-	941	951	940	945	N-CH
1060	1054	1064	-	1049	1045	1051	C-H
1390	1401	1399	1401	1403	1399	1401	COO^-
1423	1428	1438	1431	-	1431	1433	CH_2
1516	1526	1523	1518	1523	1512	1518	NH_3^+
1583	1576	1579	-	-	1579	1577	NH_2
2545	2549	2544	2544	2547	-	-	S-H

Полоса υ~**500 $см^{-1}$** – это слабая полоса, часто относящиеся к валентным колебаниям скелета [5].

Пик ~**1516 $см^{-1}$** относится к асимметричному валентному колебанию NH_3^+. А пики, полученные при **~1399 $см^{-1}$**, были отнесены к асимметричному валентному колебанию, но уже COO^- группы. Деформационные колебания C-H наблюдаются при **~1060 $см^{-1}$**, а колебания C-C – при **~865 $см^{-1}$**. Моды при **~942 $см^{-1}$** и **~690 $см^{-1}$** представляют собой характерные валентные колебания растяжения N-CH и растяжения C-S соответственно, которые свидетельствует о существовании нескольких ротамеров в образце (что типично для жидких растворов). Данные полосы претерпевают значительные сдвиги из-за изменения заряда аминогруппы [4].

Полоса при υ~**1400 $см^{-1}$**, соответствующая симметричным валентным колебаниям карбоксилат-иона (COO^-), служит характерным маркером депротонированного состояния карбоксильной группы. В интервале pH 9.0–12.0, соответствующем депротонированию аминогруппы ($NH_3^+ \rightarrow NH_2$), положение данной полосы остается относительно инвариантным, что подтверждает сохранение ионизированного состояния карбоксильного фрагмента в сильнощелочной среде [6].

Ключевым спектральным маркерам ионизации L-цистеина является полоса **~2545 $см^{-1}$** валентных колебаний тиольной группы (S-H), исчезающая при депротонировании, что указывает на участие атома серы в образовании водородных связей, которые часто встречаются в кристаллических структурах [7].

Что касается спектра поглощения, то цистеин не относится к ароматическим аминокислотам (как тирозин или триптофан), поэтому его поглощение в ближнем УФ-диапазоне относительно невелико, основной максимум поглощения (λ_{max}) локализован в дальнем УФ-диапазоне при 204 нм. Данная полоса обусловлена электронными переходами $\pi \rightarrow \pi^*$ в карбоксильной группе [8; 9].

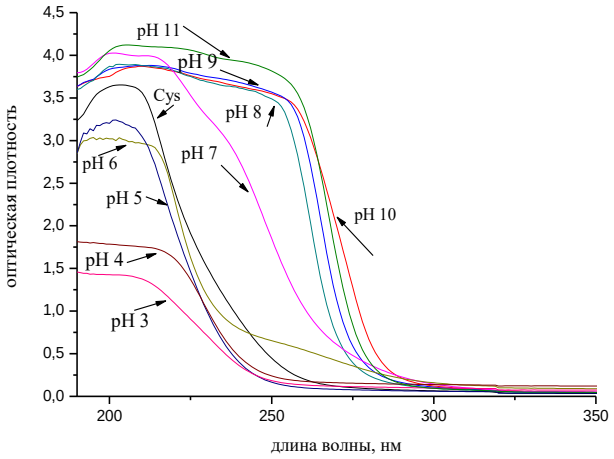


Рисунок 4 – Спектр поглощения цистеина в УФ области (С = 10^{-2} моль/л)

В области 230–260 нм можно зафиксировать слабое плечо (рис. 4), характерное для тиольной группы (-SH), которое проявляется в щелочных растворах. При депротонировани тиольной группы (при pH > 8.5) наблюдается значительный сдвиг и рост интенсивности поглощения в районе 240 нм (рис. 4).

Статья посвящена детальному анализу спектральных характеристик цистеина с использованием методов ИК- и КР-спектроскопии. Установлено, что метод КР-спектроскопии обладает более высокой чувствительностью к колебаниям серосодержащих фрагментов по сравнению с ИК-спектроскопией. Результаты работы имеют практическое значение для разработки методов экспресс-диагностики биомолекул и мониторинга окислительно-восстановительных процессов в живых системах.

Список литературы

1. Цистеин // Википедия: свободная энциклопедия. – URL: ru.wikipedia.org (дата обращения: 26.02.2025).

2. Raman spectroscopy of proteins / S. Stewart [et al.] // Progress in Biophysics and Molecular Biology. – 2000. – Vol. 75, iss. 1-2. – P. 1–57. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079610700000213 (дата обращения: 17.03.2026).

3. Тарасевич, Б. Н. ИК спектры основных классов органических соединений : справ. материалы / Б. Н. Тарасевич ; МГУ им. М. В. Ломоносова, хим. фак. – М., 2012. – 54 с. – URL: https://www.chem.msu.ru/rus/teaching/tarasevich/Tarasevich_IR_tables_29-02-2012.pdf (дата обращения: 17.03.2026).

4. De Gelder, J. Reference database of Raman spectra of biological molecules: PhD Thesis / Jeroen De Gelder ; Ghent University. – Ghent, 2007. – 216 p. – URL: https://cris.vub.be/ws/portalfiles/portal/96486793/82921727.pdf (дата обращения: 24.05.2024).

5. Zulkarnail, S. Characterization of L-cysteine sources using ATR-FTIR and Raman spectroscopy / S. Zulkarnail, T. Sani // Halalsphere. – 2021. – Vol. 1, № 1. – P. 37–46.

6. Pawlukoj, A. Cysteine: Neutron spectroscopy, Raman, IR and ab initio study / A. Pawlukoj, J. Leciejewicz, A. J. Ramirez-Cuesta, J. Nowicka-Scheibe // Spectrochimica Acta Part a Molecular & Biomolecular Spectroscopy. – 2005. – № 61 (11-12). – P. 2474–2481.

7. Pawlukojć, A. IR and Raman spectra of L-cysteine and L-cystine / A. Pawlukojć, J. Leciejewicz, A. J. Ramirez-Cuesta // Spectrochimica Acta Part A. – 2006. – Vol. 64, no. 1. – P. 11–18.

8. Chauhan, A. Spectrophotometric determination of L-Cysteine in pharmaceutical formulations / A. Chauhan, S. Singh, V. K. Singh // International Journal of Biology, Pharmacy and Allied Sciences (IJBPAS). – 2023. – Vol. 12, no. 8. – P. 3456–3468.

9. Robin, M. B. Higher Excited States of Polyatomic Molecules / M. B. Robin. – New York : Marcel Dekker, 1974.

This paper presents a comprehensive study of the vibrational spectra of the sulfur-containing amino acid cysteine using Raman scattering and Fourier transform infrared spectroscopy. The experimental spectra are compared with published data on the assignment of vibrational bands, enabling an interpretation of the changes that occur with varying solution pH.

Кичко Евгения Валентиновна, аспирант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Мотевич Инна Григорьевна*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

УДК 537.311.322

Д. А. КОВАЛЕНКО, М. А. БУНЕВИЧ, Д. В. ГОРБАЧЁВ

ЗАРЯДОПЕРЕНОС В ВЫПРЯМЛЯЮЩИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОКСИДНЫХ СТРУКТУРАХ С ПЕНТАОКСИДОМ НИОБИЯ

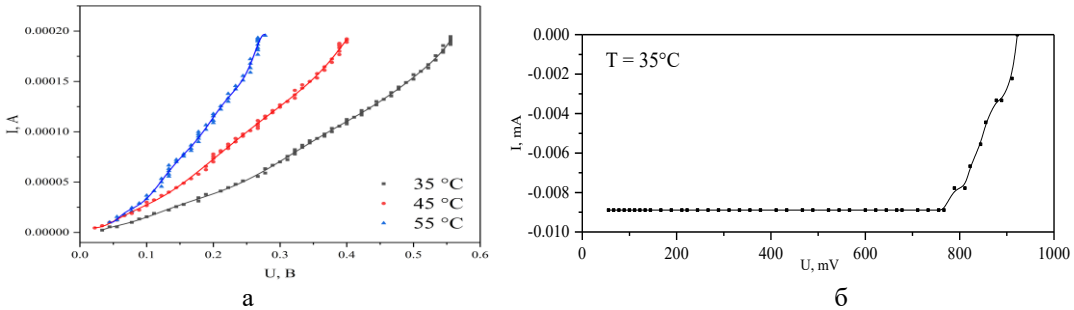
Исследованы ВАХ и механизмы переноса заряда в структурах $Al/Nb_2O_5/n^+$-Si. По результатам анализа ВАХ при температурах 35–55 °С установлено, что проводимость в слабых полях подчиняется закону Ома, а в средних полях доминируют токи, ограниченные пространственным зарядом. Закономерность изменения ВАХ с температурой подтверждает наличие локализованных состояний в виде ловушек электронов в запрещенной зоне пентаоксида ниобия.

В настоящее время изделия микроэлектроники служат основой для работы самых современных электронных устройств во многих областях – от коммуникаций, оборудования для автоматизации производств и авиации, до автомобилестроения и бытовой техники. Достичь такого уровня развития стало возможным благодаря совершенствованию технологии применения монокристаллического кремния, используемого как базовый элемент. В последнее время для разработки и изготовления электронных компонентов стали применяться и другие полупроводниковые материалы, одним из которых являются оксиды металлов с полупроводниковыми свойствами.

Достижения научно-технического прогресса привели к новым приложениям, где необходимо применение полупроводниковых материалов из оксидных материалов. Однако между технологиями традиционных полупроводников (Si, Ge, $A^{III}B^{V}$) и технологией оксидных полупроводников имеются большие различия. В случае первой технологии, основанной на полупроводниковых материалах, тип и концентрация носителей заряда определяются контролируемым введением соответствующих примесей (легирование или допирование), играющих роль донорных или акцепторных центров. В случае технологии оксидных полупроводников концентрация носителей заряда связана с образованием дефектов в их структуре на этапе их химического синтеза. Поэтому многие оксиды металлов даже без внешнего введения примесей многие оксиды проявляют заметную проводимость *n*- или *p*-типа. Это связано с низкими энтальпиями образования внутренних дефектов нестехиометрии – анионными (кислородными) или катионными вакансиями. Большинство оксидов бинарного состава показывают *n*-тип проводимости, благодаря тому, что энергия ухода кислорода в междоузельное пространство меньше энергии ухода катиона. Имеется также ряд оксидов (NiO, CuO, MnO_3) которые проявляют проводимость *p*-типа [1].

В настоящей работе выпрямляющая структура на основе барьера Шоттки формировалась с помощью низкотемпературного магнетронного напыления слоя *n*-Nb_2O_5 с контактом из Al на подложке из высоколегированного кремния n^+-типа. В этом случае контакт n-Nb_2O_5 с n^+ высоколегированным кремнием является омическим. Были изучены вольтамперные характеристики (ВАХ) при различных температурах и механизмы переноса заряда в таких структурах.

На рисунке 1 показаны кривые ВАХ структуры сильнолегированный кремний (n^+) / оксид ниобия / алюминий, измеренные в диапазоне температур 35–55 °С. Как видно из рисунка, все ВАХ кривые показывают нелинейное поведение, что характерно для протекания тока с Шоттки выпрямляющим контактом. При прямом смещении с напряжением около 700 мВ появляется ток, который с увеличением напряжения начинает изменяться по экспоненциальному закону.



а б

Рисунок 1 – Вольтамперные характеристики структуры сильнолегированный кремний (n^+) / оксид ниобия / алюминий, измеренные в диапазоне температур 35–55 °С при прямом (а) и обратном смещении (б)

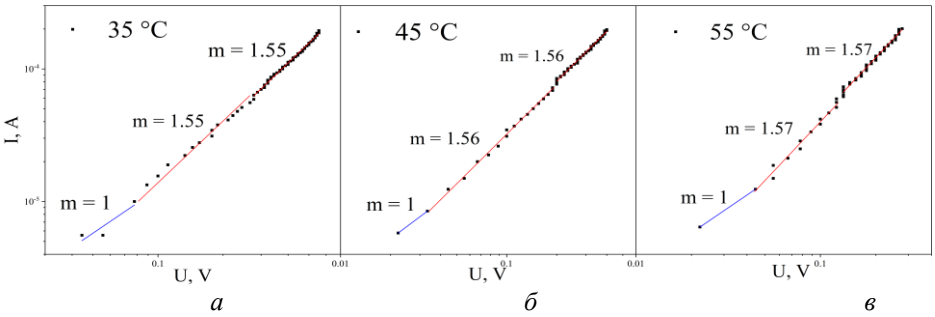
В свою очередь, если напряжение меньше 700 мВ, то в МДМ наноструктуре протекает уже незначительный остаточный ток. При этом даже при больших изменениях напряжения остаточный ток не изменяется.

Нелинейность ВАХ вызвана формированием обедненного слоя в приконтактной области оксида ниобия. Поэтому при рассмотрении токовых кривых ВАХ можно ограничиться только областью контакта алюминий/оксид ниобия, где возникает потенциальный барьер Шоттки.

Как видно из рисунка 1 для значений температур 35, 45 и 55 °С имеет место сильная зависимость ВАХ от температуры, что характерно для токов ограниченного пространственного заряда (ТОПЗ), так как степень заполнения ловушек зависит от температуры [2].

Поведение ВАХ в прямом и обратном направлении можно объяснить следующим образом. В отсутствие внешнего напряжения, энергия в глубине оксида ниобия понижается относительно сильно легированного полупроводника. В равновесии ток электронов, проходящий из оксида ниобия в полупроводник равен току электронов, проходящих из полупроводника в оксид ниобия, что соответствует нулевому полю. При минусе на оксиде ниобия, потенциальный барьер в оксиде уменьшается на величину eU. В случае достижения напряжения около 700 мВ, потенциальный барьер уменьшается до такой величины, что ток со стороны полупроводника начинает увеличиваться. В то же время ток со стороны оксида не изменяется, так как имеется барьер со стороны полупроводника. Как следствие, возникает ток, текущий от полупроводника к оксиду, который быстро увеличивается при увеличении напряжения. Если напряжение меньше 700 мВ, то потенциальный барьер Шоттки в оксиде увеличивается, а ток из оксида уменьшается. В этом случае электроны из оксида почти не могут преодолеть потенциальный барьер, и поэтому обратный ток не зависит от внешнего напряжения.

Определить основной механизм проводимости можно с помощью построения ВАХ в координатах, позволяющих выделить линейные участки, которые соответствуют определенному механизму проводимости. На рисунке 2 показаны кривые ВАХ структуры сильнолегированный кремний (n^+)-оксид ниобия измеренные в диапазоне температур 35–55 °С в логарифмических координатах.



а *б* *в*

Рисунок 2 – Вольтамперные характеристики структуры сильнолегированный кремний (n^+)-оксид ниобия, измеренные в диапазоне температур 35–55 °С, в логарифмических координатах при различных температурах: а) 35 °С; б) 45 °С; в) 55 °С

Как видно из рисунка 2, вне зависимости от температуры образцов на прямых ВАХ можно выделить два участка, каждый из которых описывается линейной зависимостью тока от напряжения $I \infty U^m$. Первый участок имеет угол наклона $m = 1$. На втором участке угол наклона составляет $m = 1{,}55$. Первый участок с $m = 1$, это область слабых полей, когда проводимость еще не зависит от электрического поля и описывается законом Ома. Второй участок с $m = 1{,}55$, это область средних полей, где проводимость определяется инжекционными токами, которые ограниченны пространственным зарядом (ТОПЗ). Как известно в пленках оксида ТОПЗ обычно наблюдаются при невысоких (не более 400К) температурах и электрических полях не превышающих 10^6 В/см. Механизм ТОПЗ связан с наличием в запрещенной зоне оксида ловушечных уровней.

С помощью построения ВАХ в координатах, позволяющих выделить линейные участки с определенным механизмом проводимости, были проанализированы ВАХ на этих участках для нахождения механизма проводимости. Проведенный анализ механизмов проводимости показал, что пентооксид ниобия Nb2O5, полученный методом магнетронного распыления, является полупроводником n-типа, в запрещенной зоне которого имеются локализованные состояния в виде электронных ловушек. Рассмотрение ВАХ, выявило, что механизм проводимости пленки Nb_2O_5 определяется ТОПЗ. ВАХ на омическом и ТОПЗ участке описывается степенной зависимостью тока от напряжения $I \infty U^m$.

Список литературы

1. Thickness-dependent electronic structure and morphology of ultrathin Nb_2O_5 films on metal substrates / S. Chen [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2020. – Vol. 53, no. 12. – P. 125304.

2. Conduction mechanisms and nitrogen doping of atomic layer deposited Nb_2O_5 for MIM capacitors / G. Lupina [et al.] // Microelectronic Engineering. – 2012. – Vol. 96. – P. 32–36.

Charge transfer mechanisms in $Al/Nb_2O_5/n^+$-Si structures have been studied. I-V analysis at 35–55°C shows Ohmic conduction at low fields and space-charge-limited currents (SCLC) at medium fields. The temperature dependence confirms the presence of trap levels in the niobium pentoxide band gap.

Коваленко Данила Андреевич, НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, kavalenka.d.a@gmail.com.

Буневич Михаил Алексеевич, НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, bunevich@bsuir.by.

Горбачев Дмитрий Владимирович, кафедра ИСиТ, Институт информационных технологий БГУИР, Минск, Республика Беларусь, d.gorbachev@bsuir.by.

Научный руководитель – *Врублевский Игорь Альфонсович*, кандидат технических наук, доцент, НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, vrublevsky@bsuir.edu.by.

УДК 539.216.2:546.26:543.424

Д. А. КОВАЛЕНКО, Д. В. ГОРБАЧЁВ, М. С. Х. АЛЬ-МАХДАВИ

ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ГРАФИТОПОДОБНЫХ НАНОКЛАСТЕРОВ В ПЛЁНКАХ УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ

Методом Рамановской спектроскопии исследованы углеродные пленки, полученные электронно-лучевым испарением. Установлено формирование графитоподобных нанокластеров в алмазоподобной матрице. На основе анализа соотношения интенсивностей пиков D и G с использованием формулы, предложенной для нанокристаллического графита, оценены латеральные размеры sp^2-кластеров, составившие 13,5 нм.

Углерод занимает особое место среди химических элементов благодаря своей уникальной способности образовывать разнообразные структурные формы. Это явление, известное как аллотропия, обусловлено возможностью существования атомов углерода в различных электронных конфигурациях – sp, sp^2 и sp^3 типах гибридизации.

В зависимости от типа гибридизации и условий формирования, углерод может образовывать материалы с кардинально различающимися физико-химическими свойствами.

Классическими примерами аллотропных модификаций углерода являются алмаз и графит. Алмаз, в котором реализуется исключительно sp^3-гибридизация, характеризуется высокой твердостью, химической инертностью и является диэлектриком. Графит, состоящий из sp^2-гибридизированных атомов, напротив, обладает хорошей электропроводностью, но отличается низкой твердостью и механической прочностью. Каждый из этих материалов находит свое применение, однако использование природного алмаза ограничено его высокой стоимостью, а свойства графита не всегда удовлетворяют требованиям современных технологий. Возможность контролируемого изменения соотношения sp^2- и sp^3-гибридизированных атомов углерода в синтезируемых материалах открывает широкие перспективы для создания новых структур с заданными характеристиками. Особый интерес в этом направлении представляют тонкопленочные углеродные покрытия.

Графитоподобные углеродные пленки привлекают значительное внимание благодаря уникальному сочетанию свойств: однокомпонентному составу, проводимости *p*-типа и неоднородной диэлектрической структуре, формируемой проводящими включениями графитоподобных нанокластеров. Проводимость *p*-типа делает такие пленки перспективным материалом для дырочно-транспортных слоев в фотоэлектрических устройствах и солнечных элементах.

Как показано в работе [1], структура данных пленок представляет собой двухфракционную систему, состоящую из алмазоподобной диэлектрической матрицы (sp^3-гибридизация углерода) и проводящих графитоподобных нанокластеров (sp^2 -гибридизация). Размер sp^2 -кластеров не превышает нескольких нанометров.

Целью данной работы является изучение графитоподобных нанокластеров в пленках углерода полученных электронно-лучевым испарением в вакууме.

В работе тонкие графитоподобные углеродные пленки (~50,0 нм) осаждались в вакууме на кремниевую подложку (111) с термическим слоем SiO_2 (для рамановской спектроскопии) методом электронно-лучевого испарения. После осаждения пленки отжигали в вакууме при 973 *K* в течение 9 мин. (давление в камере 5×10^{-5} Па). Структуру полученных образцов изучали с помощью рамановской спектроскопии. Рамановские спектры регистрировали при комнатной температуре с использованием сканирующего лазерного конфокального микрорамановского спектрометра с аргоновым ионным лазером с длиной волны 473 нм и дифракционной решеткой с 600 линиями/мм. Спектры регистрировали в геометрии обратного рассеяния с использованием объектива 40× с лазерным лучом диаметром 300 нм, сфокусированным на плоскости образца. Время накопления сигнала для каждого образца составляло 5 с.

Полученные в различных режимах синтеза пленки углерода исследовали методом спектроскопии комбинационного рассеивания. Оценка соотношения sp^2/sp^3 гибридизации в исследуемых пленках углерода проводилась на основе анализа соотношения I_D/I_G и смещения положения пика *G* [2; 3]. На рисунке 1 показаны Раман-спектры пленок, сформированных электронно-лучевым испарением и после термообработки (800 °С – 20 сек.) в интервале рамановского сдвига от 1100 до 1800 см$^{-1}$. Полученные спектры показывают, что в образцах присутствуют характерные пики (*D*, *G*-пики), указывающие на формирование графитсодержащих включений в пленках углерода. Как видно из рисунка 1, после термообработки при 800 °С наблюдается превалирование интенсивности *G*-пика над *D*-пиком. При этом имеет место сдвиг полосы *G* в сторону больших частот при температуре отжига 800 °С, что указывает на увеличение sp^2 -гибридизированно связанного углерода.

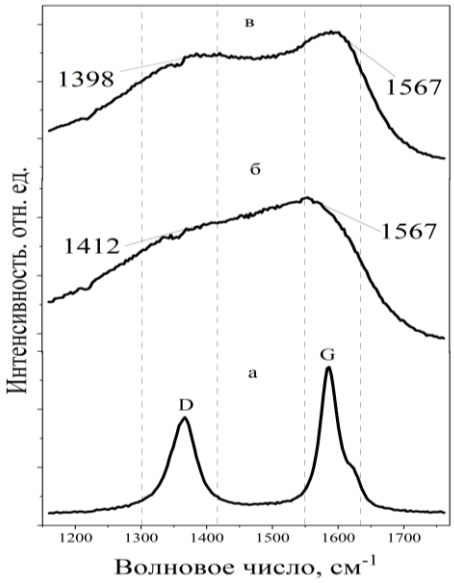


Рисунок 1 – Рамановский спектр исходного графита (а) и графитоподобных пленок углерода после осаждения (б) и термической обработки (в)

Отношение интегральных интенсивностей основных пиков (I_D/I_G) из спектров КРС позволяют оценить латеральные размеры sp^2 -нанокластеров графита. На рисунке 2 показано разложение спектров КРС углеродных пленок до и после вакуумной термообработки на два отдельных гауссиана.

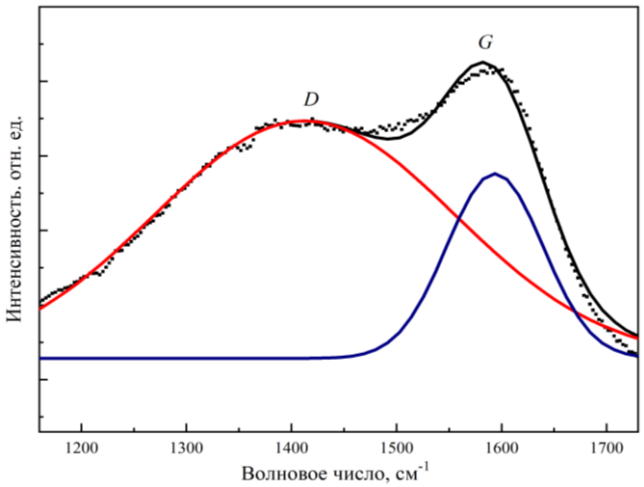


Рисунок 2 – Рамановский спектр графитоподобных плёнок углерода после осаждения и термической обработки и их разложение на два гауссиана

Полученные количественные показатели гауссианов такие как отношение амплитуд, положение максимумов и полуширина спектров приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты разложения рамановских спектров углеродных пленок на гауссианы для пиков *D* и *G* и оценки размеров областей графитоподобных кластеров (*l*)

Тип пленки	Пик *D*, см$^{-1}$		Пик *G*, см$^{-1}$		I_D/I_G	*l*, нм
	ν	ПШПВ	ν	ПШПВ		
После осаждения	1398	286	1567	121	0,892	13,4
После отжига	1412	285	1594	91	0,886	13,5

Примечание: ПШПВ – полная ширина пика на половине высоты.

Результаты свидетельствуют, что после отжига отношение пиков I_D/I_G уменьшается.

Результаты отношений *D* и *G*-пиков из таблицы 1 позволили определить l по формуле (1) [4]:

$$l(nm) = \frac{2,4\times10^{-10}\times\lambda^4}{I_D/I_G}, \quad (1)$$

где I_D/I_G – отношение пиков интенсивностей *D* и *G* соответственно, λ – длина волны лазерного излучения источника (473 нм). В таблице 1 приведены полученные значения латеральных размеров (l) sp^2 – нанокластеров (доменов) графита, которые для подложки со слоем SiO_2 были равны 13,5 нм.

Таким образом, результаты исследований методом рамановской спектроскопии показали, что после вакуумного осаждения образуется аморфная пленка графитоподобного углерода. После вакуумного отжига с температурой 800 °С в графитоподобной пленке углерода на подложке со слоем SiO_2 формировались нанокластеры графита размерами 13,5 нм.

Список литературы

1. Chu, P. K. Characterization of amorphous and nanocrystalline carbon films / P. K. Chu, L. Li // Materials chemistry and physics. – 2006. – Т. 96, № 2-3. – С. 253–277.

2. Ferrari, A. C. Resonant Raman spectroscopy of disordered, amorphous, and diamondlike carbon / A. C. Ferrari, J. Robertson // Physical review B. – 2001. – Т. 64, № 7. – С. 075414.

3. Raman spectrum of graphene and graphene layers / A. C. Ferrari [et al.] // Physical review letters. – 2006. – Т. 97, № 18. – С. 187401.

4. General equation for the determination of the crystallite size La of nanographite by Raman spectroscopy / L. G. Cançado [et al.] // Applied physics letters. – 2006. – Т. 88, № 16. – С. 163106.

Carbon films obtained by electron-beam evaporation were studied by Raman spectroscopy. The formation of graphite-like nanoclusters in a diamond-like matrix was established. Based on the analysis of the D and G peaks intensity ratio using the formula proposed for nanocrystalline graphite, the lateral dimensions of sp²-clusters were estimated and amounted to 13.5 nm.

Коваленко Данила Андреевич, НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, kavalenka.d.a@gmail.com.

Аль-Махдави Мустафа Сабах Халил, кафедра защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, musdito@yandex.by.

Горбачев Дмитрий Владимирович, кафедра ИСиТ, Институт информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, d.gorbachev@bsuir.by.

Научный руководитель – *Врублевский Игорь Альфонсович*, кандидат технических наук, доцент, НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, vrublevsky@bsuir.edu.by.

УДК 539.2:537.226:53.092

Н. В. КОРОСТИК, В. Ю. РАДЮШ

СИНТЕЗ ПЕРОВСКИТОВ В СИСТЕМЕ ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ (1-x)$BiFeO_3$ – x$(KBi)_{1/2}TiO_3$

Показано, что в системе (1-x)$BiFeO_3$ – x$(KBi)_{1/2}TiO_3$ образуется непрерывный ряд твердых растворов с искаженной перовскитной структурой. Характер искажения кристаллической решетки зависит от состава.

Известно, что феррит висмута ($BiFeO_3$) является перспективным мультиферроиком, который проявляет дипольное и магнитное упорядочение [1]. Кристаллическая решетка $BiFeO_3$ при комнатной температуре соответствует полярной ромбоэдрически искаженной структуре перовскита *R*3*c*. Соединение $(KBi)_{1/2}TiO_3$ является сегнетоэлектриком с тетрагонально искаженной перовскитной структурой *P*4*bm* [2].

Целью работы являлось определение условий синтеза перовскитов-мультиферроиков в системе твёрдых растворов (1-x)$BiFeO_3$ – x$(KBi)_{1/2}TiO_3$, установление закономерностей изменения их структурных характеристик в зависимости от состава.

Фазовый состав синтезированных образцов определялся по результатам рентгенофазового анализа В работе использовался рентгеновский дифрактометр ДРОН-3 с монохроматизированным CuK_α -излучением.

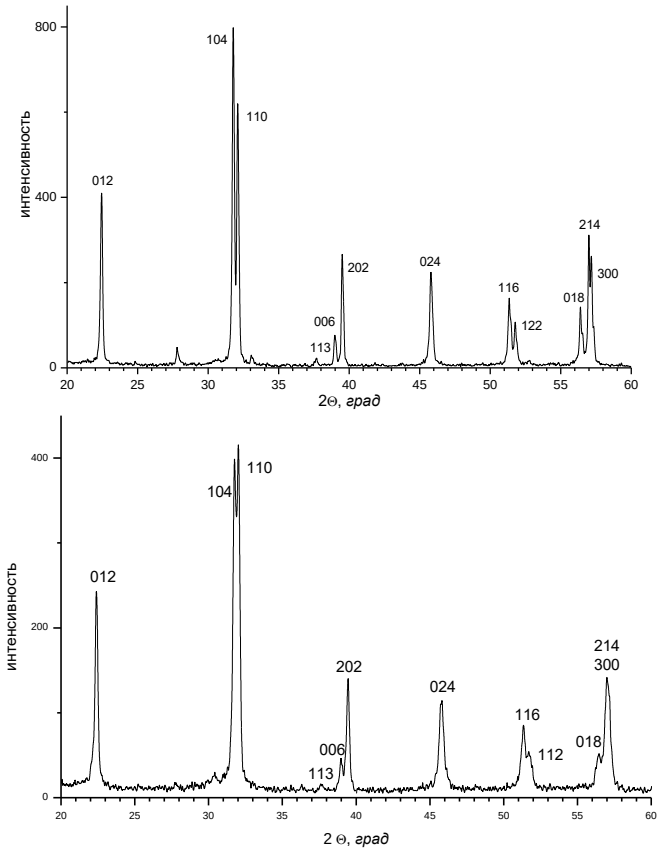
Синтез твёрдых растворовсистемы (1-x)$BiFeO_3$-$x$$(KBi)_{1/2}TiO_3$ в условиях термической обработки смесей порошков исходных оксидов Bi_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2 и карбоната K_2CO_3 при нормальном давлении (вариант 1), а также смесей порошков Bi_2O_3, Fe_2O_3 и $(KBi)_{1/2}TiO_3$ (вариант 2). Для приготовления смесей по варианту 2 предварительно синтезировано соединение $(BiK)_{1/2}TiO_3$ из оксидов Bi_2O_3, TiO_2 и карбоната K_2CO_3. Синтез твердых растворов из смеси порошков по варианту 2 проводился как по обычной керамической технологии, так и при высоких давлении и температуре [3].

Исследован фазовый состав образцов указанной системы разного состава, полученных как по обычной керамической технологии, так и в условиях высоких давлений. Для составов $x > 0.4$ определены оптимальные условия двухстадийного получения керамики из смеси исходных реагентов по варианту 1 при нормальном давлении. На первой стадии смесь исходных оксидов и карбоната заданного состава проходила термообработку вначале при температуре 600 – 650 ºС, при которой происходит химическое взаимодействие реагентов с разложением карбоната калия, а затем при температуре выше 900 ºС, при которой образуется твердый раствор. Из смеси, прошедшей указанную термообработку, готовилась шихта для второго этапа синтеза, который проводился при температурах, обеспечивающих протекание твердофазных реакций и спекания керамики.

Для составов с $x < 0.4$ для синтеза использовалась смесь оксидов Bi_2O_3, Fe_2O_3 и соединение $(KBi)_{1/2}TiO_3$ (смесь по варианту 2). Применение такой смеси исключало образование промежуточных фаз ($Bi_{25}FeO_{40}$, $Bi_2Fe_4O_{12}$) в процессе термической обработки. Определены условия образования керамики твердых растворов на основе $BiFeO_3$ в исследуемой системе.

Показано, что в системе (1-x)$BiFeO_3$-$x$$(KBi)_{1/2}TiO_3$ существует непрерывный ряд твердых растворов со структурой перовскита. Характер и степень искажения кристаллической решетки данных перовскитов зависит от состава. На рисунке 1 для иллюстрации представлены рентгеновские дифракционные спектры для керамики (1-x)$BiFeO_3$-$x$$(BiK)_{1/2}TiO_3$ с содержанием x = 0, 0.2, 0.6 и 0.8.

а



б

Рисунок 1 – Участоки рентгеновских дифракционных спектров твёрдых растворов системы (1-x)$BiFeO_3$-$x$$(BiK)_{1/2}TiO_3$ при x = 0 (а), 0.2 – (б). Цифрами обозначены индексы миллера линий перовскита

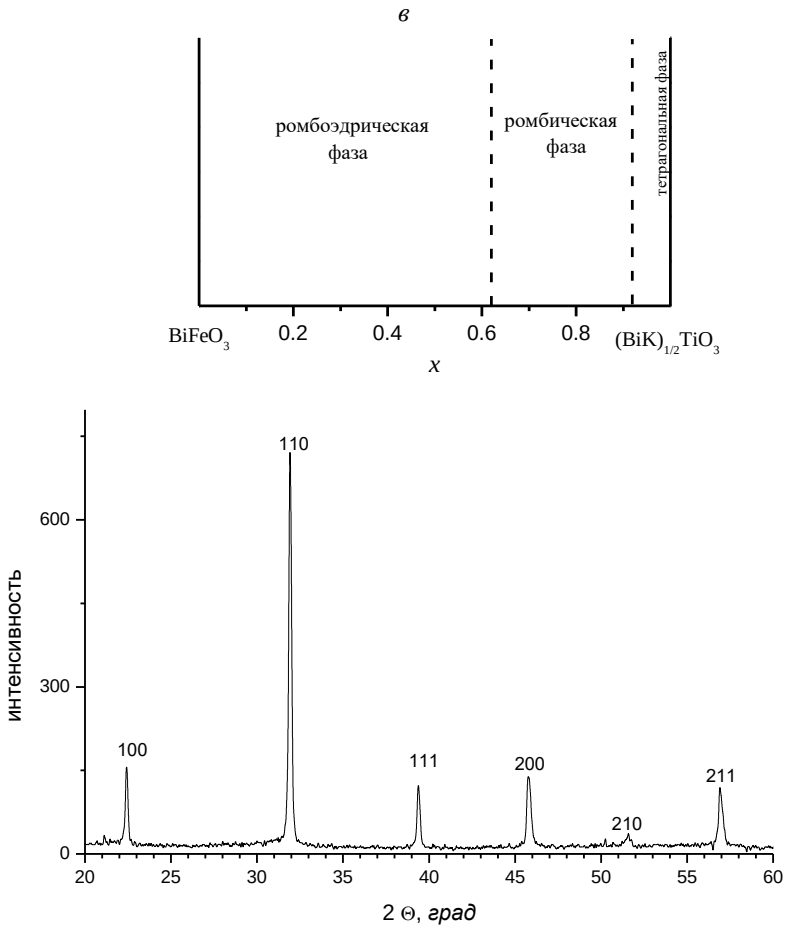


Рисунок 1 – Участоки рентгеновских дифракционных спектров твёрдых растворов системы $(1\text{-}x)BiFeO_3\text{-}x(BiK)_{1/2}TiO_3$ при 0.6 – (в), 0.8 – (г). Цифрами обозначены индексы миллера линий перовскита

Выявлены и оценены области существования фаз с ромбоэдрической, ромбической и тетрагональной структурами (рисунок 2). Показано, что в данной системе твердых растворов имеют место два концентрационных фазовых перехода. Один из них относится к переходу фазы с ромбоэдрической структурой в фазу с ромбической структурой. Второй – к переходу фазы с ромбической структурой в фазу с тетрагональной структурой. Составы, при которых происходят данные переходы, лежат соответственно в областях $0.60 < x < 0.65$ и $0.90 < x < 0.95$.

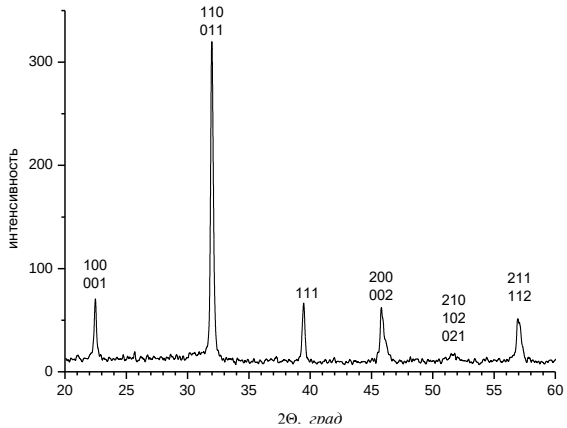


Рисунок 2 – Области существования фаз с ромбоэдрической, ромбической и тетрагональной структурой твёрдого раствора $(1\text{-}x)BiFeO_3\text{-}x(BiK)_{1/2}TiO_3$ при комнатной температуре

На рисунке 3 приведена зависимость параметра приведённой ячейки от концентрации.

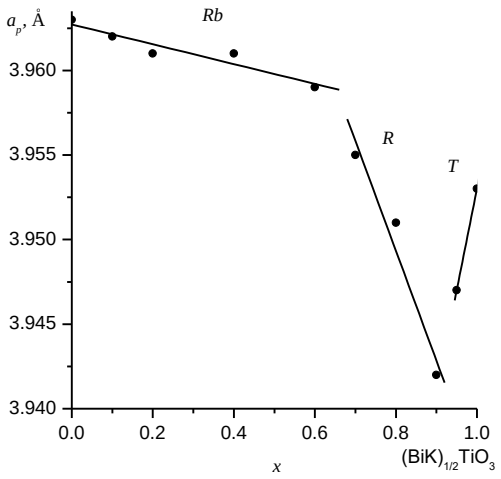


Рисунок 3 – Концентрационная зависимость параметра приведенной ячейки для твёрдого раствора $(1\text{-}x)BiFeO_3\text{-}x(BiK)_{1/2}TiO_3$ при комнатной температуре (*Rb* – ромбоэдрическая, *R* – ромбическая, *T* – тетрагональная фазы)

Из рисунка 3 видно, что фазовые переходы сопровождаются резкими изменениями приведённого параметра кристаллической решётки.

Список литературы

1. Eerenstein, W. Multiferroic and Magnetoelectric Materials / W. Eerenstein, N. D. Mathur, J. F. Scott // Nature. – 2006. – Vol. 442. – P. 759–765.

2. Isupov, V. A. Ferroelectric $Na_{0.5}Bi_{0.5}TiO_3$ and $K_{0.5}Bi_{0.5}TiO_3$ Perovskites and Their Solid Solutions / V. A. Isupov // Ferroelectrics. – 2005. – Vol. 315. – P. 123–147.

3. Мазуренко, А. М. Устройство для физико-химических исследований при высоких давлениях и температурах / А. М. Мазуренко. – М. : Наука, 1978. – С. 144–147.

It has been shown that a continuous series of solid solutions with a distorted perovskite structure forms in the system $(1\text{-}x)BiFeO_3 – x(KBi)_{1/2}TiO_3$. The nature of the lattice distortion depends on the composition.

Коростик Никита Вадимович, студент 4 курса Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь.

Радюш Владислава Юрьевна, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Радюш Юрий Владимирович*, кандидат физико-математических наук, доцент, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, radyush@physics.by.

УДК: 538.955, 54.057,54-165.2,544.654.2

А. Н. КОТЕЛЬНИКОВА, В. А. ФЕДЬКИН, О. Д. КАНАФЬЕВ,
И. А. ГРЕКОВ, Т. И. ЗУБАРЬ, А. В. ТРУХАНОВ

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПАРАМЕТРОВ ТОКА НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПЛЁНОК В СИСТЕМЕ NiFeCu, ОСАЖДЁННЫХ ИЗ КОМБИНИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОЛИТА

Рассмотрено влияние комплексообразующих добавок и потенциала тока на процесс совместного осаждения Ni, Fe и Cu из комбинированного (совместного) электролита. Проанализировано их влияние на кинетику осаждения и химический состав сплавов Cu и NiFeCu.

Многослойные структуры на основе чередующихся ферромагнитных и диамагнитных слоёв активно применяются в качестве компонентов датчиков магнитных полей, устройств записи и хранения магнитной информации и электромагнитных экранов [1]. Электрохимическое осаждение из комбинированного электролита, содержащего и ферромагнитные и диамагнитные частицы, позволяет синтезировать многослойные структуры за счёт осаждения ферромагнитных и диамагнитных слоёв при различных (пониженных и повышенных) потенциалах, либо плотностях тока [2]. Однако комплексное влияние множества параметров осаждения препятствует контролируемому синтезу материалов с желаемыми характеристиками.

Ферромагнитные сплавы NiFe и многослойные структуры на их основе обладают весьма ценными, уникальными магнитными и физическими свойствами [3]. Такие факторы, как методика синтеза и его условия оказывают определяющее влияние на химический состав и структуру сплава, которые непосредственно коррелируют с его физическими характеристиками. Изменение параметров тока, температуры электролита, интенсивности перемешивания позволяет управлять, как химическим составом, так и зеренной структурой сплава NiFe. Таким образом, комплексное исследование влияния условий электроосаждения из комбинированного электролита позволит расширить диапазон физико-химических характеристик однослойных и многослойных плёнок на основе сплавов NiFe и Cu [4].

Таблица 1 – Константы устойчивости комплексных соединений

Лиганды	Центр. ион	lg β_1	lg β_2
C_9H_7NO (8-оксихинолин)	Fe^{2+}	8,58	16,93
	Ni^{2+}	9,91	21,38
	Cu^{2+}	12,2	23,4
$C_7H_6O_6S$ (сульфосалициловая кислота)	Fe^{2+}	5,90	-
	Ni^{2+}	6,42	10,24
	Cu^{2+}	9,52	16,45
$CS(NH_2)_2$ (тиокарбамид)	Fe^{2+}	4,33	-
	Ni^{2+}	5,18	1.64
	Cu^{2+}	8,11	11,28

Для нашего исследования мы выбрали многослойную пленочную систему NiFe/Cu на основе чередующихся слоев ферромагнитного пермаллоевого сплава NiFe и диамагнитных слоев Cu. Сплавы NiFe нашли применение в электронной промышленности, для записи и хранения информации в компьютерах и других областях техники благодаря своим ценным магнитным свойствам [5]. Их используют в качестве функциональных магнитных материалов в устройствах магнитной записи, датчиках магнитного поля, устройствах на основе эффекта магнитной близости, устройствах на основе спинового эффекта Холла, электромагнитных экранах и т. д.

Для уменьшения содержания соосаждаемой примеси Cu в слоях NiFe за счет влияния комплексообразующих добавок на процесс соосаждения в системе NiFeCu были приготовлены четыре электролита с различными комплексообразователями и из них были осаждены образцы однослойных пленок Cu и NiFe.

Выбор тиокарбамида (тиомочевины), 8-оксихинолина и сульфосалициловой кислоты в качестве комплексообразующих добавок обусловлен тем, что их комплексные соединения с ионами Cu^{2+} более устойчивы чем их комплексные соединения с Ni^{2+} и Fe^{2+} (имеют более высокие значения константы образования β согласно таблице 1 [6]).

При этом все три вещества применяются в качестве добавок при синтезе функциональных материалов. Так например тиокарбамид используется при электроосаждении сплавов на основе никеля и железа для уменьшения размера зерен и блескообразования. 8-оксихинолин применяется в качестве ингибитора коррозии при модификации поверхности сплавов на основе алюминия, железа-вольфрама. Сульфосалициловая кислота также применяется в качестве гальванической добавки при электроосаждении многих систем (сплавов CoPd и FePd, NiFe и иных).

Таким образом были приготовлены следующие электролиты: исходный электролит A, электролит B с добавлением тиокарбамида, C с добавлением 8-оксихинолина, D с добавлением сульфосалициловой кислоты (составы представлены в таблице 2).

Для исследования кинетики процессов осаждения сплава NiFe и меди из комбинированного электролита использовался потенциостат-гальваностат P-45X. В качестве анода использовался серебряный электрод (посеребрённая Pt проволока). В качестве электрода сравнения использовался хлорсеребряный AgCl/Ag электрод в насыщенном растворе KCl. Для снятия катодных поляризационных кривых в программаторе потенциостата был выбран режим линейной развёртки от 0 до –1400 мВ со скоростью развёртки 5 мВ/с и шагом развёртки 0,2 мВ.

Согласно полученным поляризационным кривым, добавление комплексообразующих добавок в скорректированный электролит повлияло на кинетику осаждения сплавов NiFe и Cu следующим образом. Было обнаружено смещение поляризационной кривой в более положительную область для электролита C (содержащего 8-оксихинолин) по сравнению с исходным электролитом A. В то время как для электролитов D и B, содержащих сульфосалициловую кислоту и тиокарбамид соответственно, было обнаружено смещения поляризационных кривых в более отрицательную область.

Таблица 2 – Составы электролитов для электрохимического осаждения

Электролит	A		B		C		D	
Объём, л	2		2		2		2	
Компонент	Масса, г	Концентрация, г/л	Масса, г	Концентрация, г/л	Масса, г	Концентрация, г/л	Масса, г	Концентрация, г/л
$NiSO_4 \cdot 7H_2O$	560	280	560	280	560	280	560	280
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	26	13	26	13	26	13	26	13
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	4	2	4	2	4	2	4	2
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	180	90	180	90	180	90	180	90
H_3BO_3	60	30	60	30	60	30	60	30
$C_7H_5NO_3S$	4	2	4	2	4	2	4	280
$CS(NH_2)_2$	-	-	1,22	0,61	-	-	-	-
C_9H_7NO	-	-	-	-	2,32	1,16	-	-
$C_7H_6O_6S$	-	-	-	-	-	-	3,49	1,75

Параметры осаждения образцов представлены в таблице 3.

Анализ химического состава поверхности образцов A-0, B-0, C-0 и D-0 методом рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии (рисунок 3*а*) показал, что во всех случаях были осаждены плёнки Cu. Вариация комплексообразующих добавок и потенциалов осаждения не оказали влияния на химический состав плёнок Cu. В связи с малыми толщинами плёнок меди на спектрах, представленных на рисунке 2, также присутствуют пики от кремниевой подложки и проводящего подслоя золота.

Таблица 3 – Параметры осаждения плёнок в системе NiFeCu

Электролит	Образец	U_1, В	t_1, с
A (Исходный)	A – 0	-0,4	300
	A – 1	-1,1	120
	A – 2	-1,2	120
	A – 3	-1,3	120
B (Тио-мочевина)	B – 0	-0,4	300
	B – 1	-1,1	120
	B – 2	-1,2	120
	B – 3	-1,3	120
C (8-окси-хинолин)	C – 0	-0,4	300
	C – 1	-1,1	120
	C – 2	-1,2	120
	C – 3	-1,3	120
D (Сульфо-салициловая к-та)	D – 0	-0,4	300
	D – 1	-1,1	120
	D – 2	-1,2	120
	D – 3	-1,3	120

Исходя из экспериментальных катодных поляризационных кривых на рисунке 1 были выбраны следующие оптимальные диапазоны потенциала для осаждения однослойных плёнок сплава NiFe –1,1 – –1,3 В и плотность тока, для однослойных плёнок Cu -0,4 В.

Подложками для электрохимического осаждения однослойных плёнок на основе сплавов NiFe и Cu служили пластины кремния Si (100) размером 1×2 см с напылённым слоем золота Au.

В ходе осаждения температура электролитов поддерживалась на уровне 35 °C, а pH – на уровне 2,4. Для перемешивания электролитов использовался барботаж воздухом.

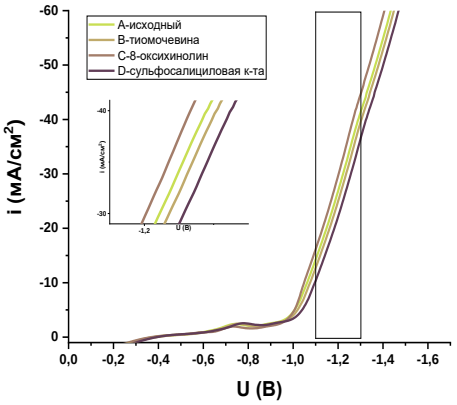


Рисунок 1 – Поляризационные кривые электролитов

Анализ химического состава поверхности образцов A-1 – A-3, B-1 – B-3, C-1 – C-3, D-1 – D-3, осажденных при пониженных потенциалах тока (–1,1– –1,3 В), методом рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии показал, что во всех случаях были осаждены плёнки сплава NiFe с примесью меди (на рисунке 2*б* представлены спектры пленок, осажденных из электролита A). На спектрах также присутствуют небольшие пики от кремниевой подложки и проводящего подслоя золота.

Определено, что вне зависимости от наличия и вида комплексообразователя в составе электролита, по мере понижения потенциала с –1,1 до –1,3 В в плёнках сплава NiFe повышается содержание никеля и снижается содержание железа и меди (рисунок 4). При этом установлено, что внесение в электролит тиомочевины способствует незначительному снижению содержания примеси меди с сплаве NiFe с 3,2–4,1 ат.% до 3,2–3,9 ат.%. Внесение в состав электролита 8-оксихинолина напротив повысило содержание примеси меди в сплаве NiFe до 4,7–5,6 ат.%, в связи с чем дальнейшее его применение нецелесообразно. Наибольшее снижение примеси меди было обнаружено в плёнках NiFe осаждённых из электролита, содержащего сульфосалициловую кислоту (2,3–2,6 ат.%).

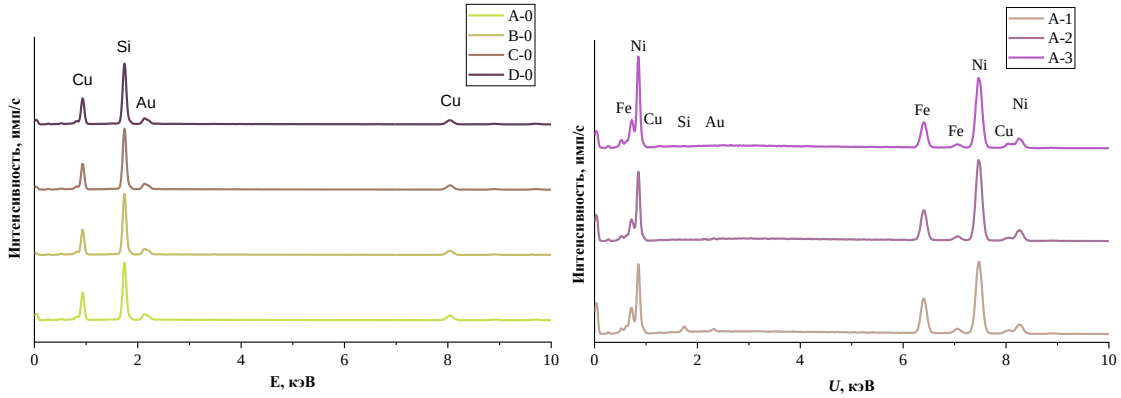


Рисунок 2 – Энергодисперсионные спектры плёнок в системе NiFeCu осаждённых при повышенном потенциале тока (-0,4 В) из различных электролитов – а, и пониженных потенциалах тока (-1,1 – -1.3 В) из электролита А

Представленные в данной работе результаты демонстрируют возможность синтеза плёнок сплава NiFe в диапазоне потенциала (–1,1– –1.3В) и пленок Cu (при потенциале тока –0,4 В) из одного комбинированного электролита. При этом выполнен синтез пленок NiFe в широком диапазоне состава: Ni(67,5–80 ат.%), Fe(16,8–26,9 ат.%), Cu(2,3–5,6 ат.%). Показано, что добавление комплексообразователя сульфосалициловой кислоты позволяет снизить содержание примеси Cu в сплаве NiFe вплоть до 2,3 ат.%, при этом не создав препятствий осаждению Cu при повышенном потенциале тока.

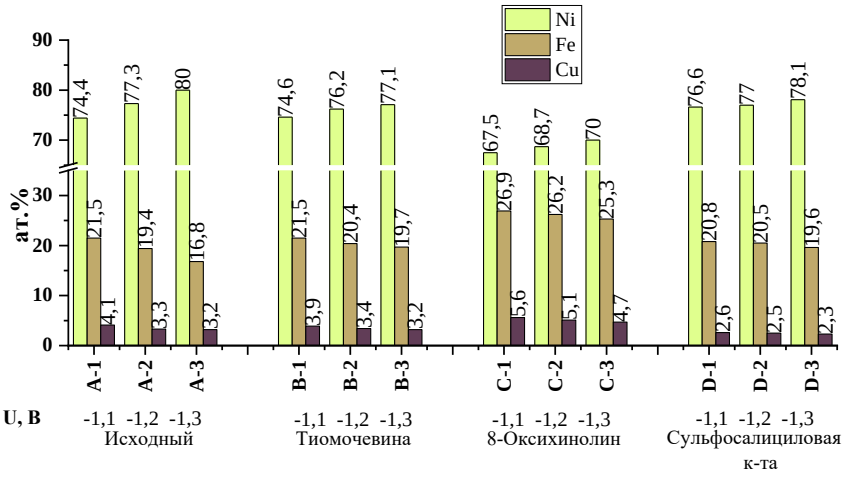


Рисунок 3 – Химический состав плёнок в системе NiFeCu, осажденных из различных электролитов при пониженных потенциалах тока (-1,1– -1,3 В)

Список литературы

1. Magnetic random access memories (MRAM) beyond information storage / R. C. Sousa [et al.] // 2020 IEEE Symposium on VLSI Technology / IEEE. – 2020. – P. 1-2.

2. Esmaili, S. Electrodeposition, characterization and morphological investigations of NiFe/Cu multilayers prepared by pulsed galvanostatic, dual bath technique / S. Esmaili, M. E. Bahrololoom, K. L. Kavanagh // Mater. Charact. – 2011. – Vol. 62, № 2. – P. 204-210.

3. Thermal Stability of Ni-Fe Alloy Foils Continuously Electrodeposited in a Fluorborate Bath / W.-S. Chang [et al.] // Open J. Met. – 2012. – Vol. 02, № 01. – P. 18-23.

4. Effect of NiFe layer thickness on properties of NiFe/Cu superlattices electrodeposited on titanium substrate / H. Kuru [et al.] // J. Mater. Sci. Mater. Electron. – 2019. – Vol. 30, № 19. – P. 17879-17889.

5. The influence of saccharin adsorption on NiFe alloy film growth mechanisms during electrodeposition / A. Kotelnikova [et al.] // RSC Adv. – 2022. – Vol. 12, № 55. – P. 35722-35729.

6. Dean, J. A. Formation Constants of Metal Complexes / J. A. Dean, N. A. Lange // Lange's Handb. Chem. – 1999. – Vol. 15. – P. 922–944.

This article examines the influence of complexing additives and current potential on the co-deposition of Ni, Fe, and Cu from a combined electrolyte. Their impact on the deposition kinetics and chemical composition of Cu and NiFeCu alloys is analyzed.

Котельникова Анна Николаевна, младший научный сотрудник ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, anna.kotelnikova.98@mail.ru.

Научный руководитель – *Труханов Алексей Валентинович*, доктор физико-математических наук, доцент, академик-секретарь Отделения химии и наук о Земле НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, truhanov86@mail.ru.

УДК: 538.955, 54.057,54-165.2,544.654.2

А. Н. КОТЕЛЬНИКОВА, В. А. ФЕДЬКИН, О. Д. КАНАФЬЕВ,
И. А. ГРЕКОВ, Т. И. ЗУБАРЬ, А. В. ТРУХАНОВ

СИНТЕЗ ГРАДИЕНТНЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЁНОЧНЫХ СТРУКТУР В СИСТЕМЕ NiFeCu ИЗ КОМБИНИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОЛИТА

Рассмотрен процесс совместного осаждения Ni, Fe и Cu из комбинированного (совместного) электролита. Продемонстрирована возможность синтеза пленочных структур в системе NiFeCu с линейным, ступенчатым и многослойным градиентами состава.

Создание градиентных структур на основе сплавов NiFe и NiFeCu, обладающих уникальными физико-химическими и магнитными свойствами – одно из перспективных направлений в современном материаловедении. Такие системы привлекают внимание благодаря возможности точного управления химическим составом, что позволяет варьировать функциональные характеристики материалов в зависимости от глубины или направления градиента. Градиентные структуры на основе NiFe и NiFeCu находят применение в магнитных сенсорах, микросистемах и устройствах с улучшенной коррозионной стойкостью и механической прочностью [1; 2].

Введение меди в систему NiFe приводит к изменению параметров решётки и модификации дефектной структуры, что отражается на размерах и форме зерен, а также на распределении фаз. Такие изменения оказывают значительное влияние на магнитные и механические свойства, что делает контроль состава особенно важным при синтезе градиентных покрытий и пленок [3]. Современные методы осаждения и легирования позволяют создавать плавные или ступенчатые градиенты, обеспечивая высокую однородность и повторяемость структур [4] .

Для нашего исследования была выбрана многослойная плёночная система NiFeCu, в которой за счёт варьирования потенциала осаждения можно получать как слои NiFe и Cu, так и варьировать состав внутри слоёв NiFe.

Для осаждения многослойных плёнок на основе сплавов NiFe и Cu был приготовлен комбинированный электролит объёмом 2,5 л, следующего состава: $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 256 г/л, $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ – 20 г/л, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 13 г/л, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ – 2 г/л, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 90 г/л, H_3BO_3 – 30 г/л, $C_7H_5NO_3S$ (сахарин)– 2 г/л, $C_7H_6O_6S$ (сульфосалициловая кислота) – 1,745 г/л.

Выбор потенциалов для осаждения сплавов NiFe и Cu был выполнен, основываясь на поляризационной кривой (рисунок 1), полученной для данного комбинированного электролита, а также литературных данных. Для осаждения слоёв сплава Cu был выбран потенциал –0,4 В, при котором возможно лишь восстановление ионов меди, без примесей никеля и железа. Для осаждения слоёв сплава NiFe был выбран диапазон потенциала от –1,0 до –1,3 В, при которых возможно формирование сплава NiFe с различным химическим составом (отношением Ni/Fe, а также различным содержанием примеси Cu).

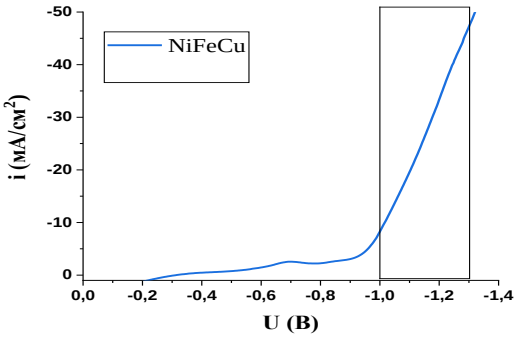


Рисунок 1 – Поляризационная кривая комбинированного электролита NiFeCu

Подложками для электрохимического осаждения многослойных плёнок на основе сплавов NiFe и Cu служили пластины кремния Si (100) с напылённым слоем золота Au.

В ходе осаждения температура электролитов поддерживалась на уровне 35 °C, а pH – на уровне 2,4. Для перемешивания и поддержания температуры электролитов использовалась магнитная мешалка с подогревом термодатчиком а также воздушный компрессор.

Из комбинированного электролита были осаждены следующие образцы градиентных плёнок (рисунок 2).

Образец 1 осаждался при линейно снижающемся потенциале от –1,0 до –1,3 В в течение 420 с для формирования плёнки с линейным градиентом состава по толщине. Развертка потенциала велась со скоростью 0,7 мВ/с.

Образец 2 был аолучен при ступенчато понижающемся потенциале от –1,0 до –1,3 В с шагом в 0,05 В и длительностью каждого шага 60 с. Данный режим применялся для формирования многослойной плёнки со ступенчатым градиентом состава по толщине.

Образец 3 имел схожий режим осаждения с образцом 2, однако между импульсами тока в диапазоне потенциала –1,0 – –1,3 В длительностью 60 с каждый, были добавлены импульсы тока с менее отрицательным значением потенциала –0,4 В и длительностью 120 с. Данный режим применялся для формирования многослойной плёнки структуры NiFe/Cu/NiFe/Cu…..NiFe, с семью слоями сплава NiFe (со ступенчатым изменением состава) и шестью слоями Cu между ними.

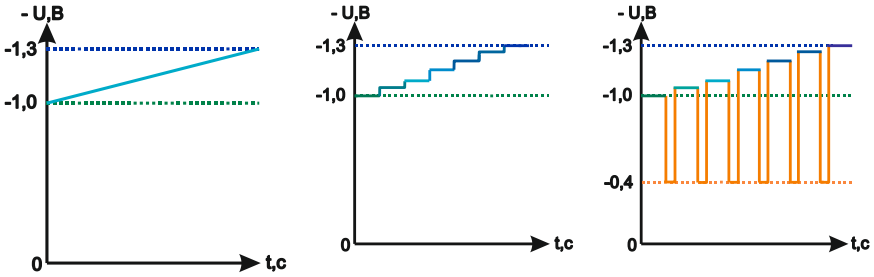


Рисунок 2 – Схематическое изображение параметров тока при осаждении образцов 1–3

Массы веществ для приготовления электролитов измеряли с помощью весов Libra VK-1 (Massa-K, Санкт-Петербург, Россия).

pH электролитов определяли при помощи pH метра Hanna 2210 (Hanna Instruments, Woonsocket, USA).

Источником тока при осаждении плёнок был потенциостат-гальваностат P-45X (Electrochemical Instruments, Черноголовка, Россия). Настройка режимов и параметров тока осуществлялась на персональном компьютере с помощью программного обеспечения ES8 (Electrochemical Instruments, Черноголовка, Россия).

Химический состав плёнок определяли при помощи рентгеновского энергодисперсионного (EDX) спектрометра AZtecLive Advanced with Ultim Max 40 (Oxford Instruments, Bognor Regis, UK).

Для исследования химического состава образцов пленочных структур с градиентом состава С-1 – С-3, осаждённые плёнки были отделены от кремниевых подложек и состав был исследован с обеих сторон. Для получения профилей распределения элементов были получены сколы образцов (поперечные сечения) путём охлаждения в жидком азоте и «разламывания» (рисунок 3).

Образец 1 был осаждён при линейно снижающемся с –1,0 до –1,3 В потенциале. Анализ нижней стороны плёнки, прилегавшей ранее к подложке и с которой начинался рост плёнки при потенциале -1,0 В, показал следующее. По мере линейного понижения потенциала с –1,0 до –1,30 В и роста плёнки содержание никеля в ней повышалось, а содержание железа и меди снижалось также линейно, что подтверждается профилем распределения элементов по толщине плёнки (колебания на графике связаны с небольшим количеством сигналов, улавливаемых с торца плёнки).

Образец 2 был осаждён при ступенчато снижающемся с –1,0 до –1,3 В (с шагом в 0,5 В) потенциале. Анализ нижней стороны плёнки образца 2 показал, что по мере ступенчатого понижения потенциала с -1,0 до -1,30 В и роста плёнки содержание никеля в ней повышалось, а содержание железа и меди снижалось также ступенчато, что подтверждается профилем распределения элементов по толщине плёнки (колебания на графике связаны с небольшим количеством сигналов, улавливаемых с торца плёнки).

Образец 3 был осаждён при ступенчато снижающемся с –1,0 до –1,3 В (с шагом в 0,5 В) потенциале и импульсах потенциала в -0,4 В (подаваемых между каждым шагом) для формирования многослойной плёнки, состоящей из слоёв сплава NiFe (с примесью Cu) со ступенчатым градиентом состава относительно друг друга и промежуточными слоями Cu между ними. Анализ нижней стороны плёнки образца 3 показал, что по мере ступенчатого понижения потенциала с –1,0 до –1,30 В (с шагом в 0,5 В) и роста плёнки содержание никеля повышалось, а содержание железа и меди снижалось в слоях NiFe ступенчато. Это также подтверждается профилем распределения элементов по толщине плёнки (колебания на графике связаны с небольшим количеством сигналов, улавливаемых с торца плёнки). Поскольку промежуточные слои Cu, осаждаемые при потенциале –0,4 В по 120 с каждый между слоями NiFe, имеют малую толщину их сигнал налагается на сигналы от Ni и Cu и на профиле распределения элементов они имеют невысокие и уширенные пики.

Установлено, что во всех трёх образцах 1–3 содержание железа ниже с верхней стороны, чем с нижней, что обусловлено уменьшением потенциала по мере роста плёнок. В частности, при более низких потенциалах

осаждения для системы NiFe характерно снижение содержания железа в сплаве за счёт уменьшения аномального характера соосаждения. В то время как никеля напротив интенсивнее осаждается при более низких потенциалах, что и привело к более высокому содержанию никеля с верхних сторон образцов. Содержание меди также выше с нижних сторон, чем с верхних. Это обусловлено конкуренцией ионов меди, никеля и железа за восстановление. А именно при понижении потенциала усиливаются кинетические факторы, способствующие восстановлению никеля и железа, что совместно с концентрационным фактором (крайне низкому содержанию источников ионом меди в составе электролита) осложняет осаждение меди.

Помимо этого обнаружено, что образец 3 имеет более высокое содержание меди и пониженной содержание никеля и железа с обеих сторон. Это обусловлено его многослойным строением (чередованием слоёв сплава NiFe со слоями Cu) и высокой проникающей способностью пучка электронов при исследовании химического состава образцов.

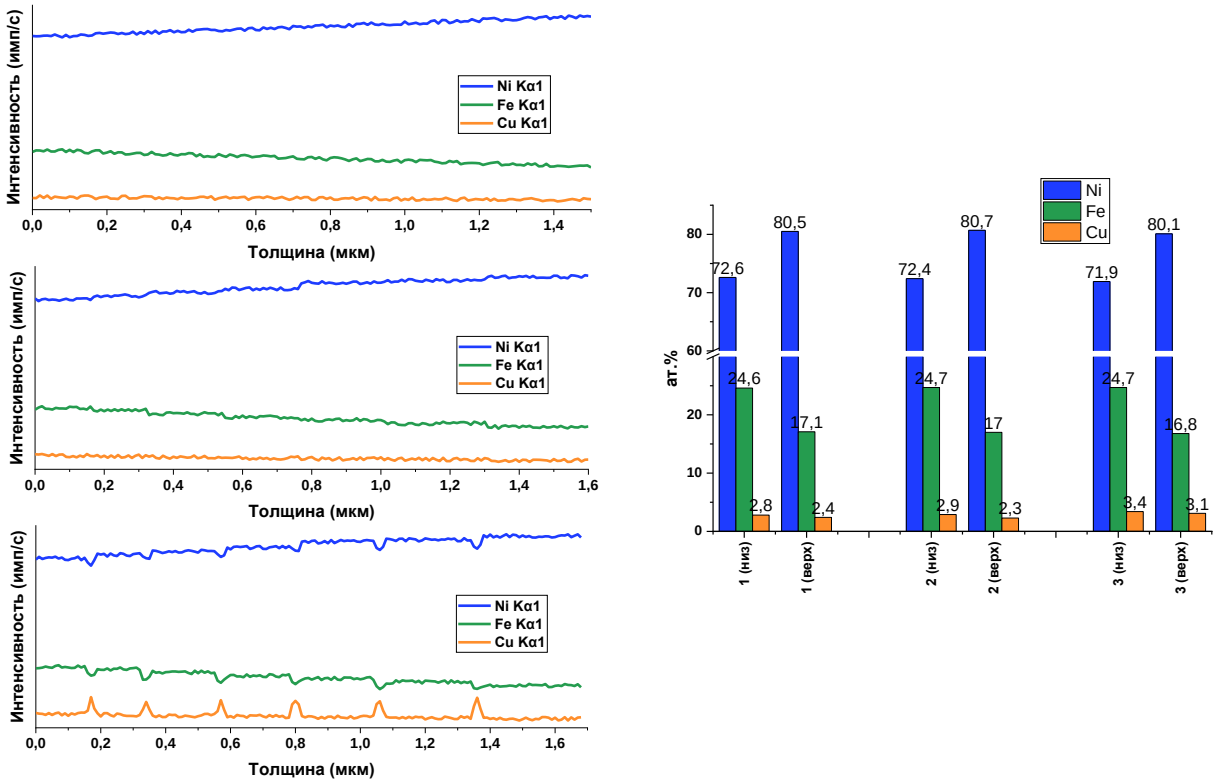


Рисунок 3 – Профили распределения элементов образцов 1–3, полученные методом рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии, и химический состав плёночных структур с линейным (образец 1), ступенчатым (образец 2) многослойным (образец 3) градиентом состава

Таким образом в данной работе продемонстрирована возможность синтеза из комбинированного электролита плёночных структур с линейным, ступенчатым и многослойных градиентом состава. Градиентность и многослойность состава полученных образцов подтверждена профилями распределения элементов по толщине пленок (по поперечному сечению). Анализ их химического состава показал, что понижение потенциала по мере осаждения плёнок привело к повышению содержания никеля (вплоть до 80,7 ат.%) и понижению содержания железа (вплоть до 16,8 ат.%) и меди (вплоть до 2,3 ат. %) в верхних слоях плёнок. Стоит отметить крайне низкое содержание меди в образцах с линейным и ступенчатым градиентом состава (от 2,3 до 2,9 ат%) и соответственно в слоях NiFe в многослойном образце 3, что является необходимым условием для сохранения их магнитомягких свойств.

Список литературы

1. Electrodeposition of nickel-iron alloys: I. Effect of agitation / P. C. Andricacos [et al.] // J. Electrochem. Soc. – 1989. – Vol. 136, № 5. – P. 1336.

2. Features of Galvanostatic Electrodeposition of NiFe Films with Composition Gradient: Influence of Substrate Characteristics / T. I. Zubar [et al.] // Nanomaterials. – 2022. – Vol. 12, № 17. – P. 2926.

3. Influence of surface roughness and current efficiency on composition gradients of thin NiFe films obtained by electrodeposition / I. Tabakovic [et al.] // J. Electrochem. Soc. – 2014. – Vol. 162, № 3. – P. D102.

4. Composition gradient, structure, stress, roughness and magnetic properties of 5–500 nm thin NiFe films obtained by electrodeposition / J. Gong [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2016. – Vol. 398. – P. 64-69.

This article examines the co-deposition of Ni, Fe, and Cu from a combined electrolyte. The possibility of synthesizing film structures in the NiFeCu system with linear, stepwise, and multilayer composition gradients is demonstrated.

Котельникова Анна Николаевна, младший научный сотрудник ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, anna.kotelnikova.98@mail.ru

Научный руководитель – *Труханов Алексей Валентинович***,** доктор физико-математических наук, доцент, Академик-секретарь Отделения химии и наук о Земле НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, truhanov86@mail.ru.

УДК 535.33,533.9,543.423.1

Ю. А. КРИНЧИК

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТРИЦ МЕТОДОМ ЛАЭС

Представлены результаты разработки методик элементного анализа многокомпонентных сплавов и тонких функциональных покрытий методом двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии (ЛАЭС). Исследования проводились на образцах латуни, старинной медной монеты со слоем патины и титаната бария с серебряным покрытием. Экспериментально определены оптимальные параметры возбуждения плазмы, включая межимпульсный интервал (4–8 мкс) и степень расфокусировки лазерного луча для управления толщиной аблируемого слоя. Разработаны подходы к качественному и количественному анализу, позволившие определить концентрацию основных компонентов латуни (Zn – 53,72 %, Pb – 5,90 %, Cu – 39,24 %) и оценить толщину поверхностных слоев (патина ~12 мкм, серебряное покрытие 1–2 мкм) без предварительной подготовки образцов.

Экспериментальная установка: для реализации абляции и снятия спектров был использован ЛАЭС спектрометр (рис. 1*а*) [1], для оценки толщины патины на поверхности образцов использовался микроинтерферометр Линника [2] (рис. 1*б*).

а *б*

Рисунок 1 а) ЛАЭМС спектрометр; б) микроинтерферометр Линника

Метод лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии является передовым методом элементного анализа, отличающимся простотой, скоростью и возможностью проведения измерений без предварительной химической и механической подготовки образцов. Использование сдвоенных лазерных импульсов позволяет существенно увеличить интенсивность аналитического сигнала по сравнению с одиночным импульсом за счет дополнительного возбуждения плазмы. Однако для повышения точности количественного анализа и снижения погрешности необходимо экспериментально обоснованное подбор параметров лазерного излучения.

Предметом исследования являлись декоративное изделие из желтого металла (предположительно латунь) (рис. 2*а*), старинная медная монета «5 копеек» 1788 года со слоем патины (рис. 2*б*) и образец из титаната бария с функциональным серебряным покрытием (рис. 2*в*).

Для качественной оценки элементного состава необходимо было определить оптимальные параметры абляции. Была изучена зависимость интенсивности спектральных линий основных элементов (Cu, Zn, Pb) от временного интервала между сдвоенными лазерными импульсами. Энергия каждого импульса фиксировалась на уровне 50 мДж. Интервал варьировался от 0 до 15 мкс. Установлено, что оптимальное значение задержки различается для разных элементов, что обусловлено различием их теплофизических свойств, а не массой атомов. Для меди максимум интенсивности наблюдается при 8 мкс, для цинка – при 6 мкс, для свинца – при 4 мкс. Для проведения комплексного анализа сплава было выбрано компромиссное значение межимпульсного интервала 5 мкс, обеспечивающее достаточную интенсивность линий всех основных компонентов.

а *б* *в*

Рисунок 2 – Фотографии археологических предметов с заметными следами деструкции при проведении элементного анализа методом двухимпульсной лазерной абляции

Для количественного определения состава латуни были построены градуировочные графики (рис. 3) зависимости относительной интенсивности спектральных линий от концентрации элементов в стандартных образцах. Были выбраны аналитические линии, не имеющие перекрытий с линиями других элементов (например, Zn 334.753 нм, Pb 405.817 нм, Al 394.4 нм, Fe 404.625 нм).

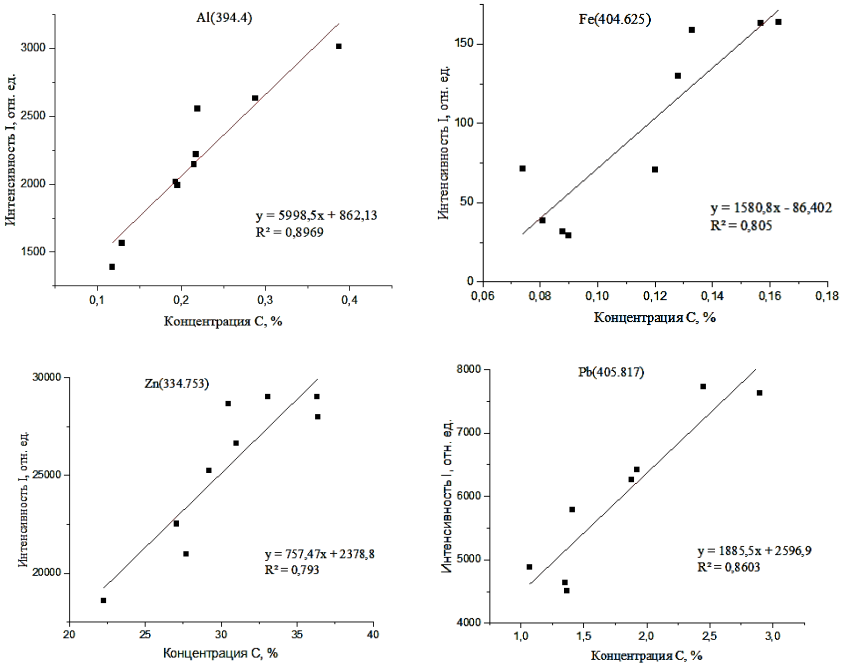


Рисунок 3 – Градуировочные графики зависимости интенсивности спектральных линий основных элементов исследуемого предмета от концентрации в стандартных образцах

Коэффициенты корреляции построенных градуировочных зависимостей составили от 0.79 до 0.90, что подтверждает возможность использования методики для количественного анализа. В исследуемом образце желтого металла были определены концентрации основных компонентов: Zn – 53.72 %, Pb – 5.90 %, Cu (расчетным путем) – 39.24 %, что позволяет классифицировать материал как специальную латунь.

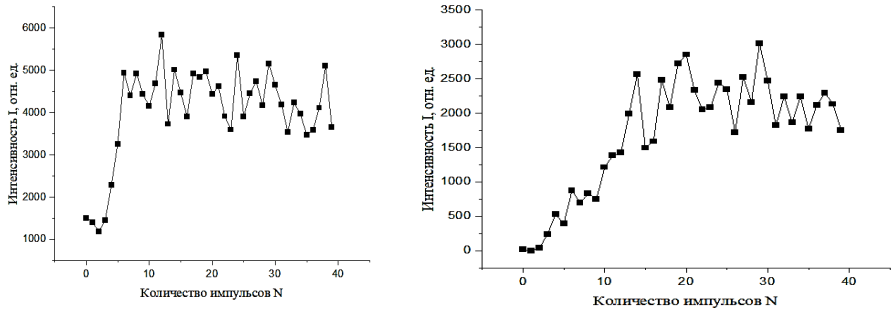
Важным аспектом является учет состояния поверхности. Для образцов с загрязнениями или окислами было определено необходимое количество «предимпульсов» (в данном случае 30 импульсов), обеспечивающих удаление поверхностного слоя до выхода на сигнал чистого металла (плато интенсивности).

Одной из задач работы была оценка возможностей ЛАЭС для послойного анализа покрытий и определения толщины поверхностных слоев.

На примере старинной медной монеты был проведен анализ динамики спектральных линий в зависимости от количества импульсов (рис. 4). Выход интенсивности линии меди на постоянное значение наблюдался с 6-го импульса. С учетом измеренной микроинтерферометром скорости абляции (~2 мкм/импульс при фокусировке), толщина слоя патины была оценена в 12 мкм.

Для анализа более тонких покрытий (порядка 1–2 мкм) стандартная фокусировка может быть избыточно деструктивной. В работе исследован метод управления плотностью мощности лазерного излучения путем расфокусировки луча относительно поверхности образца. Изучалась отрицательная расфокусировка (смещение образца навстречу лучу) в диапазоне от 0 до 10 мм.

Установлено, что при расфокусировке на 4 мм достигается стабильный аналитический сигнал для медных сплавов без эффектов дополнительной лазерной искры. При расфокусировке на 8 мм толщина испаряемого слоя уменьшается, что позволяет проводить более деликатный послойный анализ.



а *б*

Рисунок 4 – Зависимость интенсивности спектральной линии меди Cu (521.82 нм) монеты от количества импульсов без расфокусировки (а) и с расфокусировкой 8 мм (б)

На примере образца титаната бария с серебряным покрытием было продемонстрировано (рис. 5), что при расфокусировке 8 мм сигнал от серебра (Ag 520.861 нм) регистрируется только в первых импульсах (до 8-го), после чего появляются линии матрицы (Ba, Ti).

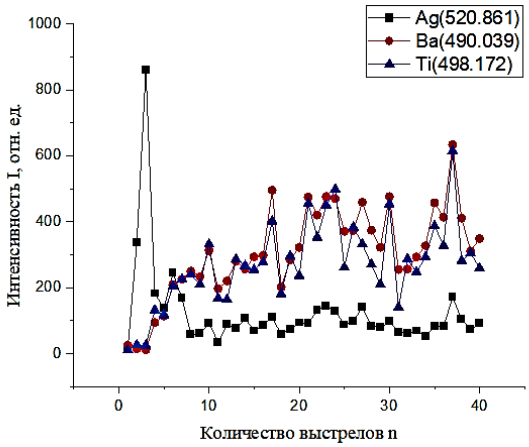


Рисунок 5 – Зависимость интенсивностей спектральных линий покрытия и основных компонентов исследуемого образца титаната бария с серебряным покрытием от количества импульсов при расфокусировке 8 мм

Это подтверждает возможность неразрушающего определения толщины тонких функциональных покрытий методом двухимпульсной ЛАЭС.

Список литературы

1. Воропай, Е. С. Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр / Е. С. Воропай, И. М. Гулис, К. Ф. Ермалицкая. – Минск : Изд-во Белорус. гос. ун-та, 2021.

2. Описание микроинтерферометра Линника. – URL: https://www.lomo.ru/production/grazhdanskogo-naznacheniya/mikroskopy/mikroskopy-tekhnicheskie/mii-4m.

3. Qualitative and semi-quantitative analysis of health-care pharmaceutical products using laser-induced breakdown spectroscopy / S. Nisar [et al.] // Journal of Pharmaceutical Analysis. – 2019. – Vol. 9, № 1. – P. 20–24.

The paper presents the results of developing methods for elemental analysis of multi-component alloys and thin functional coatings using double-pulse Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Studies were conducted on brass samples, an ancient copper coin with a patina layer, and barium titanate with a silver coating. Optimal plasma excitation parameters were experimentally determined, including inter-pulse interval (4–8 μs) and degree of laser beam defocusing to control the thickness of the ablated layer. Approaches to qualitative and quantitative analysis were developed, allowing to determine the concentration of the main components of brass (Zn – 53.72 %, Pb – 5.90 %, Cu – 39.24 %) and estimate the thickness of surface layers (patina ~12 μm, silver coating 1–2 μm) without preliminary sample preparation.

Кринчик Юлия Александровна, магистрант 2 курса Белорусского государственного университета Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь, krinchik777@gmail.com.

Научный руководитель – *Ермалицкая Ксения Фёдоровна*, кандидат физико-математических наук, доцент, физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, ermalitskaia@gmail.com.

УДК 621.793.184

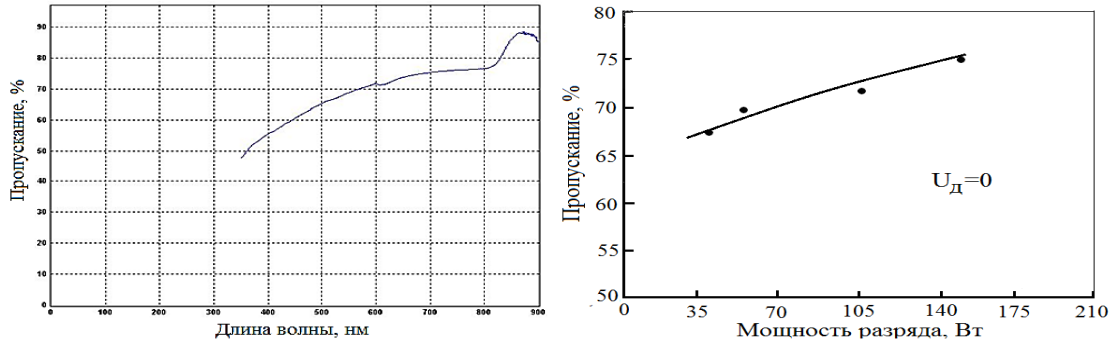
Е. Г. КУРБАКО

ХАРАКТЕРИСТИКИ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Исследовано влияние мощности первичного разряда P и потенциала диафрагмы $U_д$ на характеристики фторуглеродных покрытий, синтезированных прямым осаждением из ионных пучков. Установлено, что увеличение P и $U_д$ способствовало росту оптического пропускания, износостойкости, угла смачивания, а также улучшению электрофизических характеристик покрытий.

Фторуглеродные тонкие пленки применяются в качестве изолирующих, оптических, гидрофобных, защитных, антимикробных и химически стойких покрытий. Для синтеза фторуглеродных покрытий используются плазменные разряды в углерод- и фторсодержащих газах. Применяются ВЧ плазмохимическое осаждение, индуктивно-связанная плазма, импульсная плазма высокой плотности, которые требуют сложных блоков питания и согласующих устройств [1]. Новый метод нанесения тонких пленок посредством генерации потока из пучкового фокуса является перспективным, т.к. позволяет управлять плотностью и энергией ионного пучка, применять дешевые блоки питания [2]. В данной работе будут исследовано влияние технологических режимов на характеристики фторуглеродных покрытий.

Формирование фторуглеродных покрытий проводили на модернизированной установке вакуумного напыления ВУ-1А, оснащенной ионным источником на базе ускорителя с анодным слоем. Остаточный вакуум не превышал значений $(2–3)\cdot10^{-3}$ Па. Рабочее давление составляло $(5–6)\cdot10^{-2}$ Па. Покрытия наносились на подложки из стекла и кремния. Исследовано влияние мощности первичного плазменного разряда на характеристики фторуглеродных тонкопленочных слоев. Соотношение CH:CF в рабочем газе составляло ~ 3:1. Напряжение на диафрагме отсутствовало. Температура подложки не превышала 323–333 К. На рисунке 1*а* приведен спектр пропускания покрытий, которые имели светло-коричневую окраску и высокое пропускание в инфракрасном диапазоне спектра. Пропускание зависело от мощности разряда первичного пучка. На рисунке 1*б* приведена зависимость величины пропускания на λ = 555 нм от мощности. Установлено, что увеличение мощности способствовало росту пропускания, что можно связать с десорбцией примесей из пленки при повышении плотности ионного пучка.



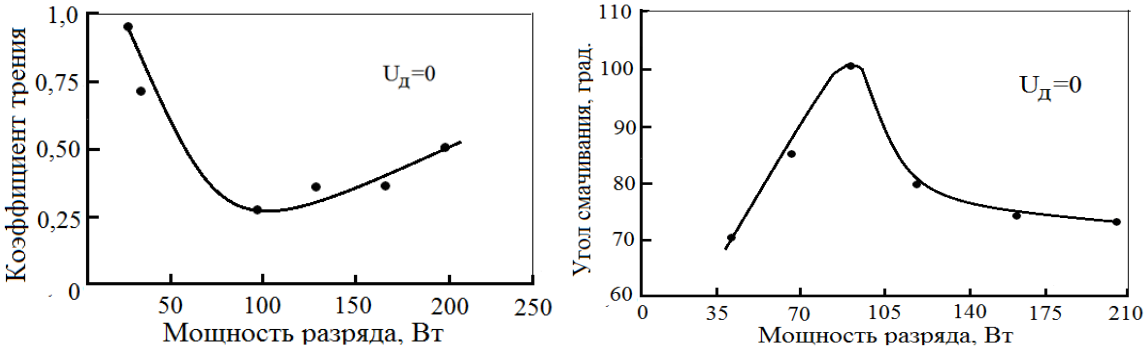
а *б*

Рисунок 1 – Спектр пропускания (а) и зависимость пропускания на фторуглеродных покрытий на λ = 555 нм от мощности первичного пучка (б)

Для измерения электрофизических параметров применяли МДП структуры. Измерения проводили на частоте 1 МГц. Установлено, что значение диэлектрической проницаемости ε снизилось с 8,7 до 2,2 при увеличении мощности разряда с 90 до 200 Вт. Также наблюдалось снижение тангенса диэлектрических потерь tgδ до 0,02 и рост удельного объемного сопротивления ρ_v до $3{,}1\cdot10^5$ Ом·м. Это можно связать формированием более плотной структуры покрытия и десорбции примесей.

Установлено, что износостойкость покрытий возрастала при увеличении мощности до 90–100 Вт, дальнейший рост мощности привел к росту коэффициента трения (рис. 2*а*).

Угол смачивания θ поверхности фторуглеродного покрытия дистиллированной водой увеличивался до 102º при повышении мощности до 80–90 Вт (рис. 2*б*). При более высоких мощностях происходило некоторое снижение угла, что можно объяснить увеличением поверхностной энергии из-за роста числа ненасыщенных связей атомов углерода и фтора.

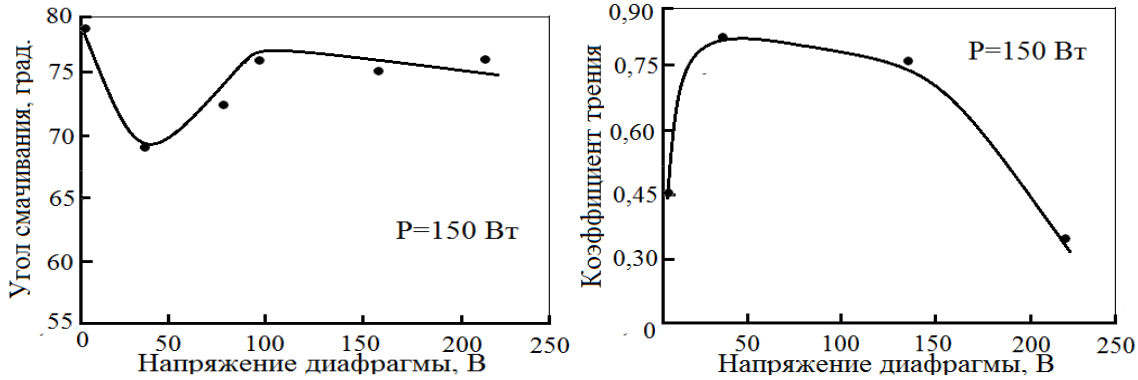


а *б*

Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения (а) и угла смачивания (б) от мощности разряда

Установлено, что увеличение $U_д$ и ,соответственно, энергии ионов в пучке привело к увеличению пропускания, что связано с формированием более плотной структуры пленки из-за высокой энергии ионов.

Установлено, что увеличение $U_д$ и способствовало снижению ε и tgδ, росту ρ_v, что связано с формированием более плотной структуры пленки из-за высокой энергии ионов. Угол смачивания увеличивался при повышении напряжения с 50 до 100 В, затем практически не изменялся (рис. 3*а*). Рост угла смачивания можно связать с уплотнением фторуглеродной пленки. Такие же причины вызывали увеличение и износостойкости (рис. 3*б*).



а *б*

Рисунок 3 – Зависимость угла смачивания (а) и коэффициента трения (б) от напряжения на диафрагме

Измерение адгезии методом насечек показало, что при росте мощности разряда и $U_д$ она составляла 4В – 5В по шкале ASTM, что также связано с повышением плотности покрытия из-за высокой энергии конденсирующихся ионов.

Список литературы

1. Characterization of fluorocarbon thin films deposited by ICP and PP / J. Lee [et al.] // Journal of Surface Analysis. – 2011. – Vol. 17, No. 3. – P. 269–273.

2. Телеш, Е. В. Формирование оптических покрытий прямым осаждением из ионных пучков / Е. В. Телеш, Н. К. Касинский // Контенант. – 2014. – Т. 1, № 2. – С. 27–30.

The influence of primary discharge power P and aperture potential U_d on the characteristics of fluorocarbon coatings synthesized by direct ion beam deposition was studied. It was found that increasing P and Ud contributed to increased optical transmittance, wear resistance, and contact angle, as well as improved the electrophysical properties of the coatings.

Курбако Егор Григорьевич, студент 4 курса Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, kurbakoe@list.ru.

Научный руководитель – *Телеш Евгений Владимирович*, старший преподаватель кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, etelesh@bsuir.by.

УДК 544.7:620.3

Н. Н. КУРЬЯН

ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ И РАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОСАЖДЁННЫХ НА ПОДЛОЖКИ НАНОСТРУКТУР ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ

Методами электронной микроскопии исследованы наноструктуры Fe_2O_3, TiO_2, CoO и Zn+Cr. Установлена иерархическая организация материалов: первичные частицы (8–50 нм) формируют агломераты (1–4 мкм). Выявлены морфологические различия: Fe_2O_3 образует округлые частицы (15–25 нм), TiO_2 – сферические (8–12 нм), CoO – кубические (25–35 нм), Zn+Cr – гетерофазную структуру. Узкое распределение частиц указывает на однородные условия синтеза. Структурные особенности определяют функциональные свойства материалов.

Микроструктурные исследования оксидных материалов представляют собой фундаментальное направление современного материаловедения, поскольку морфология поверхности, размер кристаллитов, характер агрегации частиц и фазовый состав непосредственно определяют физико-химические свойства и области практического применения материалов [1; 8]. Формирование микро- и наноструктуры оксидов железа, титана, кобальта и сложных оксидных систем типа цинк-хром является предметом многочисленных исследований в связи с их широким использованием в катализе, сенсорике, энергетике и биомедицине [4; 6; 7].

Согласно обзору Machala с соавторами [1], синтез аморфных наночастиц Fe_2O_3 различного размера и морфологии, их магнитные свойства и механизмы кристаллизации являются ключевыми аспектами современных исследований. Авторы классифицируют методы синтеза по природе образца (порошки, нанокомпозиты, пленки, покрытые частицы) и подчеркивают важность различных экспериментальных методов для характеризации аморфной фазы Fe_2O_3, включая ключевые маркеры, позволяющие отличить ее от нанокристаллических рентгеноаморфных полиморфов. Фундаментальные обзоры Parkinson [2, 3, 4] детально рассматривает поверхности оксидов железа: Fe_3O_4, γ-Fe_2O_3, α-Fe_2O_3 и $Fe_{1-x}O$. Автор подчеркивает, что химия дефектов в объеме материалов, где доминируют катионные вакансии и межузельные атомы, определяет понимание поверхностных свойств. В работе авторов [8] представлена классификация литературных данных по механизмам формирования соединений оксида железа. Согласно обзору Aldeen [5], анатаз наиболее эффективен для фотокатализа благодаря своим электронным характеристикам и большой площади поверхности, что обусловлено более отрицательным потенциалом зоны проводимости, нетоксичностью, фотохимической стабильностью и доступной стоимостью. Морфология TiO_2 представлена разнообразными наноструктурами: нанотрубки, нанопроволоки, наностержни и мезопористые структуры [6; 7].

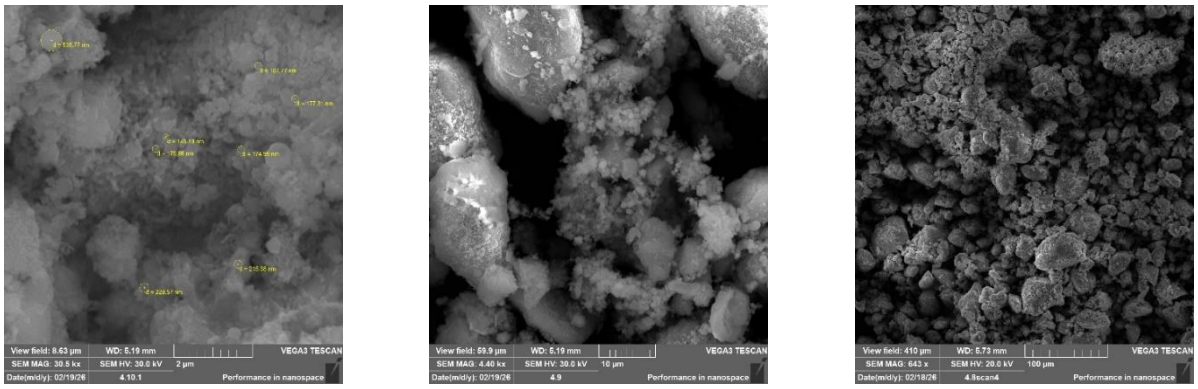
В диссертационной работе Тарасова [9] установлены особенности физико-химических процессов, протекающих в газовой фазе, на границе раздела жидкость-газ и в объеме капель при формировании наноструктурированных микросфер. Особое внимание уделено исследованию примесных атомов азота в кристаллической решетке TiO_2 и их влиянию на фотокаталитическую активность под действием излучения различного диапазона.

Исследование [10] посвящено изучению морфологической эволюции модели CoO_x/Au(111) в условиях повышенных давлений паров H_2O с помощью сканирующей туннельной микроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии в условиях, приближенных к атмосферным. При повышенном давлении H_2O авторы описывают формирование четко выраженной морфологии нанооствровков $Co(OH)_2$ с кобальтом в степени окисления +2. В присутствии O_2, на воздухе и в жидкой воде, образуются частично гидроксилированные Co^{3+} фазы, состоящие из слоев $CoO(OH_x)$ трислоя, соответствующих единичному слою оксигидроксида кобальта(III) [10].

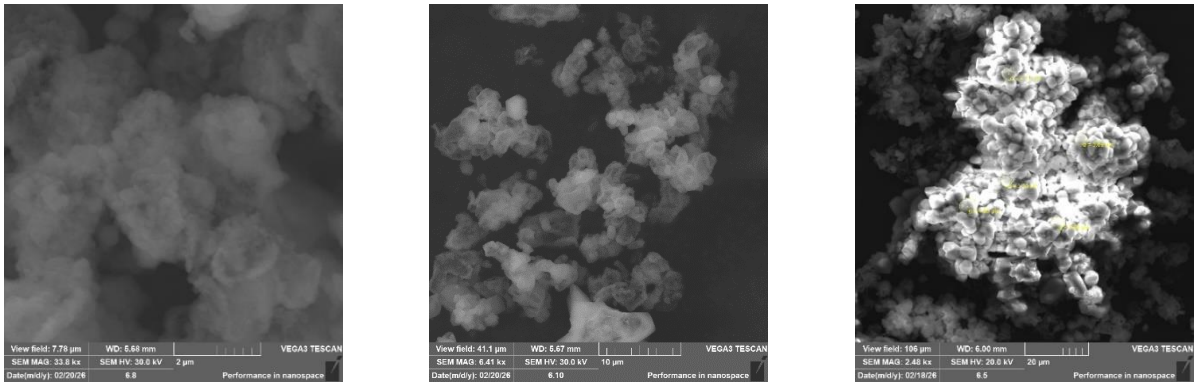
Исходя из проведенного анализа литературных источников следует отметить, что микроструктурные исследования оксидных материалов демонстрируют тесную взаимосвязь между условиями синтеза, формируемой микроструктурой и функциональными свойствами.

Цель – исследование микроструктуры оксидных материалов, полученных методом лазерной абляции в водной среде.

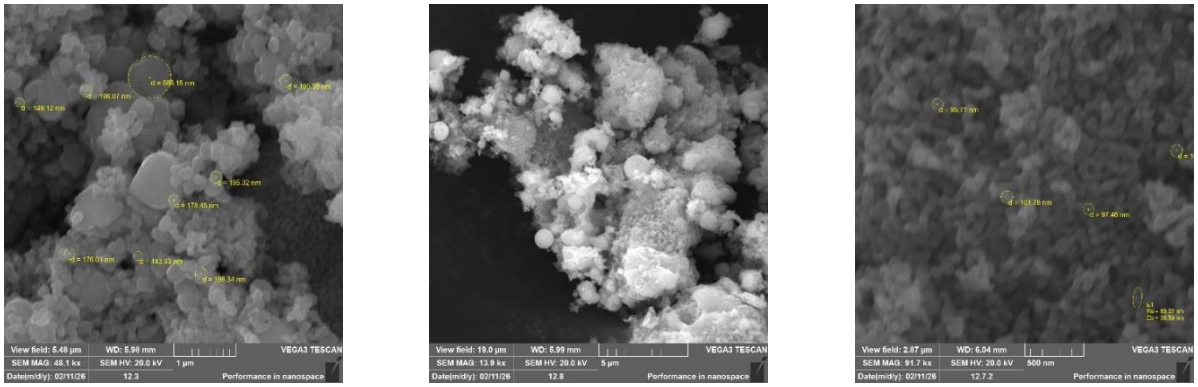
Источником излучения служил Nd^{3+}:YAG-лазер (LS-2147 Lotis), работающий в режиме модуляции добротности на длине волны 1064 нм с частотой следования импульсов 10 Гц. Длительность лазерного импульса 16 нс при энергии генерации 280 мДж. Наночастицы (НЧ) оксидов металлов нарабатывались в водной среде в течение 20 мин. Для получения НЧ в водной среде образцы оксидов металлов помещались в стеклянную кювету с дистиллированной водой объемом 20 мл. Диаметр расфокусированного пятна на подложке составлял 1 см. Для наилучшего напыления НЧ мишень располагали под углом 45° относительно подложки. Угол падения возбуждающего излучения = 45°. Коллоидный раствор, содержащий наночастицы исследуемых металлов и оксидов наносился на диэлектрическую подложку в виде одной капели объемом ~0,05 мл. После чего, полученные образцы высушивались в сушильном шкафу «ЭКРОСХИМ ES-4620» (Россия). Далее размерные характеристики наночастиц исследовались методом сканирующей электронный микроскопии, прибор «TESCAN VEGA 3». На рисунке 1 приведены оптические изображения осажденных растворов наночастиц, полученные при соответствующем увеличении.



А. Fe_2O_3



Б. CoO



В. Zn+Cr

Рисунок 1 – Оптические изображения осажденных растворов наночастиц: А. Fe_2O_3; Б. CoO; В. Zn+Cr полученные при соответствующем увеличении

Анализ изображений (рисунок 2А) выявил многоуровневую структуру поверхности. При малом увеличении наблюдается формирование крупных агломератов частиц, образующих основной каркас материала и определяющих его пористость. Фоновая фаза представлена мелкими слабо связанными частицами, заполняющими пространство между конгломератами. Поверхность неоднородна, с крупными агрегатами размером 1–2 мкм и участками различной контрастности, что указывает на локальные различия в кристалличности. При среднем увеличении проявляется зернистость: агломераты состоят из плотно упакованных кристаллитов размером 30–50 нм, что типично для золь-гель синтеза. При максимальном увеличении выявлены наночастицы округлой и слабо вытянутой формы размером 15–25 нм с узким распределением, свидетельствующим об изотропном росте кристаллов гематита (α-Fe_2O_3) в однородных кинетических условиях. При максимальном увеличении идентифицированы наночастицы сферической и слабо ограненной (тетрагональной) формы размером 8–12 нм с узким распределением. Данная морфология соответствует началу кристаллизации в тетрагональной сингонии анатаза при однородных кинетических условиях гидротермального синтеза.

Микроструктура (рисунок 1Б) характеризуется крупными пластинчатыми агрегатами размером 2–4 мкм, определяющими морфологию и механическую стабильность. Фоновая фаза представлена мелкими частицами в углублениях между пластинами. Неоднородность контраста указывает на различную толщину пластин и их кристаллографическую ориентацию. При среднем увеличении выявлены кристаллиты размером 40–60 нм, формирующие зернистую структуру пластин. При максимальном увеличении идентифицированы наночастицы кубической и округлой формы размером 25–35 нм с узким распределением, что характерно для изотропного роста в кубической решетке (структура каменной соли) CoO.

Анализ (рисунок 2В) выявил гетерогенную структуру с четким фазовым контрастом: светлые участки соответствуют ZnO, темные – оксиду хрома или шпинели. Поверхность крайне неоднородна, что связано с ограниченной взаимной растворимостью оксидов. При среднем увеличении в светлых областях наблюдаются кристаллиты гексагональной огранки (ZnO), в темных – более мелкозернистая структура (5-10 нм). При максимальном увеличении предполагается бимодальное распределение: в цинксодержащих областях частицы гексагональной формы размером 30–50 нм, в хромсодержащих – более мелкие (15–25 нм) неправильной формы, что обусловлено различиями в кристаллических решетках и поверхностной энергии фаз.

Проведенные микроструктурные исследования выявили общие закономерности и специфические особенности четырех оксидных систем. Для всех материалов характерна иерархическая организация: первичные наночастицы формируют кристаллиты, которые, в свою очередь, образуют агломераты различных типов. Узкое распределение частиц по размерам во всех системах свидетельствует об однородных кинетических условиях синтеза. Установлены существенные различия в морфологии: Fe_2O_3 образует изометричные агломераты с округлыми частицами (15–25 нм); TiO_2 – сферические агломераты с ультрамелкими частицами (8–12 нм); CoO – пластинчатые агрегаты с кубическими частицами (25–35 нм); композит Zn+Cr демонстрирует гетерофазную структуру с бимодальным распределением частиц. Выявленные структурные особенности имеют практическое значение: сферические агломераты TiO_2 обеспечивают высокую удельную поверхность, пластинчатая морфология CoO определяет механическую стабильность, а гетерофазная структура Zn+Cr создает предпосылки для создания материалов с регулируемыми свойствами.

Список литературы

1. Machala, L. Amorphous iron (III) oxide : A review / L. Machala, R. Zbořil, A. Gedanken // The Journal of Physical Chemistry B. – 2007. – Vol. 111(16). – P. 4003–4018.

2. Разживина, В. П. Исследование морфологии, структуры и фазового состава наночастиц TiO_2 методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения : выпускная квалификационная работа / В. П. Разживина. – Екатеринбург : УрФУ, 2021.

3. Мансуров, З. А. Синтез наночастиц Co_3O_4 методом синтеза горения раствора и морфология их структуры : мини-обзор / З. А. Мансуров, М. Хашами // Горение и плазмохимия. – 2025.

4. Parkinson, G. S. Iron oxide surfaces / G. S. Parkinson // Surface Science Reports. – 2016. – Vol. 71 (1). – P. 272–365.

5. Aldeen, E. S. A Review of the Synthesis, Structural, and Optical Properties of TiO2 Nanoparticles: Current State of the Art and Potential Applications / T. S. Aldeen // Crystals. – 2025. – Vol. 15 (11). – P. 944.

6. Alhalili Z. Cobalt oxide (CoO/Co3O4) heterostructures as bifunctional catalysts for water splitting: Recent insights and developments / Z. Alhalili // Molecular Catalysis. – 2025. – Vol. 584. – P. 115281.

7. Recent advances in synthesis of ZnCr2O4 nanomaterials and their composites for catalytic, energy, sensing, and biomedical applications: a review / K. Patel [et al.] // Journal of Materials Chemistry C. – 2026. – Advance Article.

8. Fyodorov, S. V. Diversity of Iron Oxides: Mechanisms of Formation, Physical Properties and Applications / S.V. Fyodorov, N. A. Myslitskaya, I. G. Samusev // Magnetochemistry. – 2023. – Vol. 9 (5). – P. 119.

9. Тарасов, А. Б. Синтез, структура и функциональные свойства наноструктурированного диоксида титана, полученного гетерогенным гидролизом тетрахлорида титана в аэрозольных системах : дис. ... канд. хим. наук / А. Б. Тарасов. – Черноголовка, 2016.

10. Fester, J. Structure and stability of Au-supported layered cobalt oxide nanoislands in ambient conditions / J. Fester, Z. Sun, J. Rodriguez-Fernandez, A. S. Walton, J. V. Lauritsen // Journal of Physical Chemistry C. – 2019. – Vol. 123 (14). – P. 9176–9182.

Nanostructures of Fe_2O_3, TiO_2, CoO, and Zn+Cr were studied using electron microscopy. A hierarchical organization of the materials was established: primary particles (8–50 nm) form agglomerates (1–4 μm). Morphological differences were revealed: Fe_2O_3 forms rounded particles (15–25 nm), TiO_2 forms spherical ones (8–12 nm), CoO forms cubic ones (25–35 nm), and Zn+Cr forms a heterophase structure. The narrow distribution of particles indicates uniform synthesis conditions. Structural features determine the functional properties of the materials.

Курьян Николай Николаевич, старший преподаватель кафедры современных технологий программирования факультета математики и информатики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, kurian90@mail.ru.

Научный руководитель – *Ануфрик Славамир Степанович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, anufrick@grsu.by.

УДК 544.77:546.3:535.34

Н. Н. КУРЬЯН

ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ И ИХ ОКСИДОВ

Исследованы оптические характеристики водных растворов наночастиц металлов (Mg, Ti, Zn, Fe, Mn, Mo, Zn-Cr) и их оксидов (MgO, CoO, Fe_2O_3, Mn_2O, SiO_2, TiO_2), полученных методом лазерной абляции. Установлено, что спектры поглощения металлических наночастиц определяются поверхностным плазмонным резонансом, тогда как для оксидов характерны более сложные спектры с участием зарядового переноса и d-d переходов. Интерметаллические наночастицы Zn-Cr и Cu-Sn проявляют гибридные плазмонные резонансы, отражающие электронное взаимодействие компонентов. Полученные данные могут быть использованы для контроля качества синтеза наночастиц и разработки оптических сенсоров.

Изучение оптических характеристик водных растворов наночастиц металлов и их оксидов представляет собой активно развивающееся направление нанофотоники и коллоидной химии. Интерес к этой тематике обусловлен уникальными оптическими явлениями, возникающими при переходе материалов в наноразмерное состояние, что открывает широкие перспективы для создания новых сенсорных систем, фотокатализаторов и функциональных материалов [1].

Для наночастиц благородных металлов (Au, Ag) ключевым эффектом является поверхностный плазмонный резонанс (ППР) – коллективные колебания электронов проводимости, индуцированные падающим светом, которые приводят к появлению интенсивных полос поглощения в видимой области спектра [2]. Исследования показывают, что спектры поглощения наночастиц серебра и золота демонстрируют четкую корреляцию с их морфологией: сферические частицы дают одну симметричную полосу, тогда как анизотропные структуры (стержни, пластины) характеризуются появлением дополнительных полос, соответствующих различным модам плазмонных колебаний [3]. Особое значение имеет чувствительность положения и интенсивности полосы ППР к диэлектрическому окружению, что особенно важно для водных растворов, где наночастицы взаимодействуют с молекулами растворителя и растворенными веществами [2].

При агрегации наночастиц под действием различных факторов происходит сильное смещение плазмонного резонанса и изменение окраски раствора, что лежит в основе колориметрических методов анализа [4]. Эта уникальная особенность позволяет использовать оптические свойства наночастиц для «оптического считывания» изменений, происходящих в растворе при обнаружении ионов токсичных металлов, анионов и пестицидов в воде [2].

Для полупроводниковых наночастиц оксидов металлов (ZnO, TiO_2, CeO_2) характерны эффекты квантового ограничения, влияющие на ширину запрещенной зоны и спектры поглощения и фотолюминесценции [3]. В обзоре, посвященном синтезу, диспергированию и поверхностной функционализации трех доминирующих оксидных наночастиц, используемых для фотокаталитических и УФ-блокирующих применений – диоксида титана, оксида цинка и диоксида церия, особое внимание уделяется поведению этих материалов в водных и неводных средах [3]. Для создания стабильных дисперсий, необходимых для получения воспроизводимых оптических спектров, требуется понимание межчастичных взаимодействий и поверхностной химии материалов. Авторами представлены количественные оценки констант Гамакера в различных средах и измерения изоэлектрических точек для разных оксидных наночастиц, а также обзор добавок, используемых для приготовления стабильных дисперсий [3].

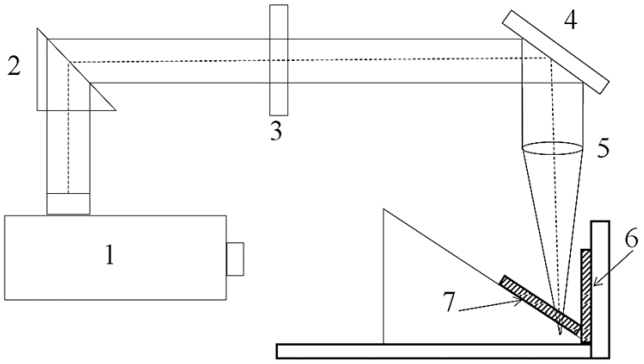
Новейшие исследования демонстрируют переход от фундаментального изучения оптических свойств к созданию функциональных материалов для решения практических задач. В обзоре, охватывающем период с 2011 по 2022 год, анализируется использование наноструктур оксидов металлов для распознавания и удаления загрязнителей воды [4]. Авторы подчеркивают, что оптические свойства наноматериалов (поглощение и эмиссия) могут модулироваться в присутствии специфических загрязнителей – ионов тяжелых металлов, пестицидов, красителей. Это позволяет создавать оптические сенсоры, которые являются простыми, дешевыми и пригодными для использования в полевых условиях, в отличие от сложных аналитических методов, требующих дорогостоящего оборудования и квалифицированного персонала [4].

Интеграция наночастиц в гидрогели и мембраны открывает дополнительные возможности. Полимерная матрица стабилизирует наночастицы и предотвращает их неконтролируемую агрегацию в водном растворе, сохраняя уникальные оптические характеристики, одновременно придавая матрице сенсорные свойства для оптического детектирования загрязнителей непосредственно в процессе фильтрации воды [2; 4].

Таким образом, анализ литературы показывает, что изучение оптических характеристик водных растворов наночастиц металлов и их оксидов развивается по нескольким направлениям: фундаментальное установление связей между размером, формой, структурой наночастиц и их спектральными свойствами [2; 3]; коллоидно-химическое исследование стабильности дисперсий и влияния различных факторов на оптические спектры [3]; аналитическое и сенсорное использование чувствительности оптических свойств наночастиц для создания методов детекции химических и биологических агентов в воде [2; 4].

Исходя из вышеизложенного, цель – исследование оптических свойств суспензий наночастиц оксидов металлов, полученных методом лазерного синтеза.

Синтез наночастиц металлов и их оксидов осуществлялся методом лазерной абляции на экспериментальной установке с применением Nd^{3+}:YAG-лазера (модель LS-2147). Принципиальная схема установки представлена на рисунке 1.

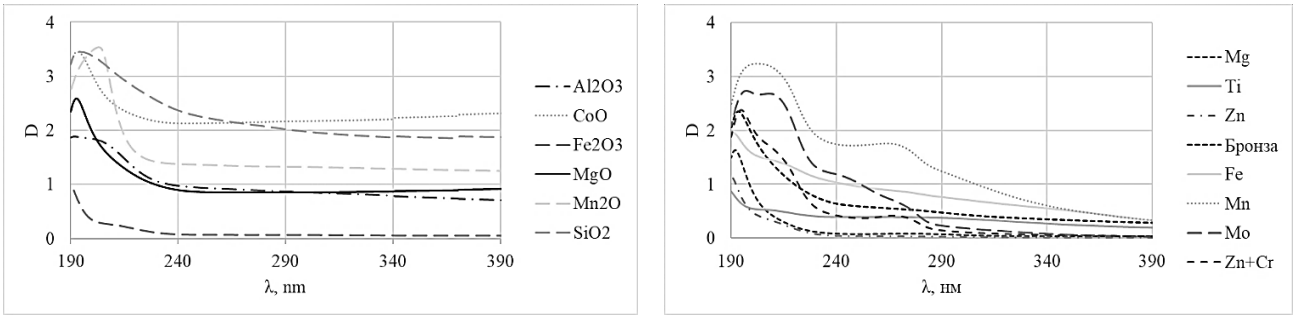


1 – лазер; 2 – поворотная призма; 3 – светофильтр; 4 – поворотное зеркало;
5 – фокусирующая линза; 6 – подложка; 7 – мишень

Рисунок 1 – Схема получения наночастиц металлов

Наработка наночастиц металлов осуществлялась в водной среде в течение 20 минут. Образцы помещали в стеклянную кювету, содержащую 20 мл дистиллированной воды. Воздействие на металлические мишени проводилось расфокусированным лазерным излучением с длиной волны 1064 нм, частотой следования импульсов 10 Гц и энергией (308,20±2,47) мДж. Диаметр расфокусированного пятна составлял приблизительно 1 см. Для обеспечения оптимального осаждения наночастиц на подложку мишень располагалась под углом 45° относительно подложки, угол падения излучения также составлял 45°.

Исследование оптических характеристик (спектров поглощения) наночастиц чистых металлов (Mg, Ti, Zn, Fe, Mn, Mo, Zn-Cr) и их оксидов (MgO, CoO, Fe_2O_3, Mn_2O, SiO_2, TiO_2) выполнялось на спектрофотометрафе Jasco ENCS-760. Полученные спектры поглощения для чистых металлов представлены на рисунке 2(А, Б).



А *Б*

Рисунок 2 – Спектры поглощения чистых металлов (А.) и их оксидов (Б.)

В спектре магния наблюдается интенсивный пик плазмонного резонанса при 295 нм (2,8 D) с шириной около 25 нм, что свидетельствует о монодисперсном распределении сферических частиц. Ниже 230 нм регистрируется резкий рост поглощения, обусловленный межзонными переходами. Титан проявляет широкий спектр с максимумами при 265 нм (объемный плазмонный резонанс) и 325 нм (поверхностные эффекты). Край поглощения расположен при 385 нм, оксидный слой вызывает незначительное уширение пиков. Цинк демонстрирует три максимума: при 205 нм (3,2 D, межзонные переходы), 255 нм (асимметричный пик, FWHM ≈40 нм) и 355 нм (1,5 D, поверхностные плазмоны). Преобладают сферические частицы размером 15–25 нм. Железо дает непрерывный спектр с широким максимумом 270–320 нм и интенсивностью 2,5 D при 220 нм. Отсутствие резких пиков типично для магнитных наноматериалов с окисленной поверхностью. Марганец характеризуется широким пиком при 285 нм (2,2 D) и дополнительной полосой при 215 нм. Край поглощения при 375 нм соответствует ширине запрещенной зоны 3,3 эВ. Молибден проявляет резкий максимум при 225 нм (3,0 D, ширина ≈20 нм) и широкую полосу 280–370 нм. Край поглощения при 385 нм характерен для частиц менее 10 нм. Интерметаллические наночастицы Zn+Cr имеют три максимума: 215 нм, 285 нм (2,9 D,

гибридный плазмонный резонанс) и 365 нм. Ширина пиков 30–35 нм указывает на умеренное распределение частиц по размерам.

Оксид магния дает интенсивную полосу при 195 нм (3,5 D) с резким спадом выше 250 нм. Ширина запрещенной зоны 7,8 эВ, высокая чистота фазы. Оксид кобальта проявляет три максимума: 225 нм (2,8 D, зарядовый перенос $O^{2-} \rightarrow Co^{2+}$), 285 и 355 нм (d-d переходы Co^{2+}). Уширение пиков (45–50 нм) типично для переходных металлов. Гематит (Fe_2O_3) характеризуется интенсивным поглощением во всем УФ-диапазоне с максимумом 250–320 нм и интенсивностью 3,1 D при 210 нм. Слабые линии при 275 и 385 нм соответствуют переходам ионов Fe^{3+}. Оксид марганца демонстрирует широкий пик при 295 нм (2,4 D, ширина ≈60 нм) и полосу при 245 нм. Край поглощения при 375 нм (Eg ≈3,3 эВ), частицы крупные (30–50 нм). Диоксид кремния дает исключительно интенсивную полосу при 185 нм (3,8 D) с резким спадом выше 220 нм. Ширина запрещенной зоны 9,0 эВ, высокая чистота. Диоксид титана (TiO_2) проявляет резкий край при 385 нм и максимум при 325 нм (3,0 D). В области 190–250 нм поглощение достигает 4,2 D. Типичный спектр полупроводника с Eg ≈3,2 эВ. Бронза демонстрирует сложный спектр с основным пиком при 265 нм (2,8–3,2 D, плазмонный резонанс сплава) и вторым максимумом при 205–215 нм (3,0–3,5 D, межзонные переходы в обогащенных медью областях). При увеличении содержания Sn свыше 15 ат.% появляется пик при 305–320 нм, связанный с интерметаллическими фазами. Ширина основного пика 45–65 нм указывает на значительный разброс размеров. Край поглощения при 375–385 нм (Eg ≈3,2–3,3 эВ). Наилучшую стабильность демонстрируют образцы с 10–15 % Sn.

Анализ спектров поглощения показал, что оптические характеристики наночастиц определяются их природой, размером, морфологией и фазовым составом. Для металлических наночастиц характерны пики плазмонного резонанса в УФ-области, чувствительные к форме и размеру частиц. Оксидные наночастицы проявляют более сложные спектры с участием зарядового переноса, d-d переходов и межзонных переходов, причем ширина запрещенной зоны варьирует от 3,2 эВ (TiO_2, Fe_2O_3) до 9,0 эВ (SiO_2). Интерметаллические наночастицы Zn+Cr и Cu-Sn демонстрируют гибридные плазмонные резонансы, отражающие электронное взаимодействие компонентов. Полученные данные могут быть использованы для контроля качества синтеза и разработки оптических сенсоров на основе исследованных материалов.

Список литературы

1. Mao, Y. Metal Oxide Nanomaterials: From Fundamental to Applications / Y. Mao, S. Gupta. – Basel : MDPI, 2023. – 212 p.

2. Du, X. Optical properties of metal nanoparticles and their influence on the design of optical sensors for water pollutants / X. Du, Y. Wang, J. Li // Small. – 2014. – Vol. 10, № 23. – P. 4870–4889.

3. Pratsinis, S. E. Synthesis, dispersion, and surface functionalization of oxide nanoparticles for photocatalytic, UV-blocking, and sunscreen applications / S. E. Pratsinis, G. A. Sotiriou, P. G. Weidler // Science and Technology of Advanced Materials. – 2013. – Vol. 14, № 2. – Art. 023001.

4. Chakraborty, U. Advanced metal oxides nanostructures to recognize and eradicate water pollutants / U. Chakraborty, G. Kaur, H.-G. Rubahn // Chemosphere. – 2024. – Vol. 348. – Art. 140692.

The optical properties of aqueous solutions of metal nanoparticles (Mg, Ti, Zn, Fe, Mn, Mo, Zn-Cr) and their oxides (MgO, CoO, Fe_2O_3, Mn_2O, SiO_2, TiO_2) obtained by laser ablation were studied. It was found that the absorption spectra of metal nanoparticles are determined by surface plasmon resonance, while oxides are characterized by more complex spectra involving charge transfer and d-d transitions. Intermetallic Zn-Cr and Cu-Sn nanoparticles exhibit hybrid plasmon resonances reflecting the electronic interactions of the components. The obtained data can be used for quality control of nanoparticle synthesis and the development of optical sensors.

Курьян Николай Николаевич, старший преподаватель кафедры современных технологий программирования факультета математики и информатики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, kurian90@mail.ru.

Научный руководитель – *Ануфрик Славамир Степанович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, anufrick@grsu.by.

УДК 535.015

А. А. КУСТАНОВИЧ, С. В. ШЕВЧИК

ПРИМЕНЕНИЕ CdSe/ZnS ДЛЯ ОЦЕНКИ pH ФЛЮОРЕСЦЕНТНЫМ МЕТОДОМ

Основная цель работы – изучить эффекты влияния кислотности среды на спектры флюоресценции и поглощения исследуемых CdSe/ZnS квантовых точек (КТ), чтобы в дальнейшем использовать эти эффекты при исследовании животных и растительных биологических клеток. Изменения в оптических спектрах КТ рассматриваются как результат эффекта Штарка, который происходит при воздействии на КТ CdSe/ZnS внешнего электрического поля, обусловленного наличием ионов

H^+ и гидроксил ионов OH^- в кислотной или щелочной водной среде. Для оценки pH рассматриваются так называемые спектры Штарка – разностные спектры поглощения и флюоресценции КТ в электрическом поле и в условиях, когда поле выключено. Полученные спектры Штарка сравниваются с производными спектрами в водных растворах и биологических клетках разной природы.

Эффект влияния электрического поля на атомно-молекулярные системы был открыт Штарком еще в 1913 году и известен как эффект Штарка. Эффект заключается в расщеплении и смещении спектральных линий атомов, молекул и твердых тел под воздействием внешнего электрического поля. В настоящее время этот эффект испытывает настоящий ренессанс благодаря высокой чувствительности спектров квантовых точек различной природы к полярности ближайшего окружения. Наиболее наглядно этот эффект проявляется для CdSe/ZnS КТ и описан для систем пониженной размерности как квантово-размерный эффект Штарка [1].

Одним из основных факторов, влияющих на оптические свойства наночастиц CdSe/ZnS и вообще любых хромофорных систем является полярность окружения. Это явление при широкой вариации растворителей, как полярных, так и неполярных известно как сольватохромия и наиболее простое его применение – в производстве так называемых лакмусовых полосок, меняющих свой цвет в зависимости, например, от pH растворов. В данной работе рассматривается, как меняют свой цвет, а точнее положение максимума полосы флуоресценции или края поглощения, в зависимости от pH водные растворы КТ и смещение спектров поглощения и флюоресценции квантовых точек в средах с разным водородным показателем pH. Для интерпретации результатов используется методика обработки спектров, обусловленная физикой эффекта Штарка (рисунок 1).

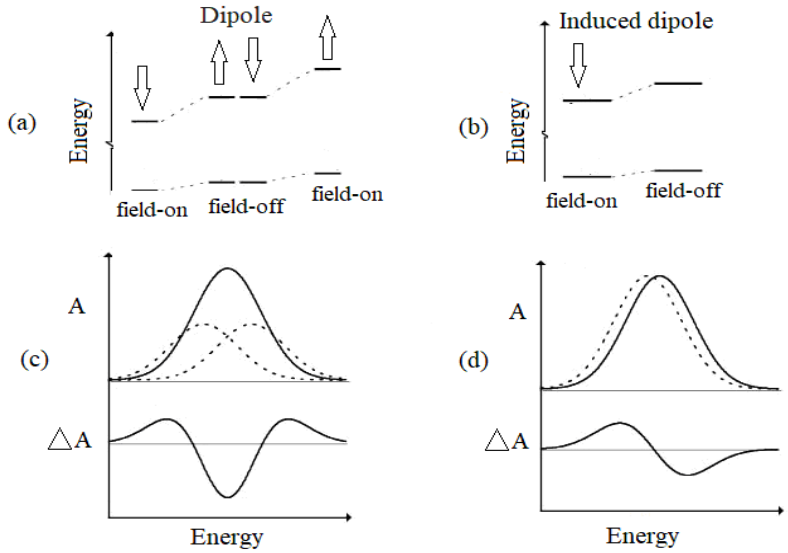


Рисунок 1 – Влияние электрического поля (field-on) на положение уровней энергии (a, b) и форму полос электронных переходов (c, d) двухуровневой квантовой системы, характеризуемой наличием дипольного момента (a, c) или индуцированного полем дипольного момента (b, d)

Изменения, вызванные эффектом Штарка – смещение (рис. 1*b*) или расщепление (рис. 1*a*) энергетических уровней атомов при воздействии внешнего однородного электрического поля приводят к смещению (рис. 1*d*) или расщеплению полос (рис. 1*c*). Разностные спектры ΔA, которые можно получить вычитанием спектров квантовой системы в условиях field-on и field-off, как это хорошо видно на рис. 1*c* и *d*, представляют вторую (рис. 1*c*) и первую (рис. 1*d*) производную от исходного спектра A в отсутствие электрического поля (field-off).

На рисунке 2 приведены спектры флюоресценции водных растворов КТ CdSe/ZnS, а также их штарковские спектры при pH 8 и pH5 с 1-й и 2-й производной от спектра флуоресценции КТ CdSe/ZnS при pH 7.

В дальнейшем нами принято считать, что слабокислой среде должна соответствовать аппроксимация спектра Штарка первой производной, а слабощелочной среде – второй производной от соответствующего спектра электронного перехода, зарегистрированного в условиях нейтрального pH 7 или неполярного растворителя. Так на рисунке 3, а показаны спектры флуоресценции, полученные от капли толуола и здоровых тканей кишки [2], окрашенных CdSe/ZnS КТ. Как видно из этого рисунка, нормированные спектры флуоресценции КТ в толуоле и здоровых тканях практически совпадают по форме, поэтому можно считать, что оба эти спектра соответствуют случаю поле выключено (field-off).

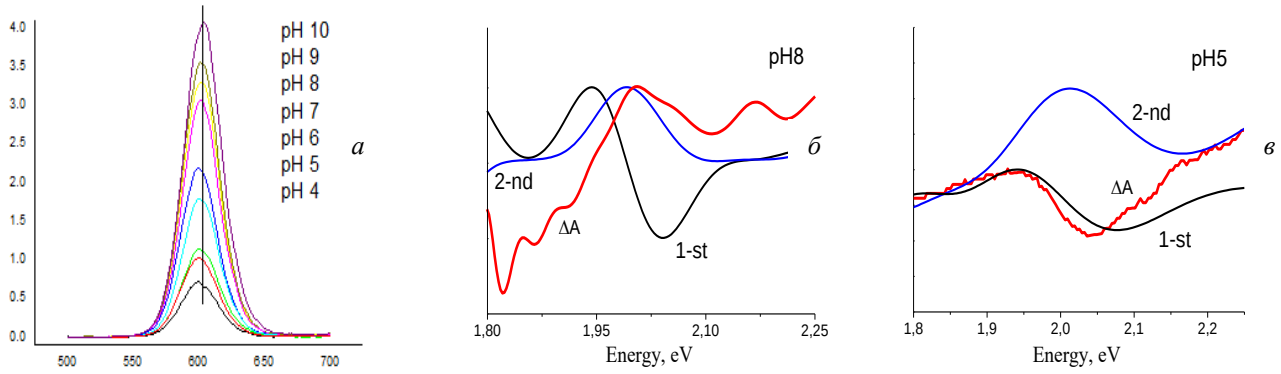


Рисунок 2 – Спектры флюоресценции CdSe/ZnS КТ при различных значениях pH (а), спектры Штарка (ΔA, б и в), полученные как разности между спектрами поглощения CdSe/ZnS КТ в водных растворах при pH 8 (б) и pH5 (в) и спектром поглощения CdSe/ZnS КТ в водном растворе при pH7 (field-off), а также первая (1-st, б и в) и вторая (2-nd, б и в) производные от спектра поглощения CdSe/ZnS КТ в водном растворе при pH7 (field-off)

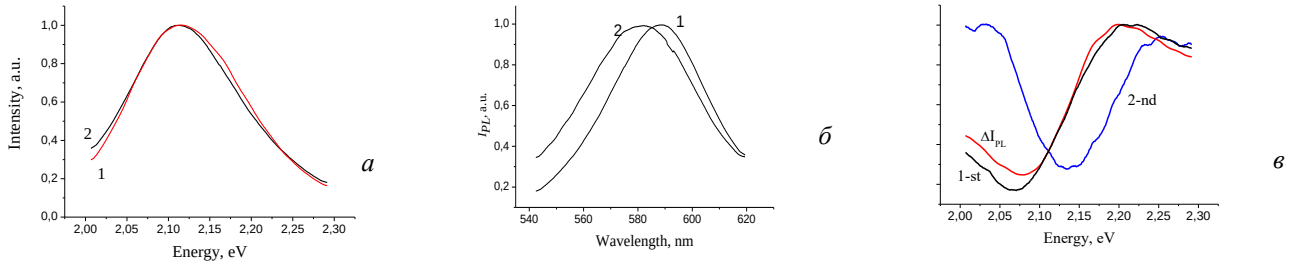


Рисунок 3 – Спектры флюоресценции толуола и здоровой ткани кишки, окрашенных CdSe/ZnS КТ (а); здоровой ткани (б, 1) и раковой ткани кишки (б, 2); спектр Штарка (ΔI_{PL}, в), полученные как разность между спектрами флюоресценции CdSe/ZnS КТ в здоровой (field-off) и раковой ткани (field-on), а также первая (1-st, в) и вторая (2-nd, в) производные от спектра поглощения CdSe/ZnS КТ в здоровой ткани (field-off)

На рисунке 3*б* представлены спектры флуоресценции тканей здоровой (*б*, 1) ткани и раковой ткани кишки (*б*, 2), а также результаты обработки этих спектров по методике Штарка (*в*). Сравнение результатов на рисунках 2*в* и 3, в позволяют утверждать, что раковые ткани имеют кислую реакцию. В рассматриваемых нами случаях изменение поля вызвано разным количеством катионов водорода и гидроксил ионов в водных растворах и/или различными макроионами в биологических тканях [3][5].

Список литературы

1. Покутний, С. И. Квантово-размерный эффект Штарка в квазинульмерных полупроводниковых структурах / С. И. Покутний // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34, вып. 9. – С. 1120–1124.

2. Мотевич, И. Г. Программное окрашивание гистологических срезов тканей по спектрам люминесценции квантовых точек CdSe/ZnS // И. Г. Мотевич, А. В. Копыцкий, В. Н. Хильманович, Н. Д. Стрекаль, О. В. Шиман, С. А. Маскевич // Журнал прикладной спектроскопии. – 2025. – Т. 92, № 2. – С. 222–226.

3. Стрекаль, Н. Д. Штарковская спектроскопия для биологических систем / Н. Д. Стрекаль, С. А. Маскевич // Наука и инновации. – 2013. – № 11. – С. 62–65.

Кустанович Артем Анатольевич, студент 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, kustanovich_aa_25@student.grsu.by.

Шевчик Сусанна Владимировна, студентка 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, shevchik_sv_25@student.grsu.by.

Научный руководитель – *Стрекаль Наталья Дмитриевна*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, strekal@grsu.by.

[5]Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф26РНФ-173).

УДК 621.785.533

В. А. ЛЕШОК

ПОВЫШЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

В ходе исследования была изучена возможность повышения кинетических показателей ионно-плазменного азотирования конструкционной низкоуглеродистой стали предварительной деформацией. Исследование проводили на стали 10. Пластическую деформацию осуществляли на гидравлическом прессе. Степень деформации контролировали по относительному изменению высоты образцов. Ионно-плазменное азотирование проводили на установке ФТИ 0.361 при температуре 510 °С и времени насыщения 3 ч. Кинетическими показателями ионно-плазменного азотирования являлись толщина и средняя скорость роста азотированного слоя. Экспериментально оценено влияние степени предварительной пластической деформации на кинетические параметры ионно-плазменного азотирования. Установлено, что при всех исследуемых значениях степени деформации происходило повышение кинетических показателей. Из всех исследуемых значений наибольшее повышение показателей обеспечивала степень деформации 25–35 %. Обсуждены возможные физические причины установленных закономерностей.

Ионно-плазменное азотирование (ИПА) является популярным видом химико-термической обработки (ХТО) в машиностроении [1]. Среди многих изделий, подвергаемых ИПА, можно выделить: зубчатые колёса, коленчатые валы, шестерни, проставки, шпиндели, кулачки, штампы, гидравлические штоки, автомобильные шайбы, детали подшипников, клапаны и др. Сдерживающим фактором расширения применения ИПА в машиностроении являются высокие энергетические затраты. Известны выдержки при температурах до 580 °С и времени до 10–15 ч. Таким образом, интенсификация (ускорение) ХТО, в том числе ИПА, является актуальным направлением современных исследований.

Научная школа профессора Ворошнина Л.Г. на кафедре «Материаловедение в машиностроении» Белорусского национального технического университета знаменита многочисленными положительными результатами в области ускорения применяемых в промышленности видов ХТО. В рамках научных интересов школы среди многочисленных приемов ускорения ХТО для данного исследования была выбрана пластическая деформация. Ранее школой были получены интересные результаты по этому приему интенсификации. В частности, автором [2] был разработан способ борирования микрообъектов во вращающемся контейнере. В данном случае температурно-временные режимы борирования должны были бы приводить к рекристаллизационным процессам, снятию деформированного состояния и, как следствие, к исчезновению ускоряющего эффекта. Однако было доказано, что во время вращения барабана микрообъекты постоянно соударяются друг о друга. То есть постоянно во время насыщения на микрообъекты воздействует пластическая деформация. Показано, что рекристаллизационные процессы не успевали происходить. Тем самым обеспечивалось постоянное сохранение деформированной структуры, приводящей к ускорению борирования.

В литературе не до конца исследовано влияние предварительной деформации на кинетические показатели ИПА конструкционной низкоуглеродистой стали 10. Также интерес представляет анализ влияния степени предварительной пластической деформации на данные показатели.

Таким образом, на основании вышесказанного, исследование проводили на низкоуглеродистой стали 10 (таблица 1). Исходная структура до насыщения была равновесной, сформированной после отжига.

Таблица 1 – Химический состав исследуемой низкоуглеродистой стали 10.

Химические элементы	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
Содержание, масс. %	0,07–0,14	0,17–0,37	0,35–0,65	≤0,030	≤0,035	≤0,15	≤0,30	≤0,30	остальное

На следующем этапе осуществляли пластическую деформацию на гидравлическом прессе. В ходе деформации образцы имели комнатную температуру, их разогрев не допускался. Нагрузку подбирали таким образом, чтобы в образце сформировать деформацию необходимой степени. Степень деформации контролировали по относительному изменению высоты образцов по формуле (1):

$$\varepsilon = \left(\frac{l_i - l_0}{l_0}\right) \cdot 100, \quad (1)$$

где l_i – высота образца после i-го режима деформации, l_0 – высота образца до деформации.

Далее исследуемые образцы подвергались ИПА при температуре 510 °С и времени насыщения 3 ч на установке ФТИ 0.361. При работе установки использовались три технологических газа: азот, водород и аргон. Водород получали автоматически путем электролиза бидистиллированной воды. Тлеющий разряд формировал-

ся между насыщаемыми изделиями (катодом) и стенками вакуумной камеры (анодом). После азотирования проводились металлографические исследования на оптическом микроскопе Leica. Дюрометрические исследования проводились на микротвердомере ПМТ-3М. Нагрузка на индентор составляла 100 гс.

В таблице 2 представлены результаты влияния деформации на толщину азотированного слоя. На каждое исследуемое значение степени деформации приходилось по пять образцов. Проводилась математическая обработка экспериментальных результатов.

Таблица 2 – Влияние степени деформации на толщину азотированного слоя конструкционной низкоуглеродистой стали 10

Степень деформации, %	Толщина азотированного слоя, мкм
0	98 ± 2
5	108 ± 2
15	132 ± 3
25	149 ± 3
35	148 ± 3
45	146 ± 3

На рисунке 1 представлено влияние степени деформации на среднюю скорость роста азотированного слоя, которая определялась по формуле (2):

$$v_i = \frac{h_i}{\tau}, \tag{2}$$

где h_i – толщина азотированного слоя после i-го режима деформации, τ – время ИПА.

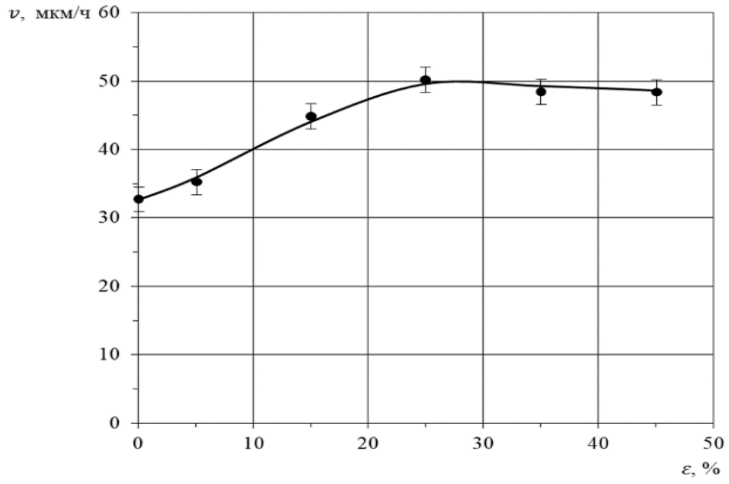


Рисунок 1 – Влияние степени деформации на среднюю скорость роста азотированного слоя

Как показывают экспериментальные результаты, предварительная пластическая деформация при всех значениях степени деформации обеспечивала повышение кинетических показателей ИПА. Из всех исследуемых значений наибольшее повышение показателей оказала степень деформации 25–35 %. Для установления физических причин полученных экспериментальных результатов воспользуемся классическими теоретическими положениями ХТО и физики деформированного материала. Необходимо отметить, что механизмы ускорения массопереноса при ХТО в деформированных материалах до сих пор, по-видимому, окончательно не выяснены. Научная школа профессора Ворошнина Л.Г. объясняет это следующим образом.

Одной из возможных причин характера зависимости скорости насыщения от степени деформации является ее связь с изменением структуры холоднодеформированного материала, в частности с качественными изменениями структуры при переходе между различными стадиями пластической деформации. На рисунке 2 представлены кривые «напряжение – степень деформации» монокристаллов металлов [3]. Отмечается сходный характер зависимости напряжения в кристаллической решетке от степени деформации и установленных экспериментальных результатов по кинетическим показателям. Таким образом, рассмотрим предполагаемую зависимость ускорения ИПА от стадий пластической деформации.

Первая стадия пластической деформации (стадия легкого скольжения) соответствует степеням деформации до 10 %. Эта стадия наблюдается в самом начале деформационного упрочнения, однако в реальных промышленных процессах она быстро заканчивается из-за многократной смены систем скольжения. По мере увеличения степени деформации возрастает количество вакансий и изолированных дислокаций. Дислокации не

закреплены. Они беспрепятственно перемещаются по одной системе плоскостей. Насыщающие элементы взаимодействуют с дефектами. Дислокации выступают как пути ускоренной диффузии. Дополнительное ускорение дает возрастающая концентрация точечных дефектов. Отмечается резкий рост кинетических показателей ИПА.

Вторая стадия пластической деформации (стадия линейного упрочнения) достигается при степени деформации 10–20 %. Отмечается лавинообразный рост концентрации вакансий и дислокаций. Дислокации распределены неравномерно по всему объему. Они активно взаимодействуют и образуют хаотичное, но плотное скопление – запутанные клубки дислокаций. Скольжение дислокаций обнаруживается по нескольким системам плоскостей. Образуемая дефектная структура выступает как развитая сеть для ускоренной диффузии насыщающих элементов. Продолжается рост кинетических показателей ИПА.

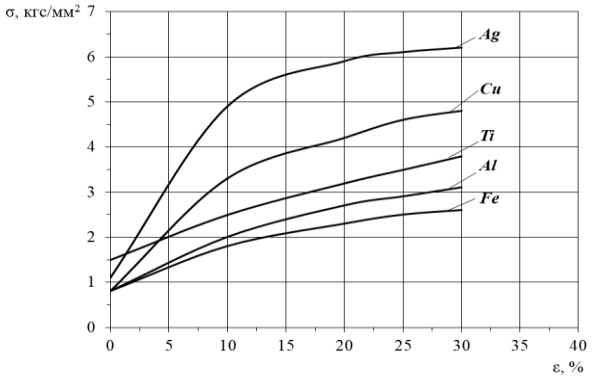


Рисунок 2 – Влияние степени деформации на напряжение различных монокристаллов, систематизированные данные [3]

Третья стадия пластической деформации (стадия динамического возврата) возникает при степенях деформации выше 20 %. Рост дефектов продолжается, но отмечается снижение его скорости. Под действием высоких напряжений дислокации перестраиваются из хаотичных клубков в самоорганизованную структуру. Они собираются вместе и образуют протяженные сплошные стенки (малоугловые границы). Образуется ячеистая субструктура. Стенки ячеек – области с высокой плотностью дефектов. Напротив, внутренний объем ячеек – области с низкой плотностью дефектов. При движении винтовые дислокации меняют плоскость скольжения, тем самым обходя препятствия (механизм поперечного скольжения). Концентрация вакансий начинает снижаться из-за их аннигиляции на стенках ячеек. Происходит качественное изменение в диффузии насыщающих элементов. Отмечается анизотропия скорости диффузионного потока. Вдоль стенок ячеек наблюдается высокая скорость, поперек – падение скорости. Скорость диффузии по внутреннему объему ячейки еще меньше, так как в нем падает плотность дефектов. Отмечается замедление роста и выход на плато кинетических показателей ИПА.

Список литературы

1. Ворошнин, Л. Г. Теория и технология химико-термической обработки : учеб. пособие / Л. Г. Ворошнин, О. Л. Менделеева, В. А. Сметкин. – М. : Новое знание, 2010. – 304 с.

2. Константинов, В. М. Диффузионно-легированные сплавы для защитных покрытий: дис. … д-ра техн. наук / В. М. Константинов. – Мн., 2008. – 474 л.

3. Хоникомб, Р. Пластическая деформация металлов: пер. с англ. / Р. Хоникомб; под ред. Б. Я. Любова. – М. : Мир, 1972. – 408 с.

During the study, the possibility of improving the kinetic parameters of ion-plasma nitriding of low-carbon structural steel by means of preliminary deformation was investigated. The study was carried out on Steel 10. Plastic deformation was performed using a hydraulic press. The degree of deformation was controlled by the relative change in specimen height. Ion-plasma nitriding was carried out using an FTI 0.361 unit at a temperature of 510 °C for 3 h. The kinetic parameters of ion-plasma nitriding were the thickness of the nitrided layer and the average growth rate of the nitrided layer. The effect of the degree of preliminary plastic deformation on the kinetic parameters of ion-plasma nitriding was evaluated experimentally. It was established that, at all studied deformation levels, the kinetic parameters increased. Among all the investigated values, the greatest improvement was achieved at a deformation degree of 25–35%. Possible physical reasons for the observed regularities are discussed.

Лешок Владислав Андреевич, молодой ученый, кафедра «Материаловедение в машиностроении» Белорусского национального технического университета, г. Минск, Республика Беларусь, leshok.vlad@bntu.by.

Научный руководитель – *Константинов Валерий Михайлович*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение в машиностроении» Белорусского национального технического университета, г. Минск, Республика Беларусь, vm.konstantinov@bntu.by.

УДК 533.9.082, 533.922, 533.924, 535.243.2

А. В. МАРКОВСКАЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО АТОМНО-ЭМИССИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА НА КОЛИЧЕСТВО И ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ИНТЕНСИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПОЧЕЧНЫХ КАМНЕЙ

Важной задачей в области урологии является определение химического состава почечных камней, так как данная информация помогает врачам определить причины возникновения почечных камней у пациента, а также подобрать эффективное лечение. Поэтому для получения спектра конкремента необходимо подбирать параметры лазерного атомно-эмиссионного спектрометра таким образом, чтобы количество и интенсивность спектральных линий были наибольшими.

При работе в области лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии, исследователи часто используют сдвоенные лазерные импульсы. Преимущество сдвоенных лазерных импульсов ($\Delta t \neq 0$ мкс) в сравнении с одиночными ($\Delta t = 0$ мкс) состоит в том, что первый из импульсов образует абляционную плазму [1], а второй импульс возбуждает эмиссионные спектры в самой плазме и не теряет свою энергию на взаимодействие с поверхностью образца, что приводит к значительному увеличению относительных интенсивностей линий в спектрах. Однако важно подбирать время между сдвоенными лазерными импульсами таким образом, чтобы к моменту достижения поверхности вторым лазерным импульсом плазма уже успела остыть, но при этом в ней ещё не произошли рекомбинационные процессы. Время между сдвоенными лазерными импульсами для различных материалов определяется индивидуально, так как оно обусловлено теплофизическими свойствами элементов, входящих в их состав.

В работе исследовалось влияние времени задержки Δt между сдвоенными лазерными импульсами и способов получения суммарного атомно-эмиссионного спектра на относительную интенсивность линий в спектрах почечного камня.

Результатами эксперимента являются спектры, полученные при различных временах Δt между сдвоенными лазерными импульсами, которые принимали значения 0 мкс, 1 мкс и 10 мкс. Результатами эксперимента также являются суммарные спектры, полученные либо наложением семидесяти спектров после взаимодействия семидесяти последовательных лазерных импульсов с одной точкой поверхности вещества, либо полученные в результате наложения семидесяти спектров, но от семи близко расположенных точек поверхности, с каждой из которых взаимодействовало десять последовательных лазерных импульсов.

На рисунке 1 и рисунке 2 приведены спектры, полученные при проведении эксперимента.

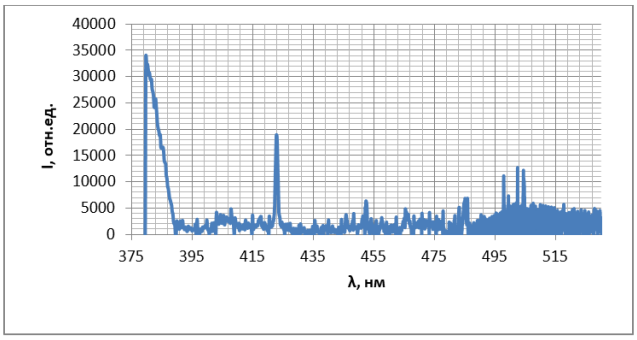


Рисунок 1 – Спектр почечного камня, полученный при Δt, равном 1 мкс, и взаимодействии лазерного излучения с одной точкой поверхности

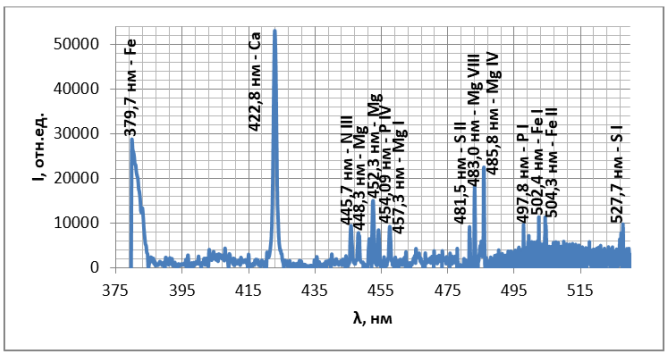


Рисунок 2 – Спектр почечного камня, полученный при Δt, равном 10 мкс, и взаимодействии лазерного излучения с семью точками поверхности

В результате эксперимента было установлено:

1) при наличии времени между сдвоенными лазерными импульсами, увеличивается интенсивность линий в спектре почечного камня,

2) суммарный спектр, полученный при взаимодействии лазерного излучения с семью точками поверхности, увеличивает интенсивность и количество линий в спектре, отличных от шумовых. Вероятнее всего это связано с тем, что близлежащие точки образца могут иметь отличный химический состав.

На основании результатов эксперимента для качественного анализа был выбран спектр, который получен при времени Δt между сдвоенными лазерными импульсами равном 10 мкс и взаимодействии лазерного излучения с семью точками поверхности, а не с одной. Результаты элементного анализа представлены на рисунке 2.

Спектральная линия серы на длине волны 227,7 нм имеет слабо выраженный характер (в спектре, приведённом на рисунке 1, данная линия вообще отсутствует), так как в спектре существенной интенсивностью обладают линии железа на длине волны 379,7 нм и кальция на длине волны 422,8 нм.

Список литературы

1. Miziolek, A. W. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) / A. W. Miziolek, V. Palleschi, I. Schechter // Fundamentals and Applications. – Cambridge : Cambridge University Press, 2006. – P. 129–132.

An important task in the field of urology is to determine the chemical composition of kidney stones, as this information helps doctors to identify the causes of kidney stones in patients and to choose an effective treatment. Therefore, in order to obtain a spectrum of a concrement, it is necessary to select the parameters of a laser atomic emission spectrometer in such a way that the number and intensity of spectral lines are the highest.

Марковская Анна Вячеславовна, студентка 5 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, markovskaaanna2@gmail.com.

Научный руководитель – *Ермалицкая Ксения Фёдоровна*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, ermalitskaia@gmail.com.

УДК 621.357.8

И. А. МАШУКЕВИЧ, Б. А. МЯКИШ

БАРЬЕРНОЕ АНОДИРОВАНИЕ ГАДОЛИНИЯ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ЛИМОННОЙ И БОРНОЙ КИСЛОТЫ

Высокая реакционная способность лантанидных металлов создает проблемы для электрохимического анодирования поверхностей с целью получения наноструктурированных покрытий. В данной работе представлено систематическое экспериментальное исследование барьерного анодного окисления лантанида гадолиния в водных растворах лимонной и борной, кислот.

Умеренная химическая активность гадолиния по сравнению с другими лантанидами делает его перспективным кандидатом для образования наноструктурированных оксидов методом электрохимического анодирования. Оксиды гадолиния, в первую очередь Gd_2O_3, обладают уникальными свойствами, позволяющими использовать их в специализированных высокотехнологичных приложениях. В ядерной технике керамика на основе Gd_2O_3 или композиты (например, с Cr_2O_3) используются в регулирующих стержнях для поглощения нейтронов и регулирования цепных реакций [1]. В качестве радиационной защиты добавление Gd_2O_3 в бетон или стекло усиливает поглощение нейтронов, что имеет решающее значение для защиты персонала на ядерных объектах [2]. В нейтронной оптике он служит компонентом в коллиматорах и фильтрах для неразрушающего контроля [3]. В электронике и фотонике его широкая запрещенная зона (~5,4 эВ) делает его отличным диэлектриком и изолятором [4], а его высокий показатель преломления ценен для оптических применений [5].

Первое барьерное анодирование гадолиния было описано в 1982 году Nishikawa и Minami с использованием растворов 0,01 М Na_2HPO_4 – 5 % H_2O – этиленгликоль и 0,01 М KOH – 5 % H_2O – этиленгликоль [6]. В другом исследовании стержень из гадолиния был анодирован в растворе метасиликата натрия концентрацией 0,1 М (0,1 М $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$), и был проанализирован состав полученной пленки [7]. Позже были предложены ультратонкие анодные пленки оксида гадолиния [8] и впоследствии исследованы как перспективные диэлектрики затвора с высокой диэлектрической проницаемостью [9].

В данной работе лом гадоления был механически подготовлен и подвергнут анодированию в водных растворах лимонной и борной кислот. Были исследованы вольт-ток-временные характеристики анодирования.

Экспериментальные образцы были изготовлены из чистого гадолиниевого лома (99,9 %). Кусочки гадолиниевого лома имели размеры 10×20×1 мм³. Их поверхности были тщательно подготовлены путем последовательной механической полировки с обеих сторон: первоначальной шлифовки наждачной бумагой с возрастаю-

щей зернистостью (P40, P240, P320, P1000 и P2000, в соответствии со стандартом ANSI), за которой следовала окончательная полировка пастой GOI на войлочном круге.

Барьерное анодирование гадолиния проводилось в 1 %-м водном растворе лимонной кислоты и в 0,5 М растворе борной кислоты с добавлением 0,05 М тетрабората натрия для улучшения подвижности ионов. Процессы анодирования проводились при плотности тока ~6 мА $см^{-2}$. Анодирование проводилось без перемешивания электролита. В обоих случаях наблюдалось интенсивное образование газовых пузырьков как на аноде, так и на катоде. На аноде гадолиний окислялся:

$$2Gd - 6e^{-} \rightarrow 2Gd^{3+} \quad (1)$$

Ионы Gd^{3+} реагируют с гидроксид-ионами (OH^{-}), которые образуются на поверхности анода в результате разложения воды, или с кислородом из оксо-соединений кислот. Образование анодного Gd_2O_3 происходит через промежуточные соединения в виде гидроксида или гидратированного оксида. Для простоты общий процесс анодного окисления можно представить следующей формальной реакцией:

$$Gd^{3+} + 3OH^{-} \rightarrow Gd(OH)_3 \text{ (промежуточное соединение)} \quad (2)$$

$$2Gd(OH)_3 \rightarrow Gd_2O_3 + 3H_2O \text{ (дегидратация, стимулированная полем)} \quad (3)$$

Формальная общая реакция анодного окисления Gd может быть записана как:

$$2Gd + 3H_2O \rightarrow Gd_2O_3 + 6H^{+} + 6e^{-} \quad (4)$$

Процесс сопровождается реакцией выделения кислорода, о чем свидетельствует выделение газовых пузырьков:

$$2H_2O - 4e^{-} \rightarrow O^2\uparrow + 4H^{+} \quad (5)$$

Кислотная среда, хелатирующие свойства лимонной кислоты и температура способствуют процессам химического растворения металлического гадолиния:

$$2Gd + 6H^{+} \rightarrow 2Gd^{3+} + 3H_2\uparrow \quad (6)$$

Помимо растворения металла, ожидается химическое травление анодного Gd_2O_3. Этот процесс значительно более выражен в лимонной кислоте, чем в борной. Основная причина заключается в том, что ионы Gd^{3+} образуют растворимые, стабильные комплексы $[Gd(C_6H_4O_7)]^{+}$ с цитратными анионами в растворе. Это комплексообразование эффективно удаляет Gd^{3+} из пути осаждения оксида на поверхности, тем самым способствуя травлению. В борной кислоте отсутствие таких сильных комплексообразующих лигандов приводит к существенно более низкой скорости химического растворения оксида, способствуя его чистому росту.

Таким образом, на аноде происходят два конкурирующих процесса: образование анодного Gd_2O_3 и его химическое/электрохимическое растворение. В борной кислоте зависимость напряжения от времени (рис. 1а) и наблюдаемая стабильность пленки указывают на то, что доминирующим процессом является образование Gd_2O_3. В отличие от этого, нестабильная зависимость напряжения от времени в лимонной кислоте (рис. 1б) указывает на то, что доминирующим процессом является растворение, эффективно предотвращающее образование сплошной барьерной пленки.

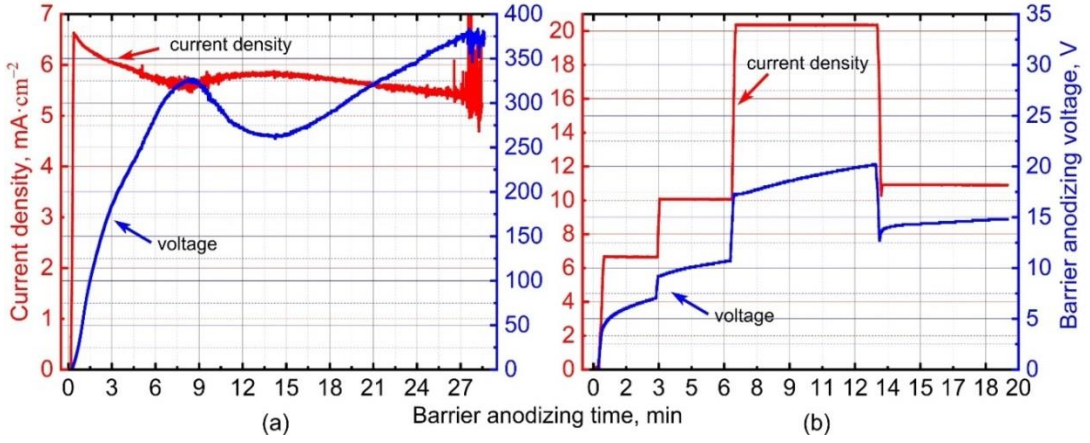


Рисунок 1 – Зависимости напряжения и тока от времени во время барьерного гальваностатического анодирования в (а) 0,5 М H_3BO_3 с 0,05 М Na_7B4O_7 и (б) 1% $C_6H_8O_7$ на поверхности механически подготовленного лома гадолиния

Начальная стадия анодирования гадолиния в борной кислоте (рис. 1а) демонстрирует классическое поведение: линейное повышение напряжения при гальваностатической поляризации. Незначительные изменения плотности тока заметно изменяют наклон кривой. На этом этапе на исходной металлической поверхности образуется сплошной барьерный слой Gd_2O_3, как описано общей схемой реакции (уравнения (2)–(4)). При фиксированной плотности тока скорость роста Gd_2O_3 – и, следовательно, толщина пленки – остается постоянной. Поскольку напряжение прямо пропорционально толщине этого изолирующего слоя, оно линейно возрастает со временем. Относительно крутой наклон указывает на то, что образующийся Gd_2O_3 обладает хорошими диэлектрическими свойствами, эффективно препятствуя протеканию тока и требуя более высокого напряжения для поддержания заданного тока. Эта характерная реакция свидетельствует о сильном преобладании образования оксида над растворением.

Примерно через 8 мин скорость роста замедляется, и напряжение начинает снижаться (рис. 1а). Этот переход интерпретируется следующим образом. Предполагается, что локальный нагрев пленки и прилегающего электролита, развивающийся в течение этого периода, ускоряет химическое растворение Gd_2O_3. Как только скорость растворения превысит скорость окисления, толщина пленки уменьшится. Примерно через 13 мин устанавливается новое динамическое равновесие: более тонкая пленка демонстрирует более низкое ионное сопротивление, что уменьшает джоулево нагревание и, следовательно, замедляет скорость растворения. В результате возобновляется чистый рост оксида, что приводит к повторному увеличению напряжения с более плавным наклоном, чем на начальной стадии.

Измененная вольт-ток-временной характеристики роста может также быть обусловлена микроструктурной эволюцией внутри оксида. Первоначально аморфный Gd_2O_3 может кристаллизоваться или гидратироваться (например, до GdOOH) при длительном анодировании при высоких напряжениях (~400 В). Такие фазовые превращения изменяют электрическое сопротивление пленки, изменяя напряжение, необходимое для поддержания постоянного тока. Кроме того, вторичные реакции в электролите на основе борной кислоты могут приводить к образованию других соединений гадолиния, таких как гидроксиды, бораты или растворимые комплексы, что усложняет химию межфазной границы.

Примерно через 26 мин (рис. 1а) напряжение достигает 370 В, и процесс анодирования сопровождается значительными колебаниями тока и напряжения, а также видимым искрением по всей поверхности лома гадолиния. Хотя вольт-ток-временная характеристика на рис. 1а имеет некоторые общие черты с пористым анодированием (например, плато напряжения с последующим подъемом), четко выраженная область стационарного состояния отсутствует. Прямое визуальное наблюдение подтверждает, что полученная пленка обладает барьерной морфологией.

В отличие от типичной линейной зависимости напряжения от времени, наблюдаемой при барьерном анодировании обычных вентильных металлов, гадолиний демонстрирует принципиально иное поведение в лимонной кислоте по сравнению с борной кислотой (рис. 1). Показательным отличием является эффект изменения плотности приложенного тока. В борной кислоте (рис. 1*а*) уменьшение плотности тока с 6 до 5,5 мА·см$^{-2}$ (уменьшение на 0,5 мА см$^{-2}$) приводит к заметному уменьшению наклона кривой повышения напряжения. Напротив, в лимонной кислоте (рис. 1*б*) даже увеличение плотности тока с 10 до 20 мА см$^{-2}$ (увеличение на 10 мА·см$^{-2}$) приводит к незначительному изменению скорости развертки напряжения. Эта выраженная нечувствительность указывает на то, что общий анодный процесс в лимонной кислоте ограничивается не ростом оксида, а сопутствующей химической реакцией – наиболее вероятно, растворением гадолиния или его оксида, которое происходит со скоростью, сопоставимой со скоростью электрохимического окисления.

В заключение следует отметить, что была разработана методика подготовки гадолиниевого лома, а также проведены исследования вольт-ток-временных характеристик анодных тонких пленок на гадолиниевом ломе в водных растворах лимонной и борной кислот. В результате было установлено, что:

1. Вольт-ток-временная характеристика барьерного гальваностатического анодирования ~6 мА см$^{-2}$ в 0,5 М растворе борной кислоты с добавлением 0,05 М раствора тетрабората натрия характеризуется периодами роста и спада с линейными участками: 0–325–263–375 В. Появление и усиление искрения и колебаний примерно через 26 мин анодирования является признаком деградации пленки.

2. Изменение плотности тока при гальваностатическом барьерном анодировании гадолиния в 1% водном растворе лимонной кислоты не оказывает существенного влияния на скорость изменения напряжения.

Список литературы

1. Chen, J. Advances in Gadolinium-Based Composite Materials for Neutron and Gamma-Ray Shielding / J. Chen, X. Zhang, W. Xiao, D. Pan, W. Wu // Front. Mater. – 2025. – No. 12. – P. 1561198.

2. Recent Progress in Gd-Containing Materials for Neutron Shielding Applications: A Review / K. Wang [et al.] // Materials. – 2023. – No. 16. – P. 4305.

3. Shayakubova, Y. Design and Development of a Neutron Collimator / Y. Shayakubova // arXiv 2021, arXiv:2108.03238.

4. Gd_2O_3 Nanostructured Thin Films Analyzed by XPS / D. Barreca [et al.] // Surf. Sci. Spectra. – 2007. – No. 14. – P. 60–67.

5. Influence of Gd_2O_3 on Structural, Optical, Radiation Shielding, and Mechanical Properties of Borate Glasses / N. Yorulmaz [et al.] // Opt. Mater. – 2024. – No. 149. – P. 115032.

6. Nishikawa, H. The Anodic Oxidation of Gadolinium / H. Nishikawa, S. Minami // J. Met. Finish. Soc. Jpn. – 1982. – No. 33. – P. 391–393.

7. Gruss, L. The Anodization of Several Rare Earth Metals in Sodium Silicate Solutions / L. Gruss, T. Mackus // J. Electrochem. Soc. – 1974. – No. 121. – P. 1402.

8. Kuei, P. Y. Oxide High-k Gate Dielectrics Prepared by Anodic Oxidation / P. Y. Kuei, C. C. Hu // Appl. Surf. Sci. – 2008. – No. 254. – P. 5487–5491.

9. Excellent Frequency Dispersion of Thin Gadolinium Oxide High-k Gate Dielectrics / T. M. Pan [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2005. – No. 87. – P. 262908.

The high reactivity of lanthanide metals poses a challenge to the electrochemical anodizing of surfaces for nanostructured coatings. This paper presents the first systematic experimental investigation of barrier anodic oxidation of lanthanide gadolinium in aqueous solutions of citric and boric acids. The voltage-current-time responses of anodizing of gadolinium were investigated.

Машукевич Илья Александрович, студент факультета радиоэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, iliamashook@gmail.com.

Мякиш Борис Андреевич, студент факультета радиоэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, tretiygvozd@gmail.com.

Научный руководитель – *Плиговка Андрей Николаевич*, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НИЛ 4.10 «Нанотехнологии» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, pligovka@bsuir.by.

УДК 539.26

Д. В. НИКОНЧИК, А. Л. СТАРЦЕВА, Д. С. ЗЕМЛЯКОВ

СТРУКТУРА И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ОКИСЛЕНИЕ ПОКРЫТИЙ Cr-Al-O-N

Нанесение покрытий CrAlON является перспективным методом увеличения срока эксплуатации деталей, работающих в высокотемпературных воздушных средах. Подобные покрытия предназначены для нанесения на никелевые суперсплавы с целью повышения стойкости к термическому окислению. Исследованы структурно-фазовые изменения в результате процессов окисления под воздействием высоких температур и термически активированной диффузии, анализ фазового и элементного состава осуществлён методами РСА и РСМА, сопряжённого с СЭМ; исследованы стойкость к окислению и механические свойства покрытий.

Покрытия Cr-Al-N демонстрируют высокую устойчивость к высокотемпературному окислению. На поверхности образуются плотные оксиды алюминия или хрома в качестве пассивирующей плёнки [1; 2], что препятствует дальнейшему окислению и диффузии кислорода вглубь. При высоких температурах кроме окисления поверхности возможны фазовые превращения, а также в системе подложка-покрытие протекает термически активированная диффузия и перераспределение элементов. Взаимодиффузия элементов в подобных системах является важным объектом современных исследований в связи с тем, что увеличение концентрации элементов подложки (железо, никель) у поверхности покрытия, может привести к формированию оксидов данных элементов, такие оксиды снижают устойчивость к окислению, способствуя зарождению трещин и отслоению пассивирующего слоя [3]. Стоит сказать, что подобные покрытия также демонстрируют высокую адгезию и механические свойства [4; 5; 6]. Добавление кислорода в систему Cr-Al-N приводит к формированию оксидов на поверхности, что может ускорить образование плотной пассивирующей оксидной плёнки [5; 7; 8]. Таким образом, необходим комплексный анализ окисления, структуры, термической диффузии, фазовых превращений и взаимосвязи между ними для покрытий Cr-Al-O-N.

Покрытия Cr-Al-O-N нанесены методом магнетронного напыления с использованием двух типов катодов: хрома и алюминия. Между покрытием и подложкой нанесён тонкий переходный слой хрома. Осаждение самих покрытий проводилось в три этапа в среде активных газов азота и кислорода. Слои, прилегающие к покрытию, имеют более высокие концентрации хрома по сравнению с внешним слоем покрытия. В качестве подложки используются нержавеющая сталь и никель. Покрытия были нанесены в 4 режимам. Режимы отличаются соотношением потоков кислорода и азота. Однако элементный и фазовый состав нанесённых покрытий различных режимов идентичные.

Фазовый состав покрытий проанализирован с помощью метода РСА. Элементный состав покрытий и распределение элементов по глубине получены методом РСМА, сопряженного с СЭМ. Анализ термической стойкости и стойкости к окислению осуществлён в процессе отжига в воздушной среде в режиме термоциклирования. Термоциклирование – испытание наиболее приближённое к реальным условиям эксплуатации.

По результатам рентгеноструктурного анализа, основной фазой покрытий Cr-Al-O-N на никелевой и стальной подложках – твёрдый раствор (Cr, Al)N (рисунок 1). Уже после первого термического воздействия

(3 ч) при температуре 900 ℃ фазовый состав покрытий претерпел изменения. Твёрдый раствор (Cr, Al)N распался на фазы Cr_2N и AlN на образцах на никелевой подложке, кроме того сформировалась интерметаллидная σ-фаза CrNi. На стальной подложке сформировался интерметаллид Cr0,964Fe1,036, что подтверждено рентгеновской дифрактограммой и распределением элементов по глубине. Образование интерметаллидов обусловлено интенсивной диффузией железа и никеля из подложки в покрытие. В течение дальнейших испытаний фазовый состав не претерпевает качественных изменений.

В процессе термоциклирования прирост массы образцов подложка/покрытие на никелевой подложке положительный. Зависимость прироста массы (Δm) от времени (τ) – параболическая, вида:

$$(\Delta m)^2 = k\tau,$$

где k – константа скорости прироста массы оксидной плёнки.

Исходя из параболической зависимости прироста массы оксидов (рисунок 2), можно заключить что интенсивность процесса окисления на поверхности покрытия определяется диффузией элементов. На поверхности покрытия образуется плотная оксидная плёнка, что является диффузионным барьером для дальнейшего проникновения активных элементов из объёма покрытия на поверхность и их последующей реакцией с кислородом. О формировании оксидов также свидетельствует распределение элементов по глубине. До термического отжига концентрация кислорода на поверхности порядка 10 ат. %, после 7 ч отжига при температуре 900 ℃ концентрация кислорода достигает 40 ат. %. Наличие покрытия существенно снижает прирост массы в процессе окисления.

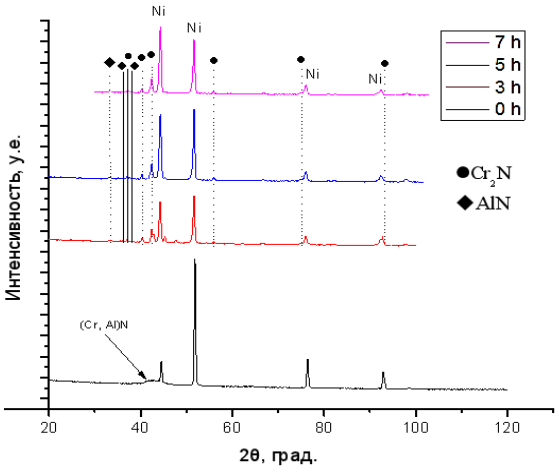


Рисунок 1 – Рентгенограмма покрытия Cr-Al-O-N на никелевой подложке

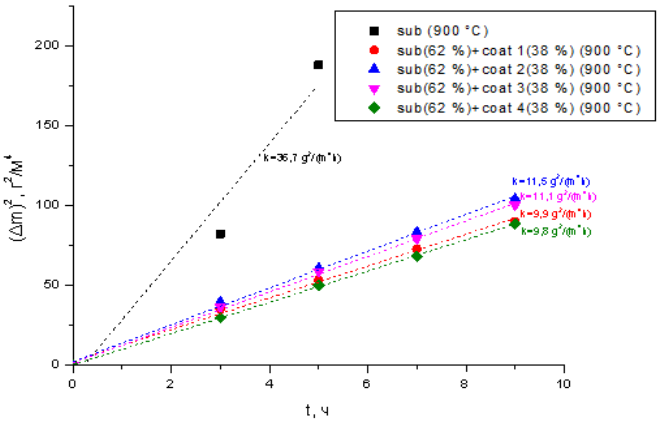


Рисунок 2 – Зависимость квадрата прироста массы от времени окисления при температуре 900 ℃ для никелевой подложки (sub) и образцов с покрытием, нанесённым с одной стороны (sub+coat)

Процесс высокотемпературной диффузии в системе Cr-Al-O-N/подложка представлен взаимодиффузией Cr из покрытия и Ni/Fe из подложки. При этом концентрация алюминия не изменяется со временем. В процессе диффузии средний слой покрытия не однороден, его можно разделить на две области (рисунок 3): тёмная на СЭМ-изображении – область, обогащённая хромом; светлая на СЭМ-изображении – область обогащённая никелем.

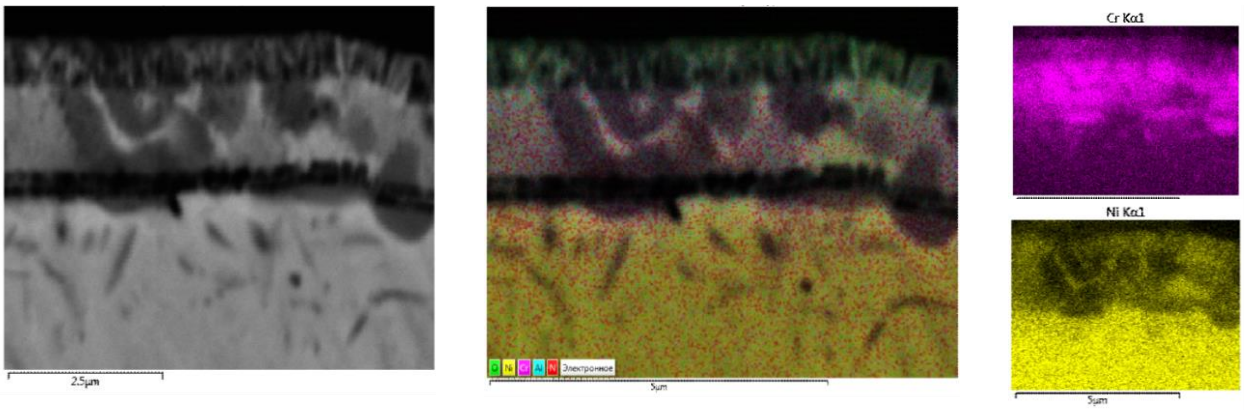


Рисунок 3 – СЭМ-изображение поперечного сечения покрытия и распределение элементов в поперечном сечении после 3 ч отжига при 900 ℃

Таким образом, покрытия Cr-Al-O-N состоят из фазы твёрдого раствора (Cr, Al)N. Механизмом устойчивости к окислению является образование плотных оксидов на поверхности [1]. Однако фазовый состав претерпевает изменения при высоких температурах, что обусловлено не только фазовыми переходами системы покрытия, но и термоактивированными процессами взаимодиффузии элементов покрытия и подложки. Следовательно, с целью улучшения термической устойчивости покрытий и стабильности фазового состава, возникает необходимость замедления взаимной диффузии, что возможно легированием элементами, сегрегирующимися на границах зёрен, или формированием барьерного слоя [9; 10].

Список литературы

1. Oxidation resistance of TiSiN and AlCrN hard-coatings: Ab initio calculations and experiments / J. Xie [et al.] // Applied Surface Science. – 2023. – Vol. 616. – № 156459.

2. Investigation of the properties of Al1-xCrxN coatings prepared by cathodic arc evaporation. / A. E. Reiter [et al.] // Surface & Coatings Technology. – 2005. – Vol. 200, № 7. – С. 2114–2122.

3. High temperature materials and mechanisms / Y. Bar-Cohen (ed.). – Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2014. – Т. 44.

4. Microstructure, mechanical properties, and oxidation behavior of arc-evaporated Cr–Al–O–N coatings with various Cr/Al ratios / Z. Liu [et al.] // Ceramics International. – 2023. – Vol. 49, № 10. – С. 16412–16421.

5. Chemical and mechanical stability of air annealed cathodic arc evaporated CrAlON coatings / E. Almandoz [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2018. – Vol. 351. – С. 153–161.

6. Deformation behavior of high Al content CrAlON coatings with varying oxygen content / K. Bobzin [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2025. – Vol. 496. – № 131639.

7. Kayani A. et al. Oxidation studies of CrAlON nanolayered coatings on steel plates / A. Kayani [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2006. – Vol. 201, № 3-4. – С. 1685–1694.

8. In situ cutting analysis of CrAlON coatings with varying oxygen content / K. Bobzin [et al.] // Wear. – 2025. – Vol. 571. – № 205856.

9. High-temperature oxidation of CrAlYN coatings: implications of the presence of Y and type of steel / T. C. Rojas [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2018. – Vol. 354. – С. 203–213.

10. Comparison of CrN, AlN and TiN diffusion barriers on the interdiffusion and oxidation behaviors of Ni+ CrAlYSiN nanocomposite coatings / L. Zhu [et al.] // Crystals. – 2021. – Vol. 11, № 11. – С. 1333.

In this work phase composition, high temperature oxidation behaviour, phase transformations and high temperature diffusive processes of Cr-Al-O-N protective coatings deposited on stainless steel and nickel substrates with magnetron sputtering technique were investigated. During the deposition process 2 targets (pure Al + pure Cr) were used, the sputtering were carried in N_2, O_2 gases atmosphere. Phase composition was studied using X-ray diffraction (XRD) method, morphology, elemental composition and distribution were studied using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray spectral microanalysis (XRM). Cyclic thermal annealing was carried to investigate high-temperature oxidation of coatings.

Никончик Дмитрий Витальевич, студент 4 курса Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, di04vi13nikonchik@mail.ru.

Старцева Александра Леонидовна, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, StartsevaAlexandra@mail.ru.

Земляков Дмитрий Сергеевич, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, zemlakovdima333@gmail.com.

Научный руководитель – *Углов Владимир Васильевич*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики твёрдого тела и нанотехнологий физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, uglov@bsu.by.

УДК 535.421

А. В. НОВИЦКАЯ, И. Г. ДАДЕНКОВ, А. Л. ТОЛСТИК

РАЗДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ КОМПОНЕНТ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕШЁТОК В КРИСТАЛЛЕ СИЛИКАТА ВИСМУТА ПРИ ПОМОЩИ ПОЛЯ ГОМОДИНА

Рассматривается импульсная запись динамических решеток в кристалле силиката висмута с одновременным зондированием места записи непрерывным лазером. Дифрагированная волна будет иметь амплитудно-фазовые характеристики, полностью охарактеризовывающиеся условиями записи и процессами, формирующими решетку в кристалле. Для разделения фазовых компонент и усиления сигнала дифракции используется метод интерференционного взаимодействия с полем когерентного сигнала – гомодина.

Динамические голографические решётки в кристалле силиката висмута формируются благодаря фоторефрактивному эффекту, основанному на пространственном изменении показателя преломления при неоднородном освещении [1]. Периодическая интерференционная структура, попадая в кристалл, приводит к локальной генерации носителей заряда, которые, в результате дрейфа и диффузии перераспределяются в объеме. В результате формируются области нескомпенсированного заряда, которые приводят к возникновению локальных электрических полей, меняющих показатель преломления в следствии эффектов Поккельса или Керра. Это становится возможным благодаря сложной структуре примесей и дефектных центров в кристаллах силленитов, которые принимают активное участие в перераспределении фотоиндуцированных зарядов [2].

Наряду с фоторефрактивным эффектом в кристаллах силленитов проявляется фотохромный эффект, основанный на перераспределении носителей заряда с более «глубоких» примесных центров на более «мелкие» (близкие к зоне проводимости) [3]. При освещении пространственно-периодическим светом возникает не только локальное изменение показателя преломления, но и коэффициента поглощения, что приводит к формированию двух решеток: амплитудной и фазовой, которые будут не совпадать. В таком случае падающее излучение будет по-своему дифрагировать на каждой из решеток, что приведет к интерференционному взаимодействию дифрагированнх волн и существенно усложнит последующий анализ поведения динамических решеток.

Наличие разных фазовых компонент динамической решетки привело к необходимости их разделения для анализа природы их формирования. В данной работе разделение компонент проводилось при помощи интерференционного сложения сигнала с дополнительным когерентным сигналом, называемым гомодином. Гомодин – это метод использования опорного когерентного излучения, который складывается с исследуемым сигналом, благодаря чему можно управлять амплитудой сигнала из-за изменения фазы этого самого гомодина.

В роли гомодина выступал сигнал, который можно описать формулой:

$$E_1=E_{01}e^{i(\omega t+\varphi_1)} \tag{1}$$

Долгоживущая и короткоживущая решетки создают электромагнитные волны, описывающиеся данными уравнениями соответственно:

$$E_2(t)=E_{02}(t)e^{i(\omega t+\varphi_2+\Delta\varphi)} \tag{2}$$

$$E_3(t)=E_{03}(t)e^{i(\omega t+\varphi_3+\Delta\varphi)} \tag{3}$$

На скоростное фотоприемное устройство приходил суммарный сигнал этих трех волн:

$$I=[E_1+E_2(t)+E_3(t)]\left[E_1^*+E_2^*(t)+E_3^*(t)\right] \tag{4}$$

После преобразования уравнение примет вид:

$$I=I_1+I_2(t)+I_3(t)+2\sqrt{I_1I_2(t)}\cos(\varphi_1-\varphi_2-\Delta\varphi)+2\sqrt{I_1I_3(t)}\cos(\varphi_1-\varphi_2-\varphi_3-\Delta\varphi)+2\sqrt{I_2(t)I_3(t)}\cos(\varphi_2-\varphi_3) \tag{5}$$

При изменении $\Delta\varphi$ в аргументе один из косинусов может принимать нулевые значения, в то время как второй косинус принимает одно из двух различных ненулевых значений. Однако данные значения будут находиться в противофазе и поэтому в формулах будут фигурировать с разными знаками. Таким образом можно разделить компоненты и определить их фазовые характеристики.

Для проведения исследования была разработана и собрана схема на основе интерферометра Маха-Цендера представленная на рисунке 1.

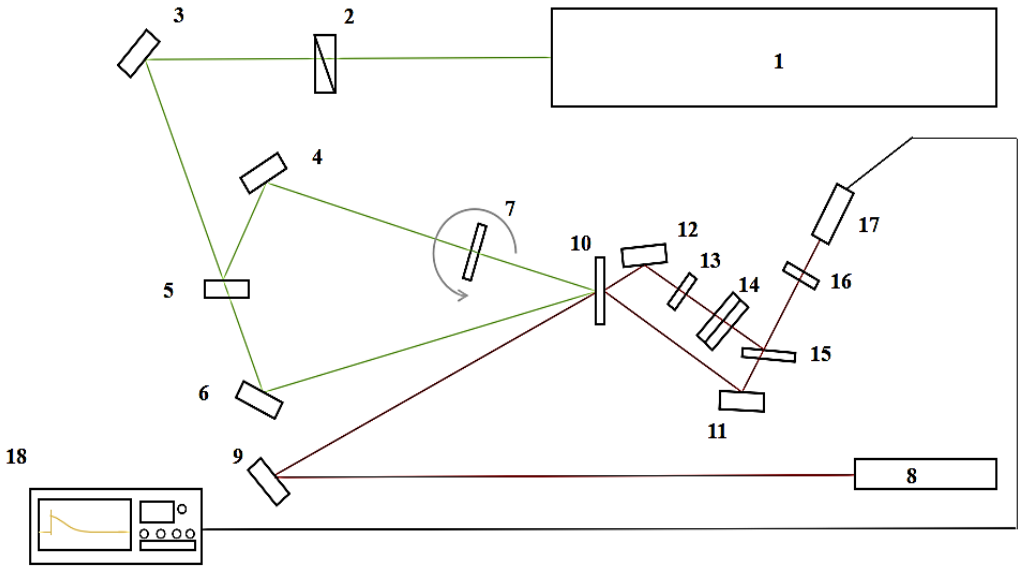
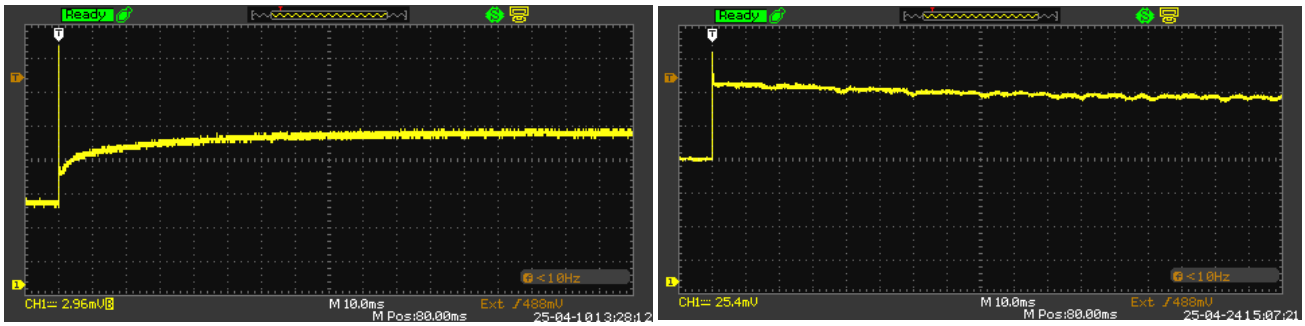


Рисунок 1 – Оптическая схема установки где 1 – Nd:YAG-лазер;
2 – полуволновая пластинка, 3, 4, 6, 9, 11, 12 – зеркала; 5 – полупропускающее зеркало;
7 – поворотная стеклянная пластинка; 8 – полупроводниковый лазер ;
10 – кристалл силиката висмута;
13, 16 – диафрагмы; 14 – поляризатор; 15 – стеклянная пластинка;
17 – скоростное фотоприемное устройство; 18 – цифровой осциллограф

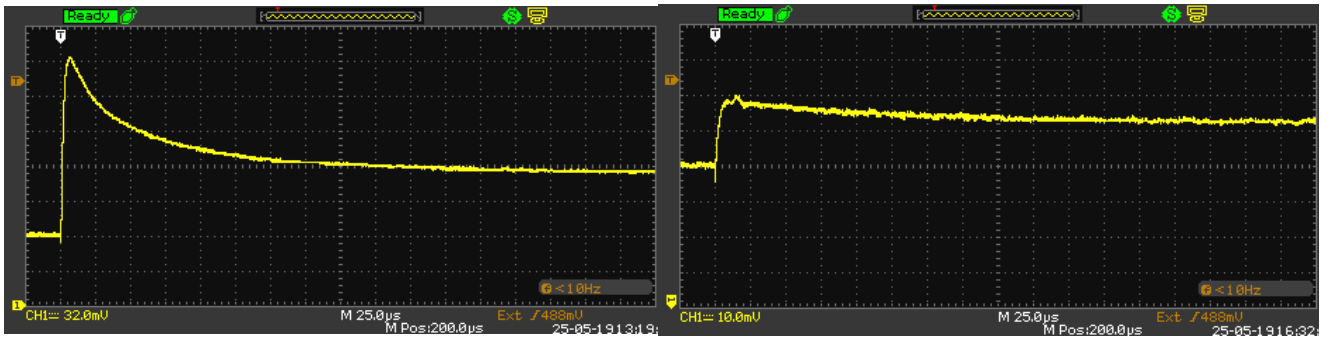
Для записи решеток использовалась вторая гармоника импульсного лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом с длиной волны 532 нм. Лазерный пучок проходит через полуволновую пластину и попадает на направляющее зеркало. Далее луч падает на полупропускающее зеркало, где разделяется на два когерентных пучка, которые сводятся на кристалле под углом при помощи зеркал. Один из лучей проходит через поворотную стеклянную пластинку, позволяющую устанавливать контролируемый сдвиг фаз $\Delta\varphi$ для одного из лучей. Этот сдвиг приведет к контролируемому сдвигу положения максимумов и минимумов интерференционной, и, как следствие, дифракционной картины. В то же время кристалл облучается непрерывным лучом красного лазера с длиной волны 660 нм. Данный пучок дифрагирует на записанной дифракционной решетке. Далее прошедший луч направляется зеркалом на стеклянную пластинку. Луч отражается от стеклянной пластинки и направляется параллельно с дифрагированным лучом на скоростное фотоприемное устройство, соединенное с цифровым осциллографом.

В ходе эксперимента были получены осциллограммы при временном разрешении 10 мс и 25 мкс при повороте стеклянной пластинки от 0’ до 120’ угловых минут, показанных на рисунке 2:



а) 0’ б) 120’

Рисунок 2 – Осциллограммы суммарного сигнала
при повороте стеклянной пластинки
на угол от 0’ до 120’ угловых минут
при временном разрешении
10 мс (а и б)



в) 0’ д) 120’

Рисунок 2 – Осциллограммы суммарного сигнала при повороте стеклянной пластинки на угол от 0’ до 120’ угловых минут при временном разрешении 25 мкс (в и д)

Таким образом, была обнаружена зависимость проявления быстрых и медленных компонент [4] динамических решеток от угла поворота пластинки. Замечено, что амплитуды интерференции быстрой и медленной компоненты динамической решетки с полем гомодина, хоть и зависят от фазового сдвига $\Delta\varphi$, создаваемого стеклянной пластинкой, однако общее изменение происходит неодинаково, что свидетельствует о разном положении дифракционных структур и, как следствие, разных природ возникновения быстрой и медленной компоненты.

Список литературы

1. Петров, М. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М. Петров, С. Степанов, А. Хоменко. – СПб. : Наука, 1992

2. Спектральные зависимости примесного оптического поглощения в кристаллах силленитов / М. Г. Кистенева [и др.] // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45, № 7. – С. 685–690.

3. Investigation of photo-induced absorption in a Bi12TiO20 crystal / A. Matusevich [et al.] // Appl. Phys. B. – 2008. – No. 92. – P. 219–224.

4. Даденков, И. Г. Фотоиндуцированное поглощение и импульсная запись динамических голограмм в кристаллах силиката висмута / И. Г. Даденков, А. Л. Толстик, Ю. И. Миксюк, К. А. Саечников // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128, No. 9. – С.1290 – 1295.

This paper considers pulsed recording of dynamic gratings in a bismuth silicate crystal with simultaneous probing of the recording site with a continuous-wave laser. The diffracted wave will have amplitude-phase characteristics fully characterized by the recording conditions and the processes that form the grating in the crystal. To separate the phase components and amplify the diffraction signal, a method of interference interaction with a coherent signal field, called homodyne, is used.

Новицкая Анна Владимировна, студент 5 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, fiz.novickayAV1@bsu.by.

Научный руководитель – *Даденков Иван Геннадьевич*, старший преподаватель физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, dadenkov.ivan@gmail.com.

УДК 539.3, 539.4, 539.5

П. Н. ОВЧИННИКОВ, А. А. ДМИТРИЕВСКИЙ

ТРАНСФОРМАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ПЛАСТИЧНОСТЬ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ КОМПОЗИЦИОННОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

Циркониевая керамика за счет уникального сочетания высоких механических и триботехнических свойств, а также биоинертности, термической, химической и радиационной стойкости имеет широчайшую область применений. Введение в циркониевую керамику оксида алюминия (ATZ) обеспечивает композиту механизм дисперсионного упрочнения в дополнение к механизму трансформационного упрочнения, присущему циркониевой керамике. «Традиционные» циркониевые и ATZ керамики хрупко разрушаются при температуре ниже 500 °С. Однако, введение специальных добавок, в частности SiO_2, обеспечивает керамике трансформационно-индуцированную пластичность и способствует увеличению пределов прочности на сжатие и на растяжение, а также к 75-процентному увеличению вязкости разрушения. Отжиг пластический деформированной кремнийсодержащей ATZ+SiO_2 керамики обеспечивает восстановление исходной тетрагональной структуры и возможность к повторной пластической деформации.

При изготовлении образцов кремнийсодержащей циркониевой керамики концентрации CaO (стабилизатора тетрагональной фазы диоксида циркония) и Al_2O_3 (упрочняющей добавки) сохраняли неизменными (6,5 мол.% и 5,8 мол.% соответственно). Концентрацию специальной добавки SiO_2 варьировали от 0 до 6 мол.%. Проведены исследования элементного и фазового состава, структурных особенностей, а также механических свойств (пределы прочности на растяжение и на сжатие, предельная деформация, вязкость разрушения, модуль Юнга) композиционной $CaO\text{-}ZrO_2\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2$ керамики (ATZS). Все испытания проводили при комнатной температуре.

Диаграммы растяжения и сжатия (σ-ε диаграммы), полученные при тестировании методом «Бразильского теста» и одноосного сжатия образцов ATZS керамики с различной концентрацией SiO_2 представлены на рис. 1*а* и рис. 1*б* соответственно.

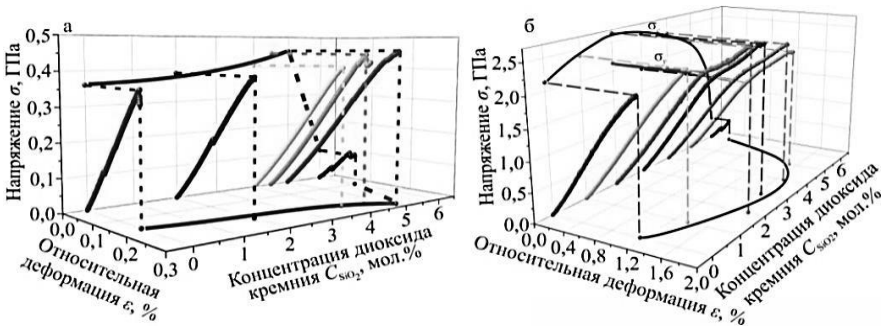


Рисунок 1 – Диаграммы напряжение-относительная деформация, зарегистрированные в процессе деформирования «Бразильским тестом» (а) и одноосным сжатием (б) ATZS керамик с различными концентрациями диоксида кремния при комнатной температуре

Показано, что предел прочности на растяжение и предельная деформация повышаются при введении диоксида кремния в концентрации до 5 мол.% на 18 % и 40 % соответственно. Превышение 5-процентной концентрации диоксида кремния вызывает резкое падение прочности. Максимальные значения предела прочности на сжатие и предельной деформации наблюдаются при концентрации диоксида кремния на уровне 2 мол.%. По сравнению с бескремниевой ATZ керамикой увеличение составляет 24 % и 55 % соответственно.

Важно отметить, что при одноосном сжатии образцов ATZS керамики, содержащих SiO_2 в интервале концентраций от 2 до 5 мол.%, при достижении критических напряжений наблюдается отклонение от упругой деформации. При этом предел прочности и предельная деформация уменьшаются с увеличением концентрации диоксида кремния (от 2 до 5 мол.%). Сравнительный анализ микроструктуры одних и тех же участков исходных и пластически деформированных образцов ATZS керамик, а также исследования зависимостей прочностных характеристик ATZS керамик от скорости деформирования, позволяет утверждать, что механизмы зернограничной диффузии и зернограничного проскальзывания не играют заметной роли в пластической деформации ATZS керамик, наблюдаемой в процессе одноосного сжатия при комнатной температуре. Наблюдаемую неупругую деформацию следует связывать с трансформационо-индуцированной пластичностью (TRIP), которая, согласно [1], обусловлена механоиндуцированными тетрагонально-моноклинными фазовыми превращениями диоксида циркония. В материалах, для которых характерно проявление TRIP, предел прочности пропорционален не вязкости разрушения (как следует из уравнения Гриффитса), а напряжению, при котором инициируются фазовые превращения (в нашем случае, тетрагонально-моноклинные превращения диоксида циркония). Нами показано (Рис.2а), что напряжения, достаточные для старта тетрагонально-моноклинных фазовых превращений диоксида циркония совпадают с отклонением от упругой деформации. Анализ фазового состава на характерных стадиях деформации образов показывает, что в процессе упругой деформации моноклинная фаза не образуется (RD3). Если же образец был деформирован пластически, то на дифрактограмме хорошо заметен рефлекс от моноклинной фазы (RD4).

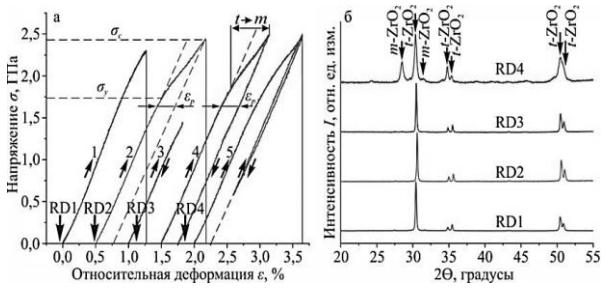


Рисунок 2 – а) Диаграммы нагружения-сжатия образцов ATZ (C_{SiO2} = 0 мол.% – кривая 1) и ATZS4 (C_{SiO2} = 4 мол.%), деформированных до разных стадий (кривые 2, 3 и 4); б) соответствующие дифрактограммы

Особый интерес вызывает тот факт, что в пластически деформированных, но не разрушенных образцах кремнийсодержащей ATZS керамики отсутствуют трещины (Рис. 3). Отсутствие трещин свидетельствует о том, что механоиндуцированные фазовые превращения диоксида циркония происходят до образования крупных дефектов. Кроме того, в пластически деформированных ATZS керамиках не наблюдается макроскопических следов тетрагонально-моноклинных фазовых превращений, которые наблюдал коллектив Дж. Шевалье при деформации на изгиб циркониевой керамики с добавкой гексаалюмината стронция [1]. Отсутствие макроскопических следов t→m превращений в пластически деформированных ATZS керамиках свидетельствует о том, что фазовые превращения в них происходят в микроскопических объемах, которые более равномерно распределены по объему композита.

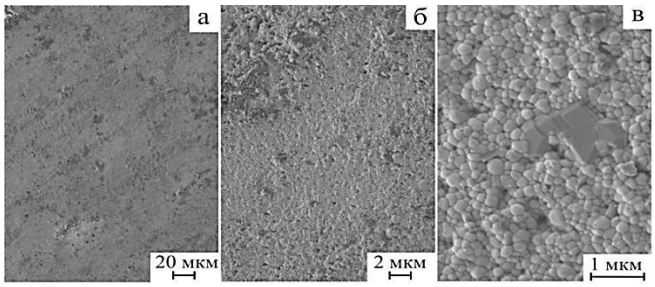


Рисунок 3 – СЭМ-изображения произвольного участка поверхности пластически деформированного образца ATZS4 керамики с увеличением x1000 (а), ×10000 (б) и ×50000 (в)

Сравнительный анализ элементного состава в центре сколотого зерна и на границе двух неразрушенных зерен свидетельствует о том, что кремний не проникает глубоко в зерна диоксида циркония, а формирует на поверхности зерен кремнийсодержащие слои (толщина не более нескольких десятков нанометров), что подтверждается литературными данными [2].

Анализ фазового состава ATZS4 керамики в промежутках между последовательными деформациями (до стадий, предшествующих разрушению) и промежуточными отжигами свидетельствует о том, что механоиндуцированные t-ZrO_2→m-ZrO_2 превращения, обеспечивающие пластичность ATZS керамик при комнатной температуре, обратимы посредствам специальной термообработки. Отжиг (T = 1200 °C в течение 1 ч) обеспечивает керамике возможность повторной пластической деформации за счет повторных фазовых превращений.

Предложена модель, согласно которой при одноосной деформации ATZS керамики образуются локальные субмикроскопические области с растягивающими/сдвиговыми напряжениями (рис. 4). Такие области могут являться зародышами трещин. Облегченная трансформируемость тетрагональной фазы t-ZrO_2, обеспечиваемая наличием наноразмерных кремнийсодержащих прослоек на границах зерен ZrO_2, компенсирует растягивающие/сдвиговые напряжения и, тем самым, препятствует зарождению трещин. Увеличение объема (вызванное фазовыми превращениями) обеспечивает не только сохранение целостности керамики, но и трансформационно-индуцированную пластичность.

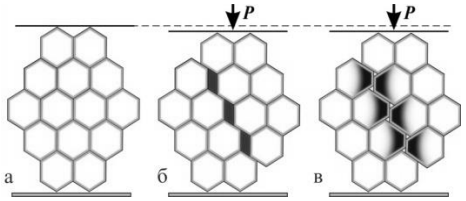


Рисунок 4 – Схематичное представление локального участка ATZS керамики (с кремнийсодержащими слоями на границах зерен, изображенными серым цветом) до деформации (а); в процессе деформации с указанием областей с растягивающими/сдвиговыми напряжениями, изображенными черным цветом (б) и зерен ZrO_2, частично трансформированных в моноклинную фазу, изображенную темно-серым цветом (в)

Наконец, отметим, что повышенная механоиндуцированная трансформируемость тетрагональной фазы диоксида циркония, обеспечивающая TRIP и препятствующая зарождению новых трещин в ATZS керамике, вызвана снижением энергетического барьера для тетрагонально-моноклинных фазовых превращений t-ZrO_2→m-ZrO_2. Степень уменьшения высоты энергетического барьера пропорциональна концентрации SiO_2 в композите. Превышение критической концентрации диоксида кремния ($C_{SiO2} \geq 6$ мол.%) вызывает чрезмерное снижение высоты энергетического барьера, результатом чего является самопроизвольное ZrO_2→m-ZrO_2 превращение, и как следствие резкое ухудшение всех механических свойств.

Список литературы

1. Chevalier J. Forty years after the promise of «ceramic steel?»: Zirconia-based composites with a metal-like mechanical behavior / J. Chevalier, A. Liens, H. Reveron, F. Zhang, P. Reynaud, Th. Douillard, L. Preiss, V. Sergo, V. Lughi, M. Swain, N. Courtois // Journal of The American Ceramic Society. – 2020. – Vol. 103. – P. 1482–1513. – DOI: 10.1111/jace.16903

2. Ikuhara, Y. Structure and chemistry of grain boundaries in Si O_2-doped TZP / Y. Ikuhara, T. Yamamoto, A. Kuwabara, H. Yoshida, T. Sakuma // Science and Technology of Advanced Materials. – 2001. – Vol. 2. – P. 411-424.

Zirconia ceramics, thanks to their unique combination of high mechanical and tribological properties, as well as bioinertness and thermal, chemical, and radiation resistance, have a wide range of applications. The alumina addition into zirconia ceramics (ATZ) provides the composite a dispersion toughening mechanism in addition to the transformation toughening mechanism inherent to zirconia ceramics. «Traditional» zirconia and ATZ ceramics undergo brittle fracture at temperatures below 500 °C. However, the addition of special additives, particularly SiO2, provides the ceramics transformation-induced plasticity and contributes to increased compressive and tensile strengths, as well as a 75 % increase in fracture toughness. Annealing of plastic deformed silicon-containing ATZ+SiO_2 ceramics restores the original tetragonal structure and enables repeated plastic deformation.

Овчинников Пётр Николаевич, молодой ученый, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Российская Федерация, ovchinnikov.pyotr@mail.ru.

Научный руководитель – *Дмитриевский Александр Александрович*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Российская Федерация, aadmitr@yandex.ru.

УДК 615.47:615.844.5

С. В. ОРДО, И. И. КУЗЬМАР

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРОГРАММИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИКОМПОЗИЦИОННЫХ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ

В ходе проведения научных исследований установлены зависимости влияния параметров программируемых режимов электролиза на функциональные свойства поликомпозиционных никелевых покрытий. Покрытия, сформированные с использованием импульсных униполярного и реверсированного токов, превосходят по микротвердости осадки, полученные на постоянном токе.

Никелевые покрытия обеспечивают высокую коррозионную стойкость, твёрдость и износостойкость, защищая металл от агрессивных сред и механических повреждений. Также никелирование позволяет покрыть деталь любой конфигурации, что способствует широкому распространению этого покрытия. Проведенный анализ позволил выделить основные направления для возможного эффективного управления элементным составом и твёрдостью поликомпозиционных покрытий. В отличие от традиционных нестационарных режимов с жестко заданными параметрами, программируемый ток позволяет гибко изменять амплитуду, длительность и частоту импульсов в реальном времени. Управление параметрами поляризующего тока при осаждении позволяет получать мелкокристаллические структуры с различным составом и свойствами. В работе рассмотрено влияние условий электрохимического осаждения на функциональные свойства осадков [1, 2].

На рисунке 1*а* представлены снимки морфологии поверхностей, полученных при чередовании по 1 минуте постоянного и импульсного 3:7 мс токов, на рисунке 1*б* – при чередовании по 1 минуте постоянного и реверсированного 60:20 мс токов, *в* – при чередовании по 1 минуте постоянного и реверсированного 60:30 мс токов, *г* – при чередовании по 1 минуте постоянного и реверсированного 300:100 мс токов, *д* – при чередовании по 1 минуте постоянного и реверсированного 12:4 мс токов, *е* – при чередовании по 1 минуте реверсированного 0,6:0,2 мс и реверсированного 60:30 мс токов, *ж* – при чередовании по 1 минуте реверсированного 0,6:0,2 мс и реверсированного 60:30 мс токов, *з* – трехслойное покрытие: постоянный ток 10 мин., затем реверсированный 0,6:0,2 мс 20 минут и реверсированный 12:4 мс 10 мин.

Микротвёрдость никелевых покрытий измеряли с использованием микротвердомера Leica VMHT MOT по методу Кнуппа, который заключается во вдавливании удлиненной алмазной пирамиды в поверхность образца под нагрузкой менее 5 Н. Измерения проводились для каждого образца в трёх точках, что позволило получить усреднённые значения и оценить разброс характеристик. Так микротвёрдость образцов составила от 4,95 до 8,09 ГПа. Использование биполярного импульсного тока при соотношении длительности прямого и обратного импульсов 10:1, 7:1 и 5:1 привёл к её повышению, тогда как при соотношении 3:1 и ниже наблюдалось снижение этого показателя. В случае униполярного импульсного тока микротвёрдость оказывается выше, чем при осаждении на постоянном токе. Для поликомпозиционных никелевых покрытий характерны следующие значения микротвердости: 7,48 ГПа на постоянном токе, от 3,35 до 5,92 ГПа – на импульсном, от 3,83 до 7,54 ГПа – на реверсированном, и от 4,95 до 8,01 ГПа – с использованием программируемых токов.

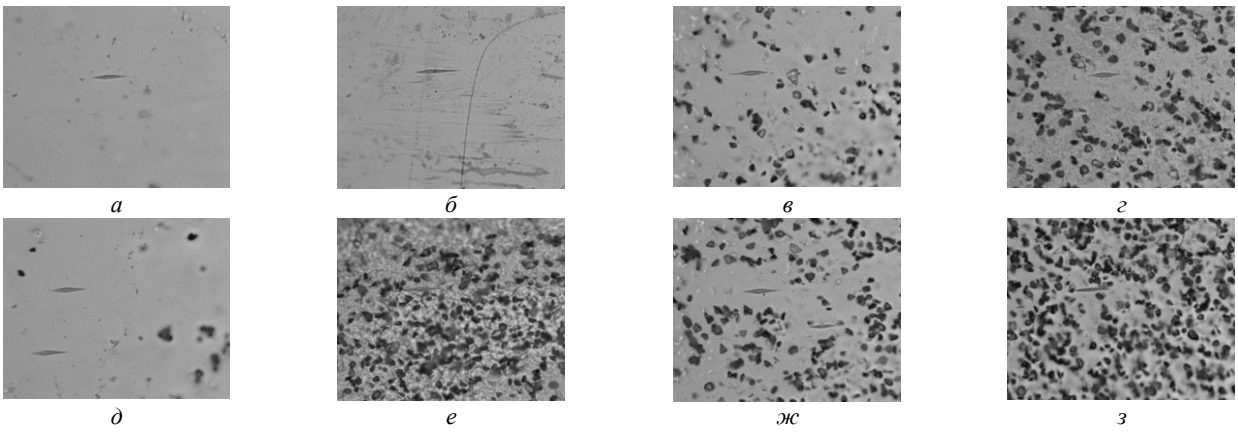


Рисунок 1 – Структура покрытий, сформированных при программном изменении электролиза, с отпечатком, полученным при измерении микротвердости методом Кнуппа (НК)

Исследование трибологических характеристик, а именно коэффициента трения, выполняли на микротрибометре МТ 4.05 по схеме сфера-плоскость, где плоский образец с покрытием приводился в возвратно-поступательное движение под закрепленным шариком при строго контролируемой нормальной нагрузке в диапазоне от 10 мН до 1 Н и скорости скольжения 0,1–10 мм/с, при этом электромагнитный привод обеспечивал минимизацию вибраций и механического шума, искажающих результаты. В процессе испытаний датчики непрерывно регистрировали силу трения, а коэффициент трения рассчитывался как отношение этой силы к приложенной нормальной нагрузке, причём для каждого образца измерения проводились как вдоль, так и поперек линии прокатки подложки для исключения влияния анизотропии свойств материала. Коэффициент трения варьируется от 0,141 до 0,432 и зависит от состава покрытия и шероховатости поверхности. Влияние условий электроосаждения на коэффициент трения поликомпозиционных никелевых покрытий представлено на рисунке 2, где 1 – постоянный ток; 2 – импульсный ток (отношение длительности импульса к длительности паузы $\tau_{имп}$: $\tau_{паузы}$ =3:7 мс), 3 – при программном изменении (чередование по 1 минуте (постоянного тока и импульсного с соотношением $\tau_{имп}$: $\tau_{паузы}$ =3:7 мс)

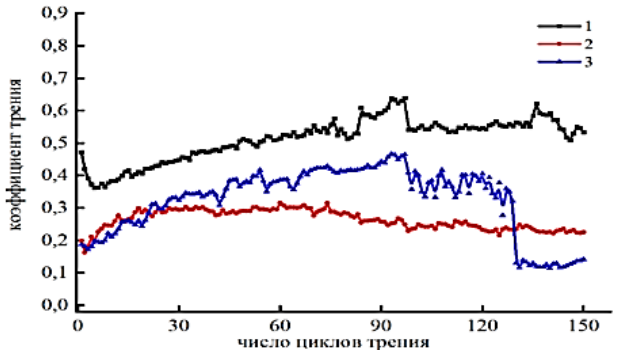


Рисунок 2 – Влияние условий электроосаждения на коэффициент трения поликомпозиционных никелевых покрытий

Использование комбинированных токов позволяет значительно уменьшить коэффициент трения, что придает никелевому покрытию большую износостойкость. Коэффициент трения варьируется от 0,53 при электроосаждении на постоянном токе до 0,44–0,77 на импульсном, 0,26–0,33 на реверсированном и 0,14–0,43 на программируемых токах, что подтверждает эффективность применения сложных режимов электролиза для управления трибологическими свойствами покрытий.

Покрытия толщиной 6,0 и 30,0 мкм наносились на латунные подложки. Коррозионные испытания проводились в течение 8 (восьми) суток в 30-процентном растворе NaCl гравиметрическим методом и заключались в определении потери массы образцов после экспозиции. скорость саморастворения находится в диапазоне 0,0228-0,0478 г/м²·ч. Перед и после испытаний образцы промывали дистиллированной водой, сушили и взвешивали. В результате видимые повреждения выявлены не были. Основным недостатком гальванического никеля является его пористость, обусловленная кристаллической неоднородностью, поверхностными дефектами, высокими внутренними напряжениями и питтингом. Решением проблемы может стать чередование микрослоёв, осажденных с помощью программируемых источников импульсного тока: взаимное перекрытие слоев ком-

пенсирует дефекты, характерные для однослойных покрытий. Варьирование параметрами поляризующего тока позволило получить покрытия без видимых очагов коррозии, а скорость коррозии снизилась в 1,2–2,8 раза по сравнению с покрытиями, осажденными на постоянном токе. Предложенные условия способствуют улучшению защитных характеристик покрытий.

В результате получили, что по сравнению с покрытиями, осажденными на постоянном токе, они обладают более высокой микротвердостью, гладкой мелкозернистой поверхностью и улучшенными электрическими характеристиками. Таким образом, нестационарный электролиз является эффективным методом получения покрытий с заданными улучшенными свойствами для радиоэлектронной промышленности.

Список литературы

1. Импульсное электроосаждение и свойства композиционных покрытий никель-оксид графена / В. Н. Целуйкин [и др.] // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 305–309.

2. Шушков, Р. В. Влияние режима электролиза на свойства никелевых покрытий / Р. В. Шушков, Н. Д. Соловьева // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т. 21, № 10. – С. 29–33.

In the course of scientific research, the dependences of the influence of the parameters of programmable electrolysis modes on the functional properties of polycomposite nickel coatings have been established. Coatings formed using pulsed unipolar and reversed currents are superior in microstability to precipitation obtained with direct current.

Ордо София Витальевна, студентка 3 курса Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, ssfiaordo29@gmail.com.

Научный руководитель – *Кузьмар Инна Иосифовна*, кандидат технических наук, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, kuzmar@bsuir.by.

УДК 539.21

Д. А. ОСИПЕНКОВ

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ СПЛАВОВ TiCu, СФОРМИРОВАННЫХ КОМПРЕССИОННЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ, ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕНИЯ

Методами рентгеноструктурного анализа, растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа исследовано влияние высокотемпературного отжига в воздушной атмосфере на фазовый состав, микроструктуру и элементное распределение в поверхностном слое сплавов системы TiCu, предварительно обработанных компрессионными плазменными потоками с плотностью поглощенной энергии 35 Дж/см². Показано, что отжиг при температурах 300 и 400 °С в течение до 8 часов не приводит к формированию оксидных фаз. Образование оксида титана TiO_2 в приповерхностном слое зафиксировано лишь после отжига при 600 °С. Установлено, что повышение температуры отжига способствует диффузионному перераспределению атомов меди в титановой матрице, релаксации внутренних напряжений и увеличению содержания кислорода на поверхности до 23 ат. %.

Сплавы на основе системы титан-медь представляют значительный интерес для различных областей техники благодаря сочетанию высоких механических свойств и коррозионной стойкости. Одним из эффективных способов модификации их поверхностных свойств является обработка компрессионными плазменными потоками (КПП), позволяющая формировать многофазные структуры с уникальными характеристиками. Для практического применения таких материалов важным является понимание их поведения в условиях высокотемпературного окисления. Целью данной работы являлось изучение особенностей фазового и элементного составов, а также микроструктуры поверхности сплавов TiCu, сформированных КПП, после их высокотемпературного отжига в воздушной атмосфере при различных температурах [1].

В качестве объектов исследования использовались образцы сплавов системы TiCu, модифицированные компрессионными плазменными потоками с плотностью поглощенной энергии 35 Дж/см². Высокотемпературный отжиг осуществлялся в муфельной печи на воздухе при температурах 300, 400 и 600 °С в течение 0,5–8 часов. Фазовый состав определялся методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре Rigaku Ultima IV в медном излучении (длина волны 0,154178 нм) в геометрии Брэгга-Брентано и скользящего пучка с углами скольжения 1 и 3°. Микроструктура поверхности изучалась методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе LEO1455VP при ускоряющем напряжении 20 кВ. Элементный состав определялся методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) с использованием рентгеноспектрального микроанализатора, работающего совместно с электронным микроскопом.

Согласно данным рентгеноструктурного анализа, качественный фазовый состав исследуемых образцов соответствует твердому раствору меди в α- и β-модификациях титана, интерметаллидной фазе Cu_2Ti и нитрид-

ной фазе TiN. После высокотемпературного отжига при 300 °С в течение 0,5–8 часов формирования каких-либо оксидных фаз не обнаружено (рисунок 1).

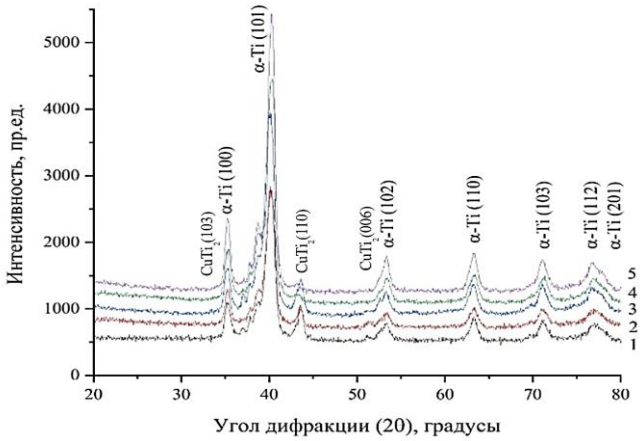


Рисунок 1 – Рентгенограммы системы Ti-Cu, подвергнутой воздействию компрессионными плазменными потоками и отожжёнными при температуре 300 °С в течение 0,5 часа (1), 1 часа (2), 4 часов (3), 6 часов (4) и 8 часов (5)

На рентгенограммах наблюдается смещение дифракционных максимумов титана в сторону больших брэгговских углов, что указывает на снижение параметров кристаллической решетки. Данный эффект обусловлен диффузией атомов меди, имеющих меньший атомный радиус, в решетку титана по механизму замещения с образованием твердого раствора α-Ti(Cu). Также зафиксировано исчезновение слабых дифракционных максимумов в области углов 43 и 51 градуса, наличие которых может быть связано с присутствием интерметаллидного соединения титана и меди $CuTi_2$ вследствие неполного растворения атомов меди в титановой подложке после плазменной обработки. Согласно равновесной диаграмме состояния системы Ti-Cu [2], соединение $CuTi_2$ характеризуется незначительной областью гомогенности. Таким образом, при отжиге в результате активации диффузионных процессов нарушается стехиометрический состав и соответственно распад указанной интерметаллидной фазы.

Аналогичная картина наблюдается и после отжига при температуре 400 °С в течение 8 часов (рисунок 2) – формирования оксидных фаз на основе титана или меди не происходит.

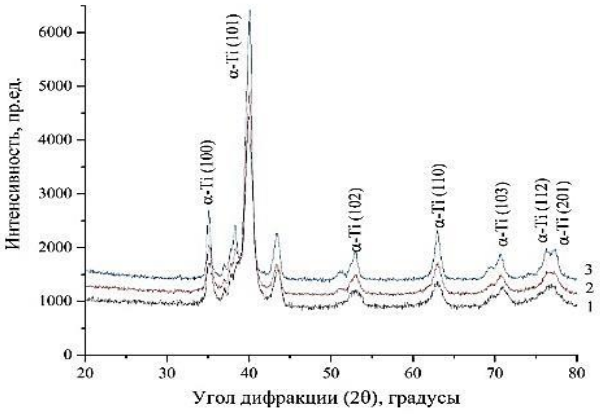


Рисунок 2 – Рентгенограммы системы Ti-Cu, подвергнутой воздействию компрессионными плазменными потоками и отожжённой при температуре 400 °С в течение 0,5 часа (1), 2 часов (2) и 8 часов (3)

Принципиальные изменения фазового состава фиксируются после повышения температуры отжига до 600°С в течение 2 часов (рисунок 3). В приповерхностном слое исследуемых образцов обнаруживается образование оксидных фаз, сформированных преимущественно на основе оксида титана TiO_2. Помимо этого, наблюдается существенное сужение дифракционных рефлексов, что является результатом снижения внутренних напряжений и более равномерного перераспределения атомов меди в легированном слое. Появление дополнительных дифракционных рефлексов может быть связано с формированием интерметаллидных фаз, в частности Ti_2Cu.

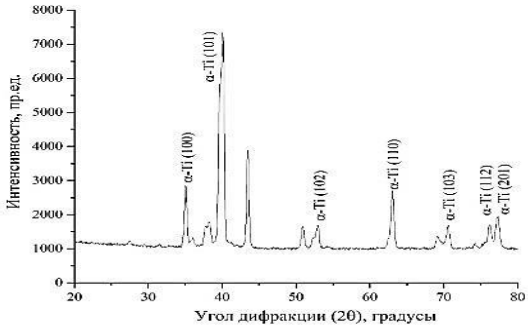


Рисунок 3 – Рентгенограмма системы Ti-Cu, подвергнутой воздействию компрессионными плазменными потоками и отожжённой при температуре 600 ºС в течение 2 часов

По данным РСМА, увеличение температуры и времени высокотемпературного отжига приводит к повышению содержания кислорода на поверхности от 16 до 23 ат.%.

Результаты растровой электронной микроскопии коррелируют с данными РСА и РСМА. После высокотемпературного окисления при температуре 300°С в течение 4 часов на поверхности образцов происходит выделение частиц размером приблизительно 1 мкм (рисунок 4).

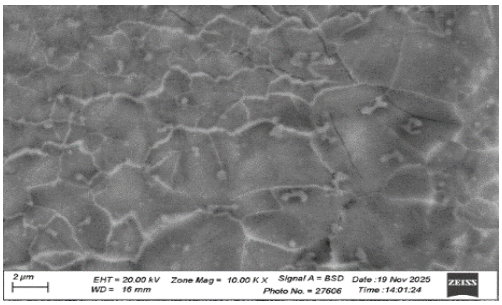


Рисунок 4 – РЭМ-изображение поверхности сплава TiCu, отожжённого при температуре 300 ºС в течение 4 часов

При этом сохраняется дендритная структура кристаллов размером около 6 мкм, рост которых проходил из центра кристаллизации в радиальных направлениях, соответствующих главным осям дендритов.

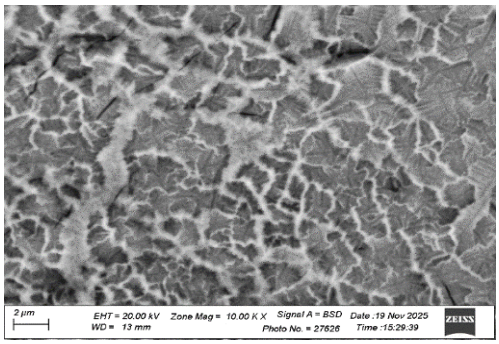


Рисунок 5 – РЭМ-изображение поверхности сплава TiCu, отожжённого при температуре 400 ºС в течение 8 часов

Микроструктура поверхности после отжига при 400°С в течение 8 часов (рисунок 5) соответствует кристаллам размером около 2 мкм, сформированным в результате дендритной кристаллизации нитридной фазы титана TiN. По результатам РСМА, участки, имеющие на изображении более светлый элементный контраст и продольный размер около 1 мкм, не содержат азот и сформированы в результате выталкивания расплава титана с медью на затвердевшую поверхность кристаллов TiN [3].

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что сплавы TiCu, модифицированные компрессионными плазменными потоками, обладают высокой стойкостью к окислению при температурах до 400°С включительно. Формирование оксидных фаз на основе TiO_2 начинается лишь при температуре 600°С. Высокотемпературный отжиг инициирует диффузионные процессы титановой матрице, способствует

релаксации напряжений, возникших в результате сверхбыстрой кристаллизации после плазменного воздействия, и приводит к увеличению содержания кислорода в поверхностном слое.

The effect of high-temperature annealing in an air atmosphere on the phase composition, microstructure, and elemental distribution in the surface layer of TiCu system alloys, preliminarily treated by compression plasma flows with an absorbed energy density of 35 J/cm², has been studied using X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy, and X-ray spectral microanalysis. It is shown that annealing at temperatures of 300 and 400°C for up to 8 hours does not lead to the formation of oxide phases. The formation of titanium oxide TiO_2 in the surface layer was recorded only after annealing at 600°C. It has been established that an increase in the annealing temperature promotes the diffusion redistribution of copper atoms in the titanium matrix, relaxation of internal stresses, and an increase in the oxygen content on the surface up to 23 at.%.

Список литературы

1. Ким, Й.К. Влияние эволюции межфазных интерметаллидных соединений на механический отклик и разрушение слоистых композитов Ti/Cu/Ti / Й. К. Ким, Х. Пурлиакбар, С. И. Хонг // Materials Science and Engineering: A. – 2020. – Т. 778. – С. 139113.

2. Диаграммы состояния двойных металлических систем : в 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М. : Машиностроение, 1997. – Т. 2. – 1024 с.

3. Крутилина, Е. А. Структурообразование в поверхностных слоях металлов при воздействии компрессионными плазменными потоками / Е. А. Крутилина, В. И. Шиманский // Актуальные проблемы физики твердого тела : материалы Междунар. науч. конф. – Минск, 2023. – С. 120–122.

Осипенков Данила Александрович, студент 4 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, osiphys@mail.ru.

Научный руководитель – *Крутилина Евгения Александровна*, старший преподаватель кафедры физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, soldatenko@tut.by.

Научный руководитель – *Шиманский Виталий Игоревич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, Shymanskiv@mail.ru.

УДК 535.16

Н. А. ПАВЛОВА

СВОЙСТВА И СИНТЕЗ КОЛЛОИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ $CuInS_2$

Представлены нанокристаллы полупроводниковых материалов, размеры которых находятся в диапазоне от нескольких до нескольких десятков нанометров, обладающие уникальными оптическими и электронными свойствами. В данном тезисе рассмотрены основные аспекты квантовых точек, включая их структуру, свойства и синтез. Обсуждаются перспективы применения КТ в различных областях, включая фотонику, электронику, медицину.

За последние несколько десятилетий методы синтеза разнообразных квантовых точек значительно эволюционировали, что привело к их внедрению в различные области, включая оптоэлектронику, биомедицину, энергетику, квантовые вычисления и криптографию, датчики и маркировку, сельское хозяйство и др. Однако основной фокус научных разработок приходился на квантовые точки, состоящие из атомов полупроводниковых материалов II–VI групп, таких как, например, CdSe, ZnS; III–V групп, например, InAs, InP; а также PbS, PbTe – полупроводниковых материалов IV–VI групп. Данные полупроводниковые наночастицы обладают интенсивной люминесценцией, превосходной фотостабильностью и устойчивостью в коллоидных системах. Оптические свойства, такие как люминесценция и поглощение, можно контролировать и изменять путём изменения состава и размера квантовых точек (КТ). Свойства КТ связаны с ограничением размера и эффектами, появляющимися при таких размерах. К дискретным энергетическим состояниям, аналогичным энергетическим уровням в атомах, приводит размер КТ, который определяет уровень электронов и дырок внутри наноструктуры. Это в свою очередь влияет на оптические и электронные свойства. Они способны поглощать свет определённой длины волны, а также излучать свет. При изменении размера КТ, мы можем изменять энергию испускаемого фотона, что приводит к смене цвета испускаемого КТ света. Несмотря на выдающиеся оптические свойства такие материалы имеют серьёзные недостатки. Токсичные компоненты вроде кадмия и свинца представляют угрозу для здоровья человека и экосистем, приводя к биоаккумуляции тяжёлых металлов и долгосрочному экологическому ущербу. Кроме того, их производство требует длительного времени, сложной многостадийной отчистки продуктов реакции и часто включает в себя трудоёмкие процедуры гидрофилизации поверхности для обеспечения совместимости с водными и биологическими средами.

В качестве перспективной альтернативы традиционным люминесцентным материалам с высокой токсичностью выступают низкотоксичные коллоидные КТ многокомпонентной структуры I – III – VI_2. Аналогично

классическим квантовым точкам на основе сульфидов и селенидов кадмия, КТ тройного состава I – III – VI_2 характеризуются широким спектром поглощения и высокой фотостабильностью, но при этом лишены токсичных элементов и обладают характерной нестехиометрией, что расширяет потенциал их практического применения. Примем во внимание, что КТ I – III – VI_2 группы – это тип трёхкомпонентной полупроводниковой нанокристаллической структуры, где элементы из первой (I = Cu, Ag), третьей (III = In, Al) и шестой (VI_2 = S, Te, Se) групп периодической таблицы химических элементов образуют материал с уникальными оптическими и электронными свойствами [1].

К настоящему времени достигнуты значительные успехи в разработке методов синтеза коллоидных люминесцентных наночастиц I – III – VI_2 в различных средах, однако поиск оптимальных воспроизводимых протоколов, обеспечивающих улучшенные оптические и структурные характеристики, остаётся ключевой задачей. Решение проблем, связанных с точной оптимизацией условий синтеза, позволит создать наночастицы нового поколения с повышенной эффективностью и стабильностью. Это, в свою очередь, существенно расширит области их аналитического и технологического использования, включая сенсоры, дисплеи и биомедицинские устройства.

Материалы и методы синтеза квантовых точек.

Для синтеза коллоидных наночастиц $CuInS_2$ к 8,9 мл дистиллированной воды при магнитном перемешивании добавляют 0,1 мл водного раствора $CuCl_2$ концентрацией 0,1 М и 0,05 мл водного раствора $InCl_3$ концентрацией 1 М, содержащего 0,2 М HNO_3. Для комплексообразования добавляют 0,5 мл 10 % раствора, разветвлённый полиэтиленимина (PEI), в течение 5 минут хлорид меди постепенно растворялся, образовывая прозрачный раствор водорастворимых комплексов Cu (I) и In (III) с PEI. После этого при интенсивном магнитном перемешивании добавляют 0,5 мл водного раствора тиомочевины концентрацией 0,1 М. Роль тиомочевины в данном процессе заключается в восстановлении Cu (II) до Cu (I), необходимой для формирования $CuInS_2$, а также ля контролируемого образования H_2S. Далее пробирки с 10 мл коллоидных растворов помещали вертикально в кипящую водяную баню так, чтобы уровень раствора во флаконах был ниже уровня воды в бане, и нагревали в течение 2 часов при температуре 104 °C, что обеспечивает достаточную энергию для протекания реакции и кристаллизации наночастиц [2].

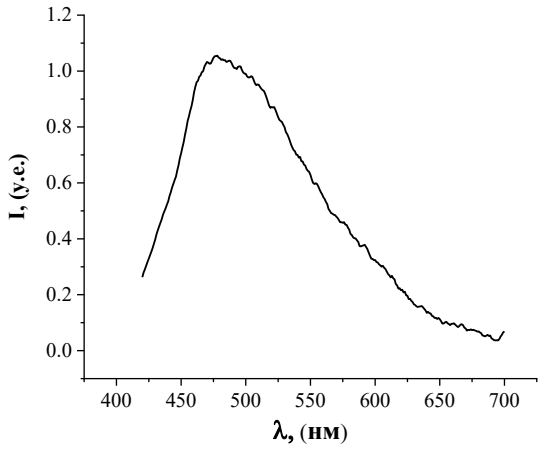


Рисунок 1 – Спектр флуоресценции водных растворов $CuInS_2$

В сравнении с современными полупроводниковыми нанокристаллическими эмиттерами на основе CdSe, нанокристаллы $CuInS_2$ и $AgInS_2$ способны охватывать обширный цветовой спектр, включая ближний инфракрасный диапазон, который представляет интерес для in vivo биомедицинской визуализации с использованием полупроводниковых люминесцентных меток. Более того, нанокристаллические эмиттеры $CuInS_2$ предпочтительнее для реальных приложений, в отличие от CdSe, они не содержат элементов класса A (Cd, Pb, Hg) или класса B (Se, As), минимизируя риски токсичности и экологического ущерба [3-4].

Список литературы

1. Литвинов, Л. М. Квантовые точки: синтез, структура и свойства / Л. М. Литвинов //Физика твердого тела. – 2016. – Т. 58, вып. 2. – С. 199–217.

2. Raevskaya, A. E. Brightly luminescent colloidal Ag-In-S nanoparticles stabilized in aqueous solutions by branched polyethyleneimine / A. E. Raevskaya, M. V. Ivanchenko, M. A. Skoryk, O. Stroyuk // Journal of Luminescence. – 2008. – № 3.

3. Баранов, А. С. Квантовые точки: от фундаментальных исследований к прикладным технологиям / А. С. Баранов, А. В. Баранов [и др.] // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 187, вып. 1. – С. 1–26.

4. Баранов, А. В. Квантовые точки: свойства и применение / А. В. Баранов, А. В. Федоров // Материалы XXI научной конференции молодых ученых. – 2018.

Semiconductor nanocrystals with sizes ranging from a few to several tens of nanometers, possessing unique optical and electronic properties. This thesis discusses the main aspects of quantum dots, including their structure, properties, and synthesis. The prospects for the application of QDs in various fields, including photonics, electronics, and medicine, are considered..

Павлова Надежда Андреевна, аспирант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, pavlova_na_19@mail.ru.

Научный руководитель – *Стрекаль Наталья Дмитриевна*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nat@grsu.by.

УДК 621.318.13

К. А. ПАВЛОВИЧ, А. О. ЛАРИН, А. Л. ЖЕЛУДКЕВИЧ, О. Ф. МИНЧУКОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ КАПСУЛИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАГНИТОМЯГКОГО ПОРОШКА FeSiAl

Исследованы магнитные свойства капсулированного композиционного порошка FeSiAl с покрытием из оксида фосфора. Установлено, что нанесение покрытия не изменяет магнитные характеристики материала. Синтезированный композит сохраняет свойства магнитомягкого материала, необходимые для создания высокочастотных электротехнических компонентов.

В последние годы мягкие магнитные композиты на основе сплавов FeSiAl приобретают всё большую актуальность благодаря сочетанию высокой намагниченности насыщения, стабильной проницаемости на высоких частотах и экономической эффективности. Эти материалы являются перспективными для применения в высокочастотных электромагнитных устройствах. Однако в процессе производства методом атомизации в порошке возникают внутренние напряжения, что негативно сказывается на магнитных характеристиках [1; 2].

Для улучшения свойств материала применяют высокотемпературный отжиг порошка, который способствует снятию напряжений. Вместе с тем это приводит к агломерации частиц [3; 4]. Решить эту проблему позволяет нанесение тонкого покрытия оксида фосфора, которое обеспечивает термостойкость, повышает электрическое сопротивление и предотвращает спекание порошка при высоких температурах.

В данной работе исследуется влияние тонкого изоляционного покрытия на магнитные характеристики композитных материалов FeSiAl.

На рисунках 1–2 представлены температурные зависимости удельной намагниченности исходного магнитомягкого порошка FeSiAl и синтезированного композита. При температуре жидкого азота величина удельной намагниченности исходного порошка FeSiAl составляет 156,4 $А·м^2·кг^{-1}$ (рисунок 1). Материал является ферромагнетиком, а температура Кюри, определенная по максимуму первой производной температурной зависимости намагниченности ($\Delta\sigma/\Delta T$), равна 737 К. Магнитный момент атома железа в порошке FeSiAl при температуре жидкого азота составляет 1,56 μ_B. Из анализа температурных зависимостей полученного порошкового композита (рисунок 2) установлено, что нанесение оксидных покрытий P_2O_5 не приводит к изменению магнитных и электрофизических свойств в пределах погрешности измерений (таблица 1).

Таблица 1 – Магнитные характеристики исходного порошка FeSiAl и композита на его основе.

	Исходный FeSiAl	FeSiAl + P_2O_5
Удельная намагниченность σ_{77} ($А·м^2·кг^{-1}$)	156,4	150,4
Магнитный момент μ	1,56	1,5
Температура Кюри (К)	737	733

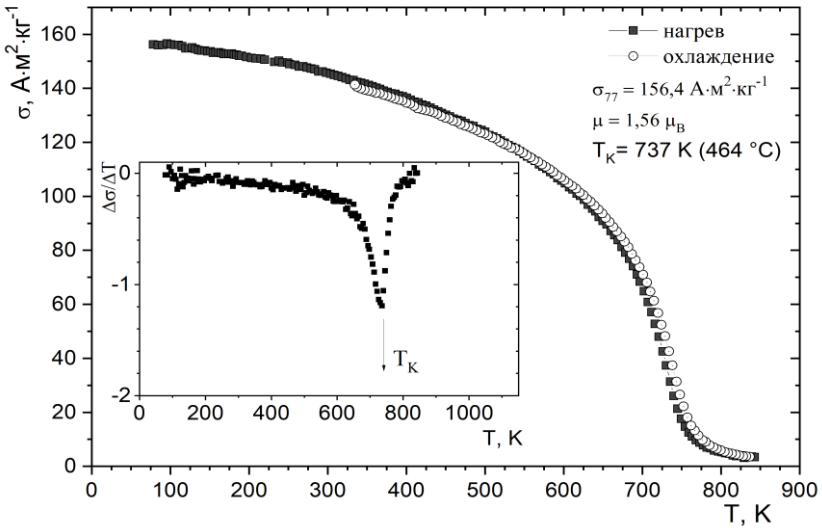


Рисунок 1 – Температурная зависимость удельной намагниченности исходного порошка FeSiAl

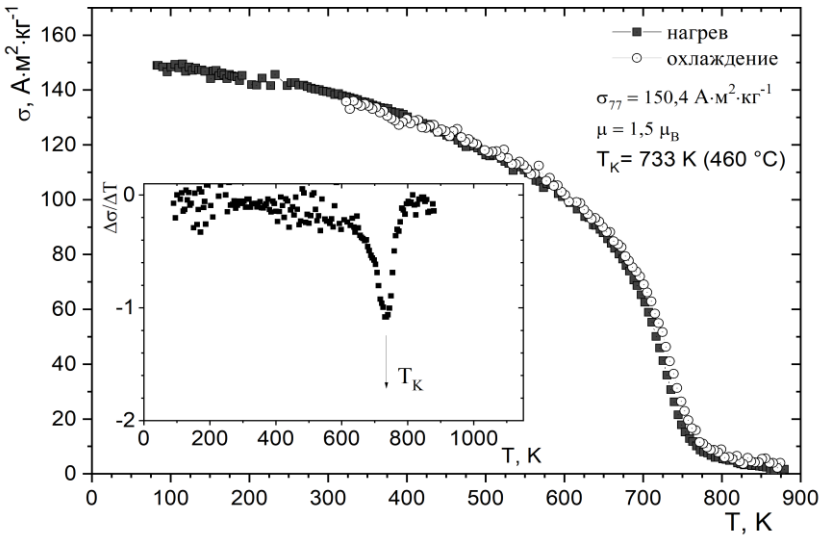


Рисунок 2 – Температурная зависимость удельной намагниченности порошкового композита FeSiAl + P_2O_5

Проведены исследования электрофизических свойств капсулированного композиционного магнитомягких порошка FeSiAl. Установлено, что нанесение тонких покрытий не приводит к изменению магнитных и электрофизических свойств исходного порошка FeSiAl, а значит не оказывает свое влияние на обменное магнитное взаимодействие в материале. Величина удельной намагниченности порошка FeSiAl при температуре жидкого азота составляет 156 А·м^2·кг$^{-1}$ для исходного образца и 150 А·м^2·кг$^{-1}$ для капсулированного. Синтезированный композит на основе порошка FeSiAl, частицы которого капсулированы оксидом фосфора, являются магнитомягким материалом с характеристиками, необходимыми для создания электротехнических компонентов[6].

Список литературы

1. Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient / O. Gutfleisch [et al.] // Advanced Materials. – 2010. – Vol. 23. – P. 821–842.

2. Shokrollahi, H. Soft Magnetic Composite Materials (SMCs) / H. Shokrollahi, K. Janghorban // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 189. – P. 1–12.

[6] Работа поддержана Белорусским Республиканским Фондом Фундаментальных Исследований (грант №Т24КИТГ-018 от 01.10.2024).

3. Silveyra, J. M. Soft Magnetic Materials for a Sustainable and Electrified World / J. M. Silveyra, E. Ferrara, D. L. Huber, T. C. Monson // Science. – 2018. – Vol. 362.

4. Luo, Z. Properties of Fe_2SiO_4/SiO_2 Coated Fe–Si Soft Magnetic Composites Prepared by Sintering Fe–6.5 wt%Si/Fe_3O_4 Composite Particles / Z. Luo, X. Fan, W. Hu, F. Luo, J. Wang, Z. Wu, X. Liu, G. Li, Y. Li // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – Vol. 499. – P. 166278.

The magnetic properties of a composite powder encapsulated in FeSiAl coated with phosphorus oxide were investigated. It was found that the coating does not change the magnetic characteristics of the material. The synthesized composite retains the properties of a magnetically soft material necessary to create high-frequency electrical components.

Павлович Кирилл Олегович, младший научный сотрудник, Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, kirillpaulovich63@gmail.com.

Ларин Артём Олегович, научный сотрудник, Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, larin@physics.by.

Минчукова Ольга Федоровна, ведущий научный сотрудник, Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, orion_minsk@tut.by.

Научный руководитель – *Желудкевич Александр Ларионович*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией физики магнитных материалов, Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, zheludkevich27@gmail.com.

УДК 621.039.33

Р. О. ПАУКОВА

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ Ti-35Nb-2Ta-3Zr СПЛАВА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ВВЕДЕНИЕМ ЦИНКА И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ КОМПРЕССИОННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Костные имплантаты требуют биосовместимости, антибактериальных свойств и механической прочности. Для решения этой задачи предложен двухэтапный метод модификации сплава Ti-35Nb-2Ta-3Zr: внедрение цинка методом трения с перемешиванием с последующей обработкой компрессионными плазменными потоками, что позволяет настраивать свойства имплантата под конкретную медицинскую задачу.

Ключевая проблема современных имплантатов в том, что они плохо срастаются или у организма возникают нежелательные реакции на инородные объекты, поэтому требования, предъявляемые к костным имплантатам, суровые. Прежде всего, биосовместимость и биоактивность материала. При этом он должен быть биорезистентным, не портиться при имплантации в организм человека либо животного. Имплантат должен обладать механическими свойствами. Сейчас наиболее востребованным материалом для имплантов является титан и различные титановые сплавы. И этот металл не зря считается лучшим вариантом, ведь он легкий, полностью биосовместим с тканями организма, хорошо приживается и крайне редко вызывает аллергические реакции. Тем не менее, достижение антибактериальных свойств и поверхностной остеогенной активности в конструкции данного материала представляет собой трудную задачу. Поэтому модификация поверхности становится важным подходом и актуальной задачей для создания действительно полезного и практичного материала. Китайской группой ученых был успешно разработан высокопрочный и низкомодульный β-титановый сплав Ti-35Nb-2Ta-3Zr с модулем упругости, сниженным до 50 ГПа, который эффективно решает задачи механической бионики. Был также разработан способ его модификации методом обработки трением с перемешиванием, позволяющий добиться поверхностной микро- и наноструктурной модификации титановых сплавов, что обеспечивает возможность одновременного решения проблем антимикробной и поверхностно-межфазной остеогенной активности. Однако биоинертность данного сплава требует целенаправленной модификации поверхности, которая и была проведена.

В работе предложен двухэтапный подход. На первом этапе методом обработки трением с перемешиванием (ОТП) в поверхность сплава внедрялся цинк – элемент, стимулирующий остеогенез и обладающий антибактериальными свойствами. Было получено пять серий образцов с варьированием параметров ОТП (глубина канавки, скорость вращения инструмента, количество проходов). На втором этапе все образцы подвергались обработке компрессионными плазменными потоками (КПП) в атмосфере азота при двух значениях расстояния до анода: 12 см и 14 см. Остальные параметры КПП фиксированы: напряжение 4 кВ, 3 импульса, давление 3 Торр. Исследование микроструктуры, элементного и фазового состава проводилось методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энергодисперсионного анализа (ЭДС) и рентгеноструктурного анализа (РСА).

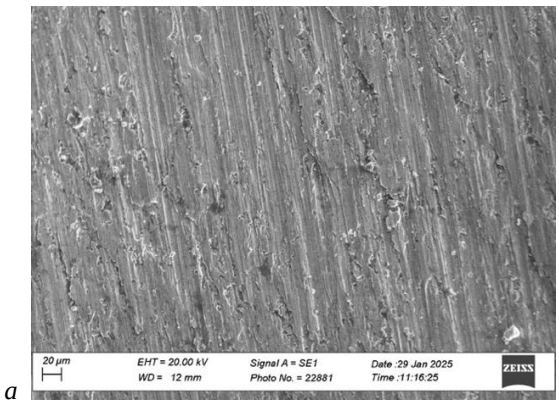
Метод рентгеноструктурного анализа позволил зафиксировать следующие результаты. После первого этапа (ОТП с цинком) во всех образцах было зафиксировано формирование многофазной структуры, включающей β-твердый раствор (Nb,Ti), чистый ниобий (Nb) и оксид ниобия (NbO). Присутствие оксидной фазы является следствием высокотемпературного воздействия в условиях воздушной атмосферы. Содержание цинка варьировалось в зависимости от режима обработки, достигая максимальных значений около 1.3 ат.% при оптимальных параметрах.

После второго этапа все кардинально изменилось. Обработка компрессионными плазменными потоками привела к кардинальной трансформации фазового состава поверхностного слоя. Согласно данным РСА, фазы чистого ниобия (Nb) и оксида ниобия (NbO) полностью исчезают, и во всех образцах формируется новая фаза – нитрид титана Ti_2N. Массовая доля нитридной фазы составляет от 8 до 12 % независимо от режима предварительной ОТП, что свидетельствует об определяющей роли плазменной обработки.

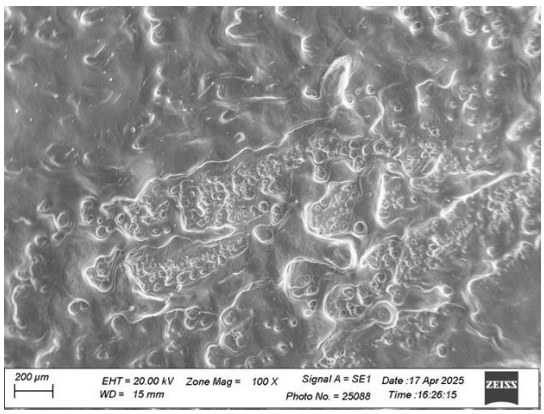
Принципиальные различия выявлены при сравнении двух режимов КПП. Обработка на расстоянии 12 см до анода способствовала сохранению и локальному перераспределению цинка: в одном из образцов его концентрация возросла до 3.86 ат.%, что значительно превышает исходный уровень после ОТП. Микроструктура поверхности в этом режиме характеризуется сложным рельефом с зонами наплывов и ячеистой морфологией, типичной для оплавления и быстрой кристаллизации.

Обработка на расстоянии 14 см привела к иным результатам. Зафиксировано активное внедрение азота в приповерхностный слой (до 23.9 ат.%), что подтверждает эффективное протекание плазменного азотирования. При этом содержание цинка снижается до минимума, что может быть связано как с его испарением, так и с диффузией вглубь материала. Микроструктура поверхности в этом режиме более однородная и сглаженная, что важно для обеспечения оптимальной клеточной адгезии.

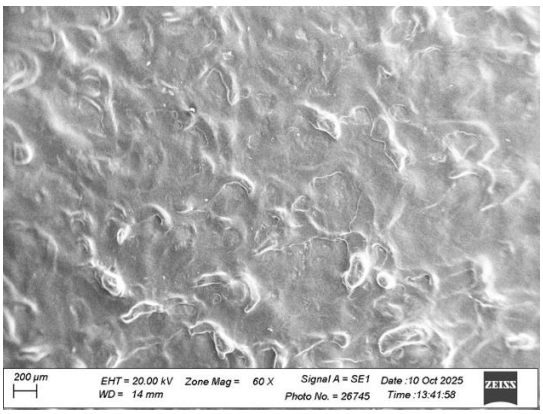
Метод сканирующей электронной микроскопии также позволил сделать крайне важные выводы.



а



б



в

Рисунок 1 – Эволюция морфологии поверхности сплава Ti-35Nb-2Ta-3Zr: а) после ОТП с цинком; б) после обработки КПП при расстоянии 12 см до анода; в) после обработки КПП при расстоянии 14 см до анода

Сравнивая снимки, видно, как кардинально меняется поверхность после разных этапов обработки. После ОТП с цинком мы видим довольно грубый, изрезанный рельеф – там явно видны следы инструмента, борозды, зазубрины, видно, что материал интенсивно перемешивали.

А вот после КПП картина совсем другая. При 12 см поверхность оплавилась и быстро застыла: появляется интересная ячеистая структура с мелкими наплывами, чувствуется, что материал пережил мощное тепловое воздействие. А при 14 см всё становится гораздо спокойнее и ровнее – поверхность сглаженная, однородная.

Два режима компрессионной плазменной обработки дают нам возможность выбирать, какой именно характер поверхности мы хотим получить. И это, пожалуй, самый ценный результат работы. Если стоит задача сохранить биологическую активность цинка и создать рельеф, способствующий сращиванию с костной тканью, – мы выбираем режим 12 см. Если же на первый план выходят прочность, износостойкость и гладкое покрытие, которое защитит имплантат в условиях высоких нагрузок – режим 14 см становится более предпочтительным. Получается, что комбинируя два подхода, мы действительно можем управлять свойствами поверхности, подстраивая их под конкретные медицинские задачи: где-то важнее биоактивность, где-то – долговечность. И в этом, как мне кажется, заключается главный практический смысл нашей работы[7].

Список литературы

1. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками / В. В. Углов [и др.]. – Минск : БГУ, 2013. – 248 с.

2. Zhou Y., Luo D., Hu D., & He G. (2020). Microstructure and mechanical properties of laser surface melted Ti–35Nb–2Ta–3Zr alloy for biomedical applications.

3. Yingjing, Fang. An efficient approach to endow TiNbTaZr implant with osteogenic differentiation and antibacterial activity in vitro / Yingjing Fang, Qingge Wang, Zhi Yang, Wenyue Yang, Liqiang Wang, Jiayin Ma, Yuanfei Fu // Materials & Design. – 2022. – No. 221.

4. Алехнович, В. Н. Электронно-лучевая обработка материалов / В. Н. Алехнович, А. В. Алифанов, А. И. Гордиенко, И. Л. Поболь. – Минск : Белорусская наука, 2006. – 319 с.

5. Сплавы для медицинских применений на основе β-титана / Б. Б. Страумал [и др.] // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2020. – № 6. – С. 52–64.

Ti-35Nb-2Ta-3Zr alloy was modified by friction stir processing with zinc and subsequent compression plasma flows at two distances (12 and 14 cm). It was found that the 12 cm mode preserves zinc for bioactivity, while the 14 cm mode forms a hardened titanium nitride layer. The combined treatment allows tailoring surface properties for specific biomedical applications.

Паукова Руслана Олеговна, студентка 3 курса Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, fanoks1@mail.ru.

Научный руководитель – *Углов Владимир Васильевич*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, uglov@bsu.by.

УДК 538.9

М. В. ПЕРЕЛОМЕЦ

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРОВ, ОБЛУЧЁННЫХ УФ-ИЗЛУЧЕНИЕМ

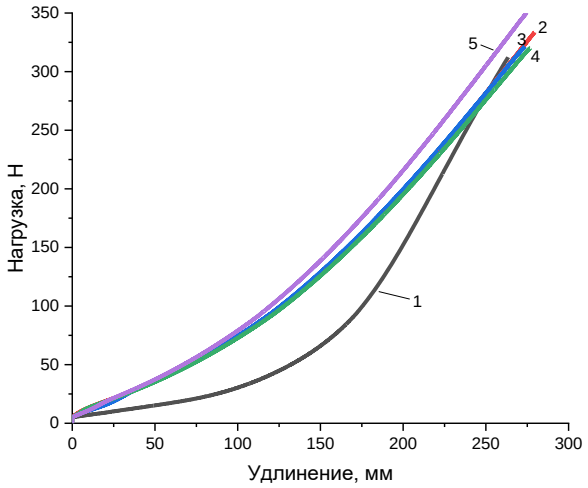
Изучено влияние параметров УФ-облучения на упруго-прочностные свойства эластомеров марки 47-8113 после испытаний в климатической камере. Установлено, что после испытаний в климатической камере при влажности 90 % и температуре 40 °С упруго-прочностные свойства эластомеров не изменились. Обнаружено, что у облученных образцов после климатической камеры упруго-прочностные свойства улучшаются до 10 %.

В настоящее время перспективным направлением модификации эластомеров является радиационная модификация, основанная на взаимодействии излучений с веществом [1–3]. Интерес представляет радиационная модификация материалов ультрафиолетовым (УФ) излучением [4–5]. Целью данной работы являлось установление закономерностей влияния длительности УФ-облучения на свойства эластомеров при испытаниях в климатической камере. Практическая значимость результатов заключается в возможности целенаправленного управления свойствами эластомерных материалов для создания изделий с заданным балансом эластичности и прочности, обладающих стойкостью к воздействию окружающей среды.

Для исследования упруго-прочностных свойств были использованы эластомеры марки 47-8113. Образцы подвергались УФ-облучению. Время облучения варьировалось от 15 до 60 мин. Источником излучения служила эксимерная лампа с активной молекулой KrCl, генерирующая излучение с длиной волны 222 нм. Испытания в климатической камере проводились в течение 1,5 ч при влажности 90 % и температуре 40 °С. Измерения упруго-прочностных свойств проводились с помощью машины Kason WDW-5.

[7]Работа выполнена при поддержке Республиканского фонда фундаментальных исследований Беларуси (грант № Т24КИТГ-017).

На рисунке 1 представлены графики зависимости нагрузки от удлинения. Видно, что с увеличением длительности облучения кривые зависимости нагрузки от удлинения становятся круче, а угол наклона увеличивается. Указанная закономерность свидетельствует о повышении предела прочности на разрыв эластомеров при облучении УФ-излучением.



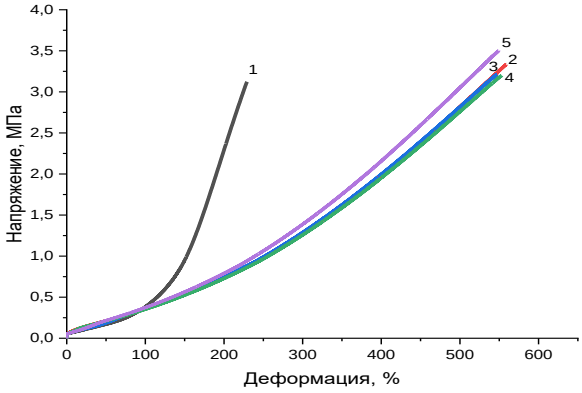
1 – без УФ-облучения; 2 – УФ-облучение в течение 15 мин.; 3 – 30 мин.; 4 – 45 мин.; 5 – 60 мин.

Рисунок 1 – Графики зависимости нагрузки от удлинения для облучённых УФ-излучением эластомеров после испытаний в климатической камере

В таблице 1 представлены результаты исследования упруго-прочностных свойств облученных УФ-излучением эластомеров после испытаний в климатической камере. Видно, что у облученных образцов после климатической камеры упруго-прочностные свойства улучшаются до 10 %.

Таблица 1 – Результаты исследования влияния длительности УФ-облучения на эластичность и прочность эластомеров

	К.о.	Обл. 15 мин.	Обл. 30 мин.	Обл. 45 мин.	Обл. 60 мин.
Удлинение, мм	263,52	279,46	273,57	276,70	274,60
Относительное удлинение, %	527,04	558,92	547,14	553,40	549,20
Сила на разрыв, Н	312,28	333,60	321,60	320,00	350,16



1 – без УФ-облучения; 2 – УФ-облучение в течение 15 мин.; 3 – 30 мин.; 4 – 45 мин.; 5 – 60 мин.

Рисунок 2 – Графики напряжения от деформации для облучённых УФ-излучением эластомеров после испытаний в климатической камере

На рисунке 2 представлены графики зависимости напряжения от деформации. Видно, что облученных УФ-излучением эластомеров после испытаний в климатической камере относительное изменение дефор-

мации значительно ниже с ростом напряжения, в сравнении с контрольными покрытиями. В частности, наибольшее значение относительного удлинения, 558,92 % соответствует образцам, облученных УФ-излучением в течение 15 минут, для контрольных образцов относительное удлинение при таких же напряжениях соответствует 527,04 %.

Таким образом, установлено, что после испытаний в климатической камере при влажности 90 % и температуре 40 °С упруго-прочностные свойства эластомеров не изменились. Обнаружено, что у облученных образцов после климатической упруго-прочностных свойства улучшаются до 10 %.

Список литературы

1. Valko, N. G. Study of the influence of x-ray radiation on the structure and elastic strength properties of elastomers based on nitrile butadiene rubber / N. G. Valko, T. Yu. Nikonova, A. S. Skaskevich, A. V. Kasperovich, E. E. Kopishev // 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024), Tomsk, September 16–21, 2024 : Abstracts. – Tomsk : Academizdat Publishing, 2024. – R5-P-042102.

2. Valko, N. G. Modification of the Structure and Elastic-Strength Properties of Elastomers Based on Nitrile Butadiene Rubber with the X-ray / N. G. Valko, A. V. Kasperovich, A. A. Skaskevich, T. Yu. Nikonova, K. A. Zhuk // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2025. – Vol. 19, No. 2. – P. 540–544.

3. Валько, Н. Г. Влияния рентгеновского излучения на структуру и упруго-прочностные свойства эластомеров на основе бутадиен-нитрильного каучука / Н. Г. Валько, А. А. Скаскевич, А. В. Касперович // Вестник Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева. Сер.: Химия. География. Экология. – 2024. – № 1. – 146 с. – С. 43–55. – https://doi.org/10.32523/2616-6771-2024-146-1

4. Запорожская, Е. Л. Влияние ультрафиолетового излучения на структуру и свойства бутадиен-нитрильных каучуков / Е. Л. Запорожская, С. П. Кабанов // Пластические массы. – 2018. – № 5–6. – С. 45–48.

5. Бартенев, Г. М. Физика и механика полимеров / Г. М. Бартенев, Ю. В. Зеленев. – М. : Высшая школа, 1983. – 391 с.

6. Тагер, А. А. Физико-химия полимеров / А. А. Тагер. – 4-е изд. – М. : Научный мир, 2007. – 576 с.

The effect of UV irradiation parameters on the properties of grade 47–8113 elastomers after testing in a climatic chamber was studied. It was found that after testing in a climatic chamber at 90 % humidity and 40 °C, the elastic strength properties of the elastomers remained unchanged. It was found that the elastic strength properties of irradiated samples after testing in the climatic chamber improved by up to 10 %.

Переломец Марта Владимировна, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, mperelomezcz@gmail.com.

Научный руководитель – *Валько Наталья Георгиевна*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, N.Valko@grsu.by.

УДК 544.654.2

А. А. ПЛЯСУНКОВА

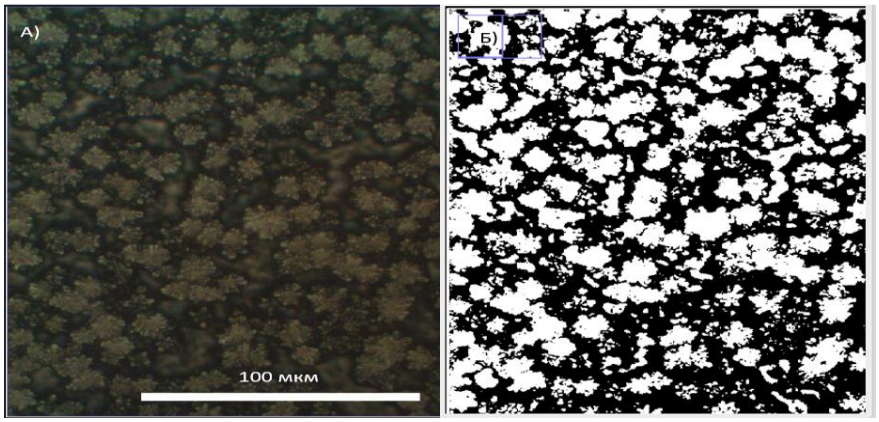
ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ ПЕРОВСКИТНЫХ ПЛЁНОК В ПРОГРАММЕ IMAGEJ

В настоящее время солнечная энергетика получает все более широкое распространение, однако всё ещё существует проблема низкого кпд солнечных элементов. Перспективным способом решения данной проблемы является использование перовскитов. Данные структуры обладают такими физическими свойствами, как высокий коэффициент поглощения света, большая диффузионная длина носителей заряда, контролируемая ширина запрещённой зоны. Эти свойства позволяют получать элементы с более высоким КПД, чем у традиционных кремниевых элементов [1].

Морфология таких структур с одной стороны определяется условиями их синтеза, а с другой – имеет непосредственную связь с оптическими и электрическими свойствами, а также стабильностью данных структур. Одним из основных способов определения особенностей морфологии поверхности является анализ оптических изображений. Данная работа посвящена такому анализу в программе ImageJ.

Морфологию поверхности перовскита изучали с помощью оптического микроскопа Nikon Eclipse L200N, производства Японии. На Рис.1(а) представлен снимок морфологии поверхности полученных перовскитов.

Анализ полученных изображений осуществлялся в программе ImageJ [2]. Для оценки пористости среды был получен бинарный отпечаток структуры – Рис. 1(б). Область пор на рисунке закрашена. Получено, что в данном случае эта пористость составляет $\alpha = 38\%$. Данное значение пористости относительно невелико и является положительной характеристикой, так как пустоты – это область неконтролируемой рекомбинации и плохого переноса заряда.



(*а*) (*б*)

Рисунок 1 – (а) микроскопическое изображение перовскитной плёнки, (б) бинарное изображение для определения пористости и анализа зернистой структуры

На следующем шаге анализа на изображении были выделены отдельные зёрна, после чего измерены размеры зёрен [3]. Для получения распределения была проведена математическая обработка полученных данных. На первом этапе обработки на основании значений, полученных в ходе измерений, получен график интегрального распределения частиц по размерам. Данное распределение было аппроксимировано полиномом. Функция дифференциального распределения была получена как аналитическая производная функции интегрального распределения.

На графике 1 изображено полученное интегральное распределение частиц по размерам. По вертикальной оси отложена величина F, смысл которой – доля частиц, имеющих больший размер, чем данный.

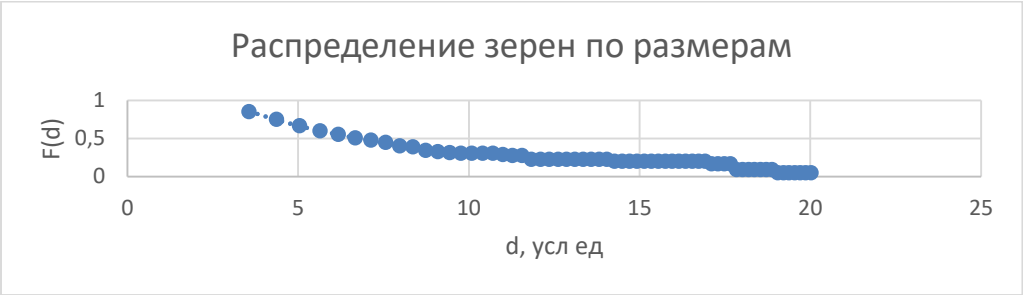


График 1 – Кривая распределения по размерам частиц

Заключение. Таким образом, в данной работе путем анализа изображений были проанализированы структурные свойства перовскитных плёнок. Определена пористость структур. В программе ImageJ получены размеры частиц, построено интегральное распределение частиц по размерам.

Список литературы

1. Ghulam Dastgeer & Sobia Nisar & Muhammad Wajid Zulfiqar & Jonghwa Eom & Muhammad Imran & Kamran Akbar, A review on recent progress and challenges in high-efficiency perovskite solar cells, Nano Energy, (2024), DOI: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.110401

2. Teague, M. R. Image analysis via the general theory of moments / M. R. Teague // Journal of the Optical Society of America. – 1980. – № 70. – P. 920–930.

3. Kieran, F. Mulchrone, Kingshuk Roy Choudhury, Fitting an ellipse to an arbitrary shape: implications for strain analysis / F. Kieran // Journal of Structural Geology. – 2004. – Vol. 26, Issue 1. – P. 143–153.

Плясункова Анастасия Александровна, студент 3 курса Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, pliasunkovanastya@gmail.com.

Научный руководитель – Шматок Евгений Викторович, магистр, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь.

Научный руководитель – Врублевский Игорь Альфонсович, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь.

УДК 523.681,533.9.082.5

А. О. ПУХТЕЕВ, Е. В. АБРАМЕНКО, Н. А. ОРЕХОВА

АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА КОРЫ ПЛАВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ МЕТЕОРИТОВ

Методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии в работе получены суммарные и послойные спектры коры плавления двух железных метеоритов (Campo del Cielo и образца неизвестного метеорита). Проанализировано распределение преобладающих химических элементов в коре плавления изучаемых метеоритов и показаны причины, которые могли вызвать наблюдаемое распределение элементов.

Микрометеориты и метеориты являются свидетелями и участниками эволюционных процессов, происходивших и происходящих в Солнечной системе. В метеоритах не содержится каких-либо новых, неизвестных на Земле, химических элементов, при этом в них обнаружены почти все известные элементы. Изотопный состав многих химических элементов метеоритов оказался тождественным изотопному составу тех же элементов земного происхождения [1].

В процессе падения на Землю метеороид, летящий со скоростью в десятки км/с, будет испытывать разогрев верхних слоев из-за трения в атмосфере планеты. Вещество этих слоев частично расплавится, и тонкая жидкая пленка расплава будет сдута встречным потоком воздуха. Часть вещества испарится, часть «сгорит» из-за взаимодействия с кислородом, создавая светящийся след в атмосфере, какие-то мелкие твердые частички отслоятся и станут микрометеоритами. В результате уменьшится масса падающего тела, произойдет абляция. Основным процессом абляции для железных метеорных тел считается плавление [2]. При прекращении разогрева расплав затвердеет и образуется поверхностный слой, называемый корой плавления.

Целью работы являлось исследование коры плавления фрагментов неизвестного железного метеорита и метеорита Campo del Cielo – железного метеорита с силикатными включениями, найденного в Аргентине. Оценку локального пространственного и объемного распределения элементов проводили методом лазерной многоканальной спектрометрии, используя лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1. Плавление вещества и возбуждение плазмы в спектрометре осуществляется излучением двух-импульсного лазера на АИГ+Nd^{3+} (модель LS2131 DM). Длительность импульсов ≈ 15 нс. Лазерное излучение фокусируется на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 104 мм. Размер пятна фокусировки около 50 мкм. Энергия импульсов 35 мДж. Интервал между импульсами 10 мкс. Первый импульс испаряет тонкий слой образца толщиной примерно 1,7 мкм [3]. Второй импульс возбуждает полученные пары, спектр излучения которых регистрирует спектрометр. Метод лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии позволяет изучать кору плавления метеоритов и по поверхности, и по глубине.

Для изучения коры плавления были выбраны достаточно ровные участки на оплавленной части метеоритов (рисунок 1).

А *Б*

Рисунок 1 – Исследуемые участки коры плавления:
А – неизвестный метеорит, Б – метеорит Campo del Cielo

Для неизвестного железного метеорита получены суммарные и послойные спектры в 42 точках: пробито 7 рядов по 6 точек в ряду; для метеорита Campo del Cielo – спектры в 25 точках (5 рядов по 5 точек). В обоих случаях количество сдвоенных импульсов было равно 50, размер пятна фокусировки примерно 50 мкм, энергия импульсов – 20 мДж, расстояние между рядами – 200 мкм, а между точками в ряду – 300 мкм. Следовательно, мы имеем возможность исследовать оплавленный поверхностный слой метеоритов на глубину 85 мкм. На

рисунке 2 представлены графики, показывающие содержание преобладающих химических элементов в изучаемых образцах.

На графиках видно, что изучаемые метеориты имеют сильно различающийся химический состав коры плавления. Видно, что кора плавления метеорита Campo del Cielo состоит в основном из железа и никеля с включениями кремния и титана, что согласуется с данными о его химическом составе, приводимыми другими авторами [4].

Кору плавления неизвестного метеорита помимо железа, непоказанного на рисунке 3 из-за высокой интенсивности его спектральной линии, составляют никель и алюминий, неравномерно распределенные по исследуемой области, а также достаточно равномерно распределенные медь, цинк, свинец и ванадий. Остальные элементы входят в состав коры плавления в виде включений (кобальт, хром, молибден) или точечно (кремний, марганец).

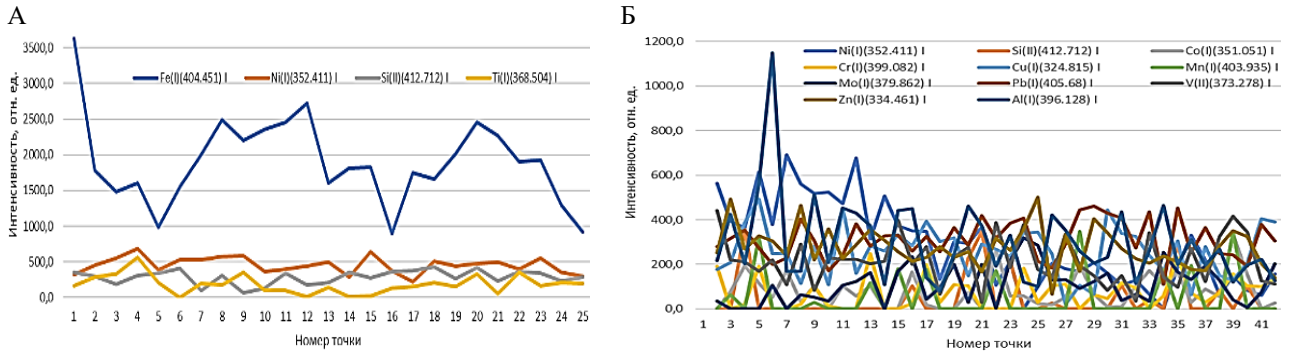


Рисунок 2 – Содержание преобладающих химических элементов в коре плавления метеорита Campo del Cielo (А) и неизвестного метеорита (Б)

Послойные спектры позволяют проследить распределение химических элементов на разной глубине. Мы рассматриваем суммарные данные по 10 верхним слоям и по 10 самым глубоким (рисунки 3 и 4).

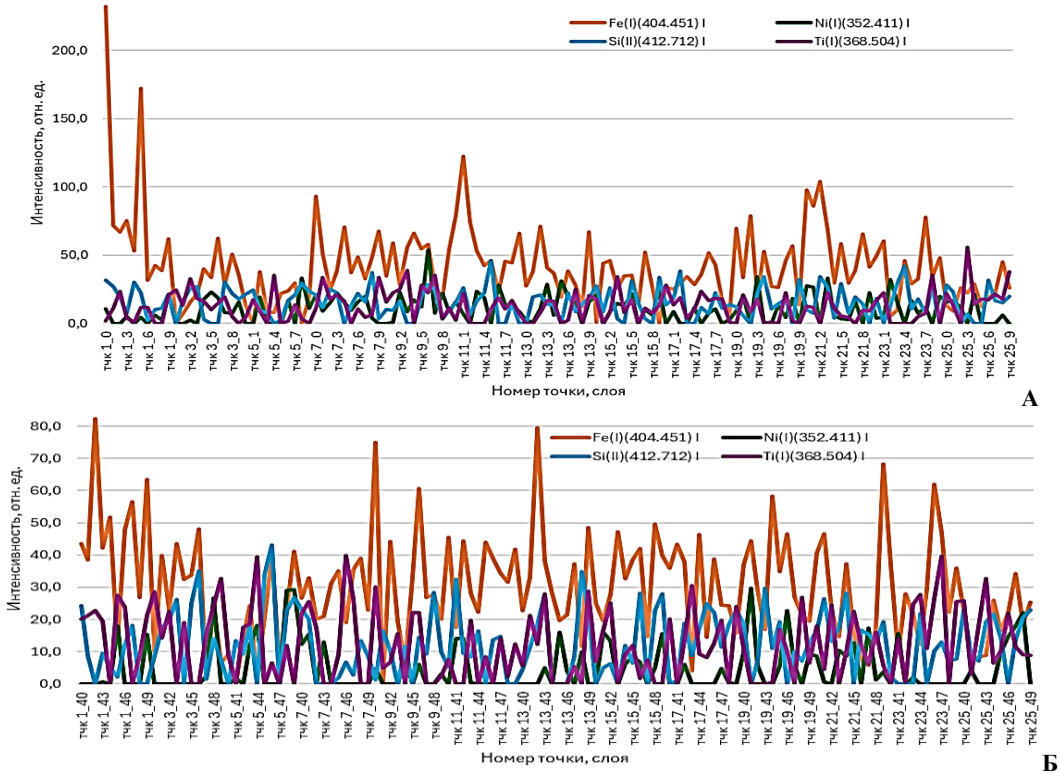


Рисунок 3 – Послойное содержание преобладающих химических элементов в метеорите Campo del Cielo: А – 10 верхних слоев, Б – 10 нижних слоев

При сравнении частей А и Б рисунка 3 видно, что в нижних слоях коры плавления, располагающихся на глубинах 68-85 мкм, уменьшилось содержание железа: средняя интенсивность его излучения в верхних слоях

(до глубины 17 мкм) составляет около 42 относительных единиц, а в нижних – около 30. Примерно в 2 раза уменьшилось и содержание никеля (интенсивность изменилась с 10,4 до 4,6). Распределение и содержание титана и кремния практически одинаково в верхних и нижних слоях.

Сравнивая верхние и нижние слои (рис.4) можно заметить, что в некоторых точках содержание алюминия уменьшилось и его распределение по исследуемой площадке стало достаточно равномерным. В точках 21 и 22 отмечается увеличение содержания молибдена и марганца в нижних слоях. Содержание никеля уменьшилось почти в 4 раза. Содержание и распределение остальных химических элементов слегка варьируется от точки к точке и в верхних, и в нижних слоях, оставаясь примерно одинаковым.

Так как основными составляющими железных метеоритов являются железо и никель, то очевидно, что все остальные химические элементы, входящие в состав изучаемых образцов, представляют собой лишь некие мелкие включения, поэтому их наличие в различных слоях сильно колеблется. Са-мый верхний слой (1,7 мкм от поверхности) коры плавления метеорита Campo del Cielo практически состоит из железа (рисунок 3 А). Это означает, что разогрев падающего тела был недостаточен для плавления и последующего перемешивания более глубоких слоев из-за взаимодействия с турбулентными воздушными потоками, возникающими при прохождении крупного метеорного тела через атмо-сферу. Недостаточный разогрев может быть следствием низкой скорости метеорного тела при входе в атмосферу.

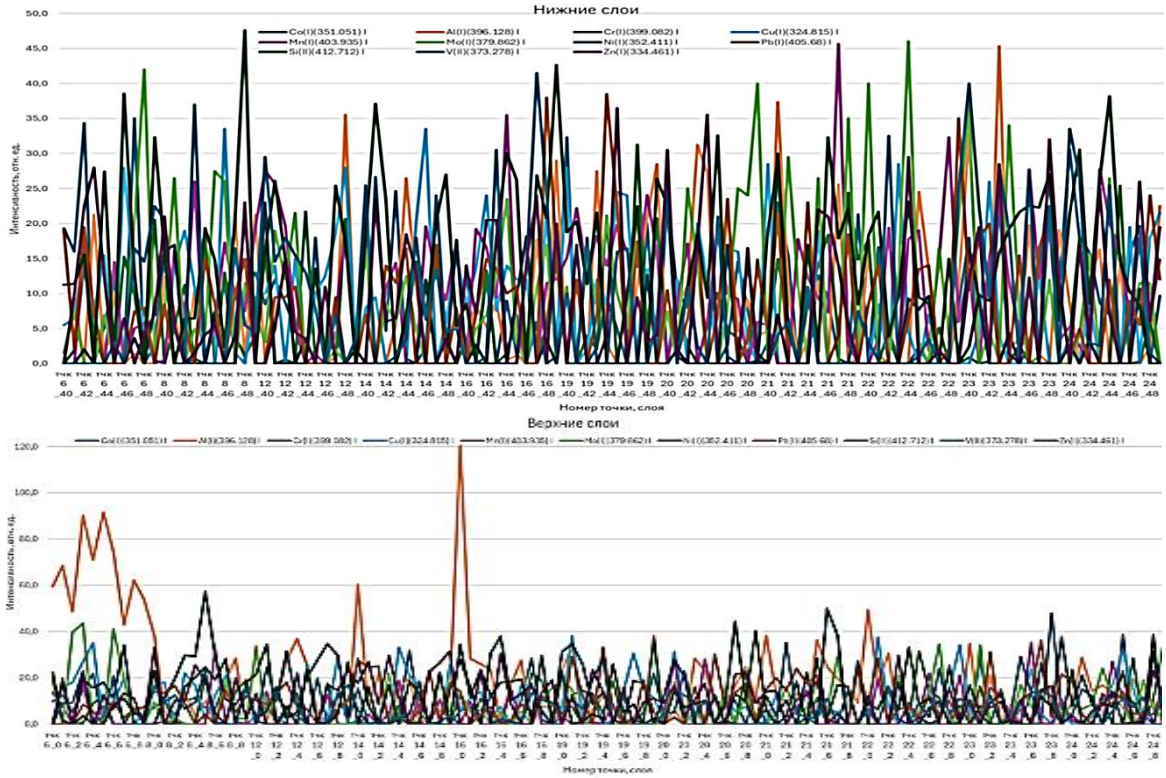


Рисунок 4 – Послойное содержание преобладающих химических элементов в неизвестном метеорите

Колебания содержания алюминия в верхних и нижних слоях нескольких точек коры плавления неизвестного метеорита, а также лишь незначительные вариации содержания и распределения остальных химических элементов могут говорить о высокой скорости входа метеорного тела в атмосферу. Высокая скорость обусловила значительное трение об атмосферу, вызвавшее сильный разогрев тела, сопровождающийся плавлением и перемешиванием вещества в слое толщиной 85 мкм от поверхности. При остывании метеорита более легкие алюминиевые включения «всплыли» и оказались в верхних слоях коры плавления.

Список литературы

1. Иванов, А. В. Минералы метеоритов – новый каталог / А. В. Иванов, А. А. Ярошевский, М. А. Иванова // Геохимия. – 2019. – Т. 64, № 8. – С. 869–932.

2. Brykina, I. G. On the Influence of the Effective Heat of Ablation on Modeling the Interaction of Meteoroids with the Atmospher / I. G. Brykina, L. A. Egorova // Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics. – 2022. – Vol. 23(2). – URL: http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-2/articles/995 (дата обращения: 14.03.2026).

3. Орехова, Н. А. Исследование процессов пробоя сталей методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии / Н. А. Орехова, Е. В. Абраменко, М. А. Мартынова, А. П. Зажогин // XIV Международная конференция по фотонике и информационной оптике : сб. науч. тр. – М. : НИЯУ МИФИ, 2025. – С. 409–410.

4. Пономарев, Д. С. Минералого-геохимическое исследование и классификационные признаки железного метеорита с силикатными включениями Маслянино / Д. С. Пономарев, К. Д. Литасов, А. Н. Исикава, И. С. Бажан, Т. Н. Хирата, Н. М. Подгорных. – URL:www.sibran.ru/upload/iblock/e1d/e1db3f230f98dd53c6e0dfe98af71173.pdf?ysclid=m3leaf53la498437416. (дата обращения: 28.11.2025).

Using laser atomic emission multichannel spectrometry, we obtained total and layer-by-layer spectra of the fusion crusts of two iron meteorites (Campo del Cielo and a sample of an unknown meteorite). We analyzed the distribution of the predominant chemical elements in the fusion crusts of the studied meteorites, and demonstrated possible causes for the observed elemental distributions.

Пухтеев Александр Олегович, студент 1 курса факультета радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, sanya.puhteev@mail.ru.

Абраменко Евгений Валерьевич, ученик 10 класса, ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», Минск, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Орехова Наталия Андреевна,* учитель астрономии, ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», Минск, Республика Беларусь, sotis-nil@yandex.ru.

Научный консультант – *Зажогин Анатолий Павлович,* доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь.

УДК 538.9

А. А. РОДИОНОВА, В. В. ФИЛИППОВ, А. И. КОЛПАКОВ,
И. С. САПРЫКИН, А. Д. ПАНЬКОВ

МАГНИТНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ ДИНАМИКИ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ НИКЕЛЕВЫХ НАНОПЛЁНОК НА GaAs

Методом магнетронного распыления синтезированы нанопленки Ni толщиной 40–100 нм на подложках GaAs. Установлено, что с уменьшением толщины Ni коэрцитивная сила и эффективная магнитная анизотропия возрастают, что связано с пиннингом доменных стенок на морфологических неоднородностях из-за островкового механизма роста. Полученные результаты важны для создания элементов магнитоэлектроники с контролируемыми свойствами.

Одной из актуальных задач современного материаловедения является разработка наноструктур с электромагнитными характеристиками управляемыми внешними полями для применения в устройствах электроники и фотоники. Функционирование таких устройств – от чувствительных магниточувствительных сенсоров до элементов памяти с высокой плотностью записи – непосредственно определяется возможностью контроля магнитных параметров функциональных слоев. В качестве базового элемента перспективных систем рассматриваются гетеропереходы ферромагнетик-полупроводник, где магнитные свойства пленочного слоя играют определяющую роль. Система Ni/GaAs позволяет в контролируемых силовых полях исследовать взаимосвязь между параметрами формирования пленок и их магнитным поведением [1, 2].

Эффективность работы устройств на основе таких структур напрямую зависит от возможности прогнозирования магнитных характеристик по данным о морфологии и геометрии пленок. В представленной работе проведен комплексный анализ серии никелевых нанопленок, различающихся по толщине. Изучены особенности их рельефа, исходной доменной структуры и трансформации последней во внешнем магнитном поле. Выявленные закономерности служат основой для целенаправленного синтеза материалов с заданным магнитным откликом [3].

Методика.

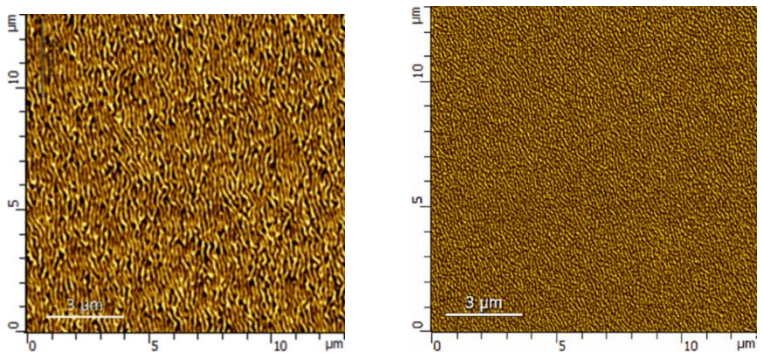
Пленки никеля толщиной от 40 до 100 нм формировались методом магнетронного распыления высокочистой (99.99%) мишени на подготовленные подложки GaAs. Процесс проводился в аргоновой атмосфере (0.5 Па) при мощности разряда 300 Вт. Толщина Ni контролировалась временем осаждения и измерялась методом «ступеньки» на голографическом микроскопе [4]. Исследование морфологии и шероховатости (средней арифметической Ra и среднеквадратичной Rq) проводилось методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Магнитную доменную структуру визуализировали и анализировали методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ) с использованием специализированных кантилеверов. Для изучения динамики перемагничивания к образцу в плоскости пленки подносили постоянный магнит (Nd-Fe-B, ~260 мТл). На основе МСМ-изображений определяли средний период доменной структуры (Λ), по которому рассчитывали эффективную магнитную анизотропию (Keff) и коэрцитивную силу (Hc), используя известные значения обменной константы и намагниченности насыщения для никеля [5].

Результаты и обсуждение.

Измерения толщин Ni подтвердили линейный характер роста пленок ($h = V \cdot t$) со скоростью V = 0.8 нм/мин. (достоверность аппроксимации $R^2 \approx 1$), что свидетельствует о стабильности процесса осаждения.

Данные атомно-силовой микроскопии показали, что осаждение никеля приводит к сглаживанию поверхности структуры по отношению к GaAs. Так, если шероховатость исходной полированной подложки составляла Ra = 1.79 нм и Rq = 2.33 нм, то после нанесения пленки толщиной 40 нм эти параметры снизились до 0.81 нм и 1.06 нм соответственно. Для более толстых пленок (75 и 100 нм) наблюдался небольшой рост шероховатости (Ra ~1.3–1.4 нм), что связано с эволюцией микрорельефа в процессе островкового роста. Расчет фрактальной размерности для всех образцов дал значения, превышающие 2 (в диапазоне 2.52–2.63), что является характерным признаком трехмерного островкового механизма роста по Вольмеру-Веберу.

Магнитно-силовая микроскопия позволила выявить четкую зависимость начальной доменной структуры от толщины Ni. Для самой тонкой исследованной пленки (40 нм) наблюдалась мелкомасштабная, сильно раздробленная структура с высокой плотностью магнитных контрастов. С увеличением толщины до 50 и 75 нм происходило укрупнение и упорядочивание доменов, а пленка толщиной 100 нм демонстрировала наиболее крупные и четко очерченные магнитные области (рис. 1*а*,*б*).



а *б*

Рисунок 1 – Изображения МСМ доменной структуры пленок Ni/GaAs 100 нм (а), 40 нм (б)

Ключевые магнитные параметры, рассчитанные на основе анализа доменной структуры, показали выраженную обратную зависимость от толщины. Значения эффективной магнитной анизотропии определялись из периода доменной структуры Λ согласно выражению $Keff = (\pi^2 A)/\Lambda^2$, где $A = 1 \times 10^{-11}$ Дж/м – обменная константа для никеля [6]. На основании полученных значений *Keff* производился расчет коэрцитивной силы: $Hc = (2Keff)/(\mu_0 M_S)$, где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, $M_S = 470 \times 10^3$ А/м – намагниченность насыщения для магнетронно-напыленного никеля [6].

Так, коэрцитивная сила *Hc* возросла с 83 Э для пленки толщиной 100 нм до 272 Э для пленки 40 нм. Аналогично, эффективная магнитная анизотропия *Keff* увеличилась с 2.5×10^3 Дж/м³ до 8.0×10^3 Дж/м³ при уменьшении толщины с 100 нм до 40 нм [5].

Исследования отклика доменной структуры на внешнее магнитное поле качественно подтвердили эти количественные данные. В тонких пленках (40–50 нм) с высокими значениями *Hc* и *Keff* процесс перемагничивания был затруднен и носил неоднородный, инкрементальный характер. Под действием поля происходило фрагментирование существующих доменов и образование сложных метастабильных структур лабиринтного типа без достижения полного магнитного насыщения. Такое поведение указывает на сильный пиннинг (закрепление) доменных стенок на многочисленных дефектах, границах между островками и неоднородностях рельефа, что требует значительной энергии для их смещения. В противоположность этому, в более толстых пленках (75–100 нм) перемагничивание происходило более взаимосвязано и обратимо, через согласованное смещение крупных доменных границ, что в конечном итоге приводило к однородному намагниченному состоянию при меньших величинах приложенного поля (рис. 2*а*,*б*).

Таким образом, магнитные свойства никелевых нанопленок на GaAs определяются не только объемными, но и интерфейсными эффектами. Повышенная магнитная жесткость тонких пленок является прямым следствием их специфической морфологии, формирующейся в рамках островкового механизма роста. Шероховатость поверхности и границы между островками создают эффективные центры рассогласования, которые стабилизируют доменную структуру и повышают энергетический барьер для перемагничивания [3; 5].

Выводы.

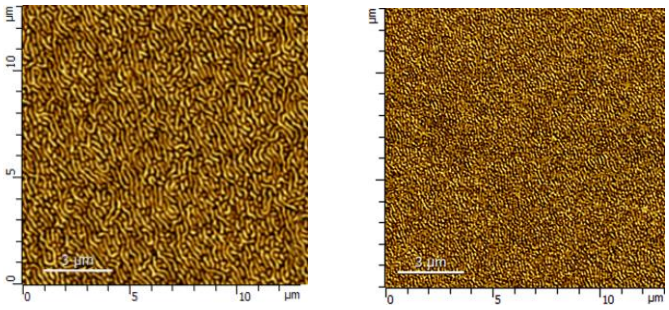
1. Магнетронное осаждение позволяет получать никелевые нанопленки на GaAs с линейной кинетикой роста и контролируемой толщиной.

2. Нанесение никеля снижает общую шероховатость структуры, при этом минимальные значения достигаются для пленок толщиной 40 нм. Полученные значения фрактальной размерности подтверждают островковый механизм роста.

3. С уменьшением толщины пленки в диапазоне 100–40 нм коэрцитивная сила возрастает более чем в три раза (с 83 Э до 272 Э), а эффективная магнитная анизотропия увеличивается с $2.5 \cdot 10^3$ до $8.0 \cdot 10^3$ Дж/м³.

4. Исследование динамики доменной структуры во внешнем поле показало, что нанопленки перемагничиваются через образование сложных метастабильных структур из-за сильного пиннинга стенок, в то время как в более толстых пленках процесс носит более кооперативный характер. Это качественное различие подтверждает определяющую роль морфологии поверхности в формировании магнитной жесткости нанопленок.

Полученные результаты важны для направленного синтеза магнитных нанопленок с заданными порогами перемагничивания, что является ключевым требованием при разработке элементов магнитоэлектроники.



а *б*

Рисунок 2 – Изображения МСМ доменной структуры плёнок Ni/GaAs после воздействия внешнего магнитного поля ~260 мТл 100 нм (а), 40 нм (б)

Список литературы

1. Guo, L. Emerging Spintronic Materials and Functionalities / L. Guo, S. Hu, X. Gu, R. Zhang, K. Wang, W. Yan, X. Sun // Advanced Materials. – 2023. – Vol. 36, 22. – P. 2301854. – https://doi.org/10.1002/adma.202301854.

2. Azovtsev, A. A. Acoustically excited magnetic dynamics and spin flow in spin-valve structures / A. A. Azovtsev, N. A. Pertsev // Physical Review Applied. – 2022. – Vol. 17, 3. – P. 034070. https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.17.034070.

3. Sarkar, S. Magnetic properties and I-V characteristics of DC magnetron sputtered [Co (0.2 nm)/Ni (0.4 nm)]10 thin films / S. Sarkar, R. Hussain, D. Rajbanshi, S. K. Srivastava // MetalMat. – 2024. – Vol. 1, 2. – P. e29. https://doi.org/10.1002/metm.29.

4. Кузьменко, А. П. Структурные и морфологические особенности магнетронных пленок теллурида висмута *n*-типа проводимости ВЧ МР / А. П. Кузьменко, А. И. Колпаков, К. А. Матарыкин, В. В. Родионов, О. Н. Иванов, М. Н. Япрынцев // Известия Юго-Западного государственного университета. Сер.: Техника и технологии. – 2025. – Т. 15, № 2. – С. 113–131. – https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-113-131.

5. Çölmekçi, S. Magnetic properties affected by structural properties of sputtered Ni/Cu multilayer films with different thicknesses of Ni layers / S. Çölmekçi, A. Karpuz and H. Köçkar // Korean journal of chemical engineering. – 2022. – Vol. 39. – P. 1946–1951. – https://doi.org/10.1007/s11814-021-0998-7.

6. Джумалиев, А. С. Влияние полярности напряжения смещения подложки на текстуру, микроструктуру и магнитные свойства пленок Ni, получаемых магнетронным распылением / А. С. Джумалиев, Ю. В. Никулин, Ю. А. Филимонов // Физика твердого тела. – 2016. – Т. 58, № 6. – С. 1206–1215.

Using the magnetron sputtering method, Ni nanofilms with a thickness of 40–100 nm were synthesized on GaAs. It was found that with decreasing thickness, the coercive force and effective magnetic anisotropy increase, which is due to the pinning of domain walls on morphological inhomogeneities due to the island growth mechanism. These results are important for the development of magnetoelectronic devices with controlled properties.

Родионова Анастасия Алексеевна, аспирант, Елецкий государственный университет имени И. А. Бунина, Елец, Российская Федерация, nastya97zhidkova@yandex.ru.

Колпаков Артем Игоревич, аспирант, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация, artem.kolpakov.96@mail.ru

Сапрыкин Иван Сергеевич, студент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики Юго-Западного государственного университета, Курск, Российская Федерация, ivan.saprykin.04@mail.ru.

Паньков Александр Дмитриевич, студент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западного государственного университета, Курск, Российская Федерация, alekxpank26041986@gmail.com.

Научный руководитель – *Филиппов Владимир Владимирович*, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и биомедицинской техники Липецкого государственного технического университета, профессор кафедры математики и физики Липецкого государственного педагогического университета имени П. П. Семенова-Тян-Шанского, Липецк, Российская Федерация, wwfilippow@mail.ru.

УДК 669.277

А. А. РОТКОВИЧ, А. А. БОНДАРУК, И. В. РЯЗАНОВ,
С. А. ГЕРМАН, А. В. ТРУХАНОВ, Д. И. ТИШКЕВИЧ

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Проведено сравнение микроструктуры и молекулярной структуры композитов на основе полиэтилена и компаунда с вольфрамом. Анализ микроструктуры показал, что в системе полиэтилен-W однородное распределение частиц достигается только при высоком содержании W, в то время как в системе герметик-W оно наблюдается почти во всех образцах. ИК-спектроскопия выявила изменения в молекулярной структуре полиэтилена при введении W.

Введение. Гамма-излучение обладает высокой проникающей способностью, что требует создания эффективных средств защиты [1]. Перспективным направлением является разработка композитов на основе вольфрама, диспергированного в полимерные матрицы [2]. Такие материалы сочетают радиационную стойкость тяжелого металла с гибкостью и технологичностью полимеров. Наиболее важными для защитных характеристик являются микроструктура композита и взаимодействие наполнителя с матрицей [3]. В данном исследовании проводится сравнительный анализ структуры материалов на основе линейного полиэтилена низкой плотности (LLDPE) и компаунда.

Материалы и методы. Для получения композиционных материалов использовались две системы. Образцы на основе компаунда HYSOL EO7021 и порошка вольфрама были синтезированы методом термического отверждения. Смесь компонентов с содержанием порошка W от 0 % до 80 % дегазировали и отверждали в форме при 150 °C. Образцы на основе линейного полиэтилена низкой плотности и вольфрама изготавливали методом термопрессования. Порошки с содержанием W от 0 % до 70 % перемешивали с этанолом в шаровой мельнице, сушили и формовали под давлением 1-3 МПа при температуре 200-220 °C. Все готовые образцы имели толщину около 1 мм. Для анализа микроструктуры применяли сканирующий электронный микроскоп Carl Zeiss EVO10. Молекулярную структуру полимерных матриц исследовали методом ИК-Фурье спектроскопии на спектрометре Spectrum Two (Perkin Elmer).

Результаты и обсуждения. На рисунке 1 отображены СЭМ-снимки поверхности композиционных материалов системы полиэтилен-W и компаунд-W.

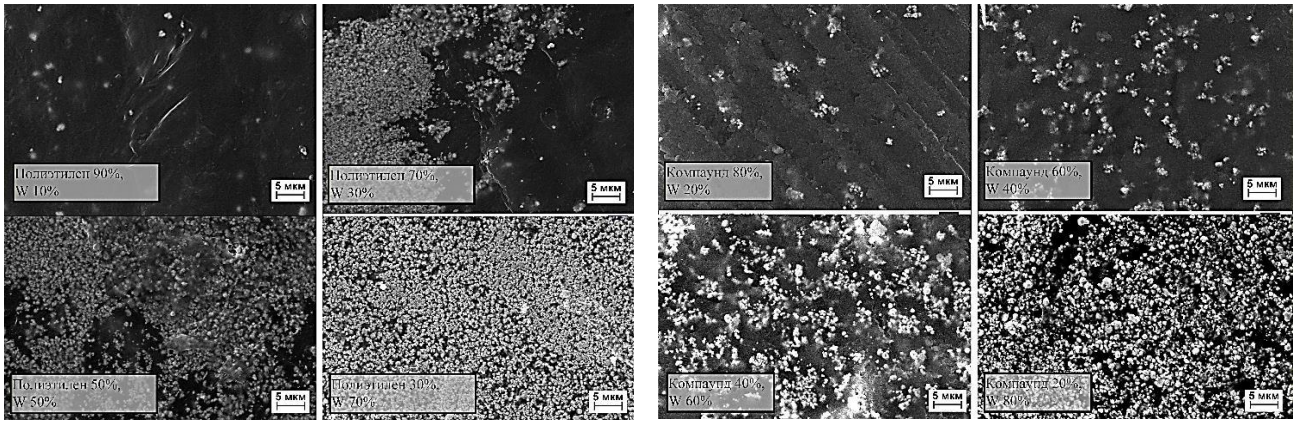


Рисунок 1 – Морфология поверхности образцов композиционных материалов системы полиэтилен-W и компаунд-W

Анализ микроструктуры выявил принципиальные различия в распределении частиц вольфрама в двух типах полимерных матриц. В системе полиэтилен-W для образцов с низким содержанием наполнителя (10 % и 30 %) наблюдается неоднородное, кластерное распределение. Частицы W формируют локальные агломераты, разделенные областями чистой полимерной матрицы, что указывает на сложности диспергирования на этапе смешивания. Однако по мере увеличения массовой доли вольфрама до 70 % достигается практически гомогенная микроструктура с равномерной, плотной упаковкой частиц в полимерном связующем.

В системе компаунд-W также наблюдается тенденция к агломерации частиц, которая усиливается с ростом концентрации наполнителя (до 20 % и 40 %). При этом, в отличие от полиэтиленовой матрицы, основная масса частиц вольфрама, исключая крупные агломераты, демонстрирует хорошую и равномерную дисперсность по всему объему матрицы. Это позволяет предположить, что текучесть и смачивающая способность жидкого компаунда на этапе формования способствуют более эффективному начальному распределению частиц.

Соответственно, можно сделать вывод, что оптимальная и наиболее однородная микроструктура среди всех исследованных образцов была достигнута в композите с компаундовой матрицей и содержанием W 70 %.

Результаты анализа молекулярной структуры композиционных материалов системы полиэтилен-W методом ИК-спектроскопии представлены на рисунке 2.

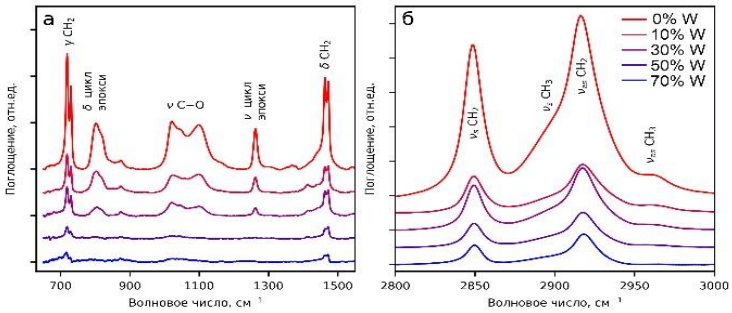


Рисунок 2 – ИК спектры НПВО композиционных материалов системы полиэтилен-W после фазовой коррекции и вычитания базовой линии: (а) в области «отпечатков пальцев», (б) в области валентных колебаний С–Н

В спектре образца чистого полиэтилена присутствуют полосы поглощения симметричных (υ_s) и антисимметричных (υ_{as}) валентных колебаний CH_2 и CH_3 в области 2800–3000 $см^{-1}$ (рис. 2, б). В так называемой «области отпечатков пальцев» (волновое число <1500 $см^{-1}$) присутствуют деформационные (δ и γ) колебания CH_2 в районе 1465 и 725 $см^{-1}$ соответственно (рис. 2, а). Присутствуют также и полосы поглощения, свидетельствующие о протекании процессов окисления в полимерной матрице. Так, широкая многокомпонентная полоса в области 1000–1200 $см^{-1}$ может отвечать валентным колебаниям С–О, а полосы в районе 1260 и 800 $см^{-1}$ – валентным и деформационным колебаниям СОС цикла в эпоксисоединениях. С увеличением содержания вольфрама интенсивность описанных полос поглощения полиэтиленовой матрицы снижается. Разложение спектров в области 2800–3000 $см^{-1}$, характерной для валентных колебаний CH_2 и CH_3, на составляющие по Лоренцу позволяет оценить изменение содержания концевых метильных групп в полиэтиленовой матрице. Так, отношение суммы интегральных интенсивностей полос CH_3 (симметричные и антисимметричные валентные колебания) к сумме интегральных интенсивностей аналогичных полос CH_2 с увеличением содержания в композите вольфрама растет. Увеличение содержания концевых метильных групп может свидетельствовать об уменьшение молекулярной массы полиэтилена. Таким образом, анализ ИК спектров показал, что с увеличением концентрации вольфрама в полиэтиленовой матрице растет содержание концевых метильных групп, что соответствует снижению молекулярной массы полиэтилена, а также падает степень его кристалличности.

На рисунке 3*а* представлены исходные ИК Фурье-спектры НПВО для композиционных образцов на основе системы компаунд-W, которая включает в себя бисфенол F с эпихлоргидрином (ЭХГ) и триэтилендиамином (ТЭДА или 1,4-диазабицикло [2.2.2] октан) в качестве катализатора, отвержднные термическим способом.

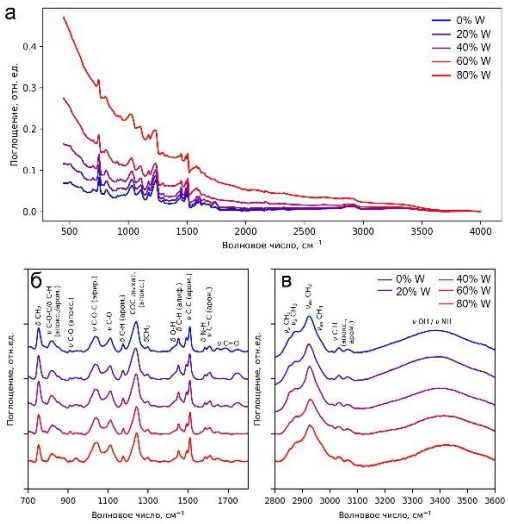


Рисунок 3 – Исходные ИК Фурье-спектры композиционных материалов на основе системы компаунд-W с термическим отверждением (а), ИК Фурье-спектры в спектральных диапазонах 700–1700 (б) и 2800–3600 $см^{-1}$ (в) образцов на основе бисфенола F с ЭХГ и ТЭДА с термическим отверждением

На рисунке 3*б,в* представлены спектры образцов после коррекции и вычитания базовой линии в наиболее информативных спектральных диапазонах 700–1800 и 2800–3600 $см^{-1}$. Интенсивность основных полос поглощения изменяется несущественно с увеличением концентрации вольфрама в композите. Одним из возможных объяснений может быть лучшее смачивание частиц вольфрама полимерной матрицей в случае данной серии образцов с термическим отверждением. Для термоотвержденных образцов характерно наличие полос поглощения в спектральном диапазоне 1650–1780 $см^{-1}$, отвечающих колебаниям различных типов карбонильных групп C=O. Это свидетельствует о большем влиянии процессов окисления на химическую структуру данной серии образцов. Также, интенсивная полоса поглощения с максимумом около 1115 $см^{-1}$ уже не может быть отнесена к валентным колебаниям C–N. При использовании аминов в качестве отвердителя химическая сшивка идет именно через амино группы. С другой стороны, данная полоса поглощения может быть также отнесена к валентным колебаниям C–O. В сочетании с широкой полосой поглощения около 1430 $см^{-1}$ мы интерпретируем описанные изменения ИК спектров как свидетельства окисления полимерной матрицы композита при термическом окислении. Также для термоотвержденных образцов характерно более высокая интенсивность полос поглощения, отвечающих различным типам деформационных колебаний C–H алифатических фрагментов (около 772, 1460 $см^{-1}$) при снижении интенсивности полос поглощения колебаний C–H ароматических кольцах (около 1182 $см^{-1}$). При этом соотношение интенсивности полос поглощения валентных колебаний C–H в ароматических кольцах и алифатических фрагментах (за исключением терминальных $–CH_3$ групп, обсужденных выше) изменяется несущественно. Подобные отличия подтверждают существенное отличие надмолекулярной структуры полимерной матрицы компаунда.

Заключение. Проведенный сравнительный анализ показал, что матрица на основе компаунда обеспечивает более однородное распределение частиц вольфрама по всему объему композита по сравнению с полиэтиленовой матрицей, где гомогенная микроструктура достигается только при высокой концентрации наполнителя. Спектроскопические исследования выявили значительное изменение молекулярной структуры полиэтилена при введении W, в то время как структура компаунда остается более стабильной. Результаты указывают на перспективность использования компаунда в качестве матрицы для создания эффективных радиационно-защитных материалов с контролируемой микроструктурой.

Список литературы

1. Low cost radiation shielding material for low energy radiation applications: Epoxy/Yahyali Stone composites / N. Şahin [et al.] // Pro-gress in Nuclear Energy. – 2021. – Vol. 135. – P. 103703.

2. Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A review / N. J. AbuAlRoos [et al.] // Radiation Physics and Chemistry. – 2019. – Vol. 165. – P. 108439.

3. Banerjee, P. Lightweight Epoxy-Based Composites for EMI Shielding Applications / P. Banerjee [et al.] // Journal of Electronic Materials. – 2019. – Vol. 49. – P. 1702–1720.

A comparison of the microstructure and molecular structure of composites based on polyethylene and a compound with tungsten was conducted. Microstructure analysis showed that in the polyethylene-W system, homogeneous particle distribution is achieved only at high W content, whereas in the compound-W system it is observed in almost all samples. FTIR spectroscopy revealed changes in the molecular structure of polyethylene upon the introduction of W.

Роткович Анастасия Александровна, аспирант 3 курса, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь,, rottkovich@gmail.com.

Бондарук Анастасия Александровна, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, bondaruk625@gmail.com.

Рязанов Игорь Владимирович, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, razanau@physics.by.

Герман Степан Алексеевич, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, stepangrmn@gmail.com.

Труханов Алексей Валентинович, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, truhanov86@mail.ru.

Тишкевич Дарья Ивановна, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, dashachushkova@gmail.com.

Научный руководитель – *Тишкевич Дарья Ивановна*, кандидат физико-математических наук, доцент, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, dashachushkova@gmail.com.

УДК 621.793

Ф. Д. РЮМШИН, Х. В. КАРПУК

СОСТАВ, СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ZrSiN, ОБЛУЧЁННЫХ ИОНАМИ КСЕНОНА

Нанокомпозитные покрытия ZrSiN, сформированные методом магнетронного реактивного распыления, облучены ионами Xe с энергией 360 кэВ и дозами 1×10^{16} до 5×10^{16} см$^{-2}$ при комнатной температуре и 800 °С. Обнаружено, увеличение максимальной концентрации ксенона от 8 до 17 ат.% и рост глубины проективного ионного пробега от 70 до 85 нм при увеличении дозы ксенона. Высокотемпературное облучение приводит к увеличению проективного пробега ионов до 200 нм. Нанокомпозиционные ZrSiN покрытия обладают высокой радиационной стойкостью фазового состава. Твердость нанокомпозитных покрытий ZrSiN монотонно убывает с ростом концентрации кремния. Максимум твердости выявлен при концентрации кремния 3,2 ат.% и составляет 23,7 ГПа. Облучение нанокомпозитных ZrSiN покрытий ионами Xe с энергией 360 кэВ и дозой 1×10^{16} см$^{-2}$ с не приводит к значительным изменениям твердости покрытий. Обнаружено уменьшение твердости на 15-20 % при дозе облучения ионами ксенона равной 5×10^{16} см$^{-2}$, что связано с аккумулированием Xe в покрытии и росте радиационных дефектов кристаллической решетки.

Развитие ядерных реакторов нового поколения требует создания материалов и покрытий с высокой радиационной стойкостью [1]. Нанокомпозитные покрытия перспективны для исследования в качестве радиационно стойких материалов из-за того, что межфазные границы могут влиять на удаление радиационно-индуцированных дефектов, действуя как устойчивые стоки дефектов [2].

Перспективным является формирование нанокомпозитов на основе нитридов переходных металлов, представляющих собой фазово-разделенные [3] покрытия, например, TiSiN и ZrSiN. Нанокомпозитный материал, состоящий из нанокристаллических (нк) зерен TiN (размер зерен < 10 нм), окруженных тонким слоем (порядка одного монослоя) аморфного a-SiNx, демонстрирует твердость превосходящую 40 ГПа. Концентрация Si является важным фактором, влияющим на структуру и механические свойства покрытий, а также трибологические свойства [4]. В общем, с ростом концентрации Si в покрытии TiSiN до 7–12 % ат. размер зерен TiN уменьшается до нескольких нанометров и внутренние напряжения, твердость, модуль Юнга растут практически до максимума. Последующее увеличение содержания Si в покрытии приводит к уменьшению внутренних напряжений, твердости и модуля Юнга. В этой связи особую важность приобретают исследования механических свойств нанокомпозитных покрытий Zr-Si-N, облученных низкоэнергетическими ионами ксенона.

Покрытия ZrSiN осаждались на монокристаллическую подложку Si (001) методом реактивного несбалансированного магнетронного распыления [5]. Осаждение проводилось при температуре подложки 600 ℃ и давлении в вакуумной камере не выше, чем 10^{-5} Па. Мишени Zr (99.2 % чистоты) и Si (99.999 % чистоты) совместно распылялись смешанной плазмой $Ar+N_2$. Для получения нанокомпозитных покрытий ZrSiN с различной микроструктурой варьировалась мощность на подложке Si от 40 до 150 Вт при постоянной мощности 300 Вт на подложке Zr. Держатель подложек вращался со скоростью 15 об./мин. для обеспечения однородности толщины и состава во время осаждения. Толщина покрытий составила ~300 нм. Для сравнения были формированы мононитридные покрытия ZrN.

Облучение образцов ионами Xe^{2+} с энергией ионов 360 кэВ и интегральными дозами 1×10^{16} см$^{-2}$ и 5×10^{16} см$^{-2}$ при комнатной температуре и дозой 1×10^{16} см$^{-2}$ при 800 °С. Энергетические параметры облучения были выбраны таким образом, чтобы глубина распределения имплантированных примесей Xe, рассчитанная по программе SRIM, не превышала толщины покрытия.

Распределение имплантированного ксенона в покрытиях ZrSiN исследовался методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР). Использован пучок ионов гелия с энергией 1,4 МэВ. Обратно рассеянные ионы регистрировались полупроводниковым поверхностно-барьерным детектором с энергетическим разрешением 12 кэВ. Расчет распределения элементов по глубине проводился с помощью программы SIMNRA.

Фазовый состав покрытий ZrSiN изучалась методом рентгеновской дифракции на рентгеновском дифрактометре Ultima IV с CuK_α излучением (0,15418 нм) в режиме параллельного пучка с использованием приставки для тонких пленок.

Измерения твердости при наноиндентировании проводились на нанотвердомере Nano Indenter II фирмы MTS Systems, США оснащенном алмазным индентором, заточенным в форме трехгранной пирамиды (индентор Берковича) с радиусом закругления 220 нм. Максимальная нагрузка составляла 5 мН. Значения твердости рассчитывались исходя из методики Оливера и Фара. Относительная погрешность измерения твердости не превышала 3 %.

Методом РОР исследовался состав и пространственное распределение элементов в нанокомпозитных покрытия ZrSiN. На рисунке 1 представлены типичные РОР спектры покрытия ZrSiN (C_{Si}= 3,2 ат.%). Как видно из рисунка 1 в исходном покрытии присутствуют Zr, Si и N. В облученном ионами ксенона покрытии присутствует Xe и его содержание возрастает с увеличением дозы облучения. Высокотемпературное облучение ионами ксенона при 800°С не приводит к росту концентрации имплантированного ксенона.

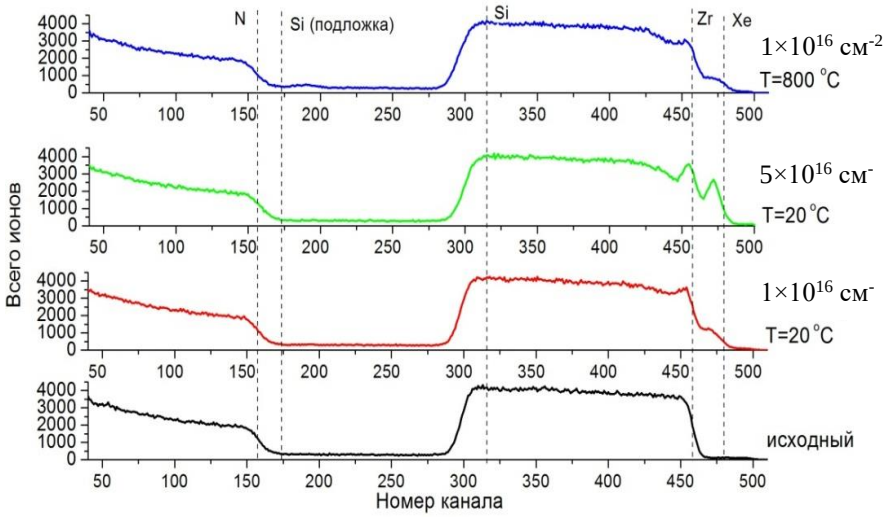


Рисунок 1 – РОР спектры исходного и облученного ионами Xe нанокомпозитного покрытия ZrSiN (C_{Si} = 3,2 ат.%)

Полученные спектры были обработаны с помощью программы SIMNRA, что позволило построить концентрационные профили распределения ксенона в нанокомпозитных покрытиях ZrSiN. Согласно этим данным при повышении дозы ксенона от 1×10^{16} см$^{-2}$ до 5×10^{16} см$^{-2}$ происходит увеличение максимальной концентрации ксенона от 8 до 17 ат.% доли, достигаемых на глубинах 70 и 85 нм, соответственно.

При имплантации ионов Xe при высокой температуре (800 °C) максимальная его концентрация достигается на глубине около 200 нм, что сопровождается размытием концентрационного профиля, как видно из рисунка 2. По-видимому, отмеченные изменения концентрационного профиля ксенона связаны с активизацией диффузионных процессов, а также изменением энергий связи и смещения атомов решетки мишени при повышении температуры.

Методом рентгеновской дифрактометрии был исследован фазовый состав нанокомпозитных ZrSiN покрытий, сформированных методом магнетронного распыления, и облученных ионами Xe^{2+} (360 кэВ) и дозами до 5×10^{16} см$^{-2}$. Обнаружено, что облучение ионами Xe не приводит к изменению фазового состава покрытия ZrN. При малой дозе облучения 1×10^{16} см$^{-2}$ параметр решетки ZrN растет, что связано с накоплением радиационных дефектов, а затем с ростом дозы уменьшается, что обусловлено радиационным отжигом. Для рентгеноаморфного покрытия Si_3N_4 облучение не приводит к изменению его структуры. По-видимому, формирующихся при облучении радиационных дефектов недостаточно для образования критических зародышей будущих кристаллических фаз.

Обнаружено, что в нанокомпозитных покрытиях ZrSiN облучение ионами Xe не приводит к изменению структуры покрытий. При этом параметр решетки ZrN не меняется при облучении ионами Xe. При малой концентрации Si (3,2 ат.%) при облучении интенсивность дифракционного пика (111) уменьшается, а пика (200) растет. Подобные эффекты наблюдается и для остальных концентраций Si. При этом стоит отметить рост интенсивности дифракционного пика (200) с увеличением дозы облучения. При концентрации Si равной 22,1 ат.% формируется рентгеноаморфное покрытие ZrSiN. Обнаружено, что облучение ионами Xe с дозой 1×10^{16} см$^{-2}$ приводит к кристаллизации фазы ZrN в рентгеноаморфном покрытии. С увеличением дозы облучения интенсивность дифракционных пиков ZrN растет, что свидетельствует об увеличении доли кристаллической фазы ZrN или изменении размера зерен и/или микронапряжений в зерне. Таким образом, облучение ионами Xe не приводит к изменению структуры нанокомпозиционных покрытий.

Методом наноиндентирования исследовалась твердость нанокомпозитных покрытий ZrSiN, облученных ионами Xe (360 кэВ) с дозами 1×10^{16} см$^{-2}$ и 5×10^{16} см$^{-2}$.

На рисунке 2 представлена зависимость твердости, полученной при наноиндентировании покрытий ZrSiN, от концентрации Si в исходных и облученных ионами Xe покрытиях. Анализ полученных результатов, свидетельствует, что облучение ионами Xe с дозой 1×10^{16} см$^{-2}$ не приводит к значительному изменению твердости покрытий. Обнаружено, что твердость покрытий уменьшается на 5 %, как видно из рисунка 2. При этом твердость покрытия ZrN возрастает, что обусловлено формированием радиационных дефектов (радиационное упрочнение). Для покрытий с концентрацией Si менее 20 ат.% уменьшается, что связано с разрушением нанокомпозитной структуры, а также имплантацией ионов Xe в покрытие. При концентрации Si более 20 ат.% твердость незначительно возрастает, а для аморфного покрытия (концентрация Si более 25 ат. %) уменьшается. Незначительное увеличение твердости, по-видимому, связано с частичной кристаллизацией аморфного покрытия.

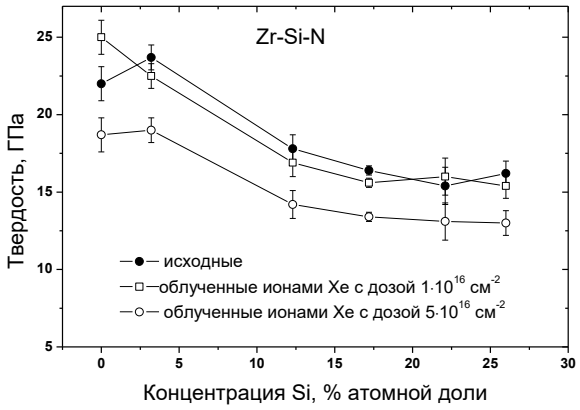


Рисунок 2 – Зависимость твёрдости нанокомпозитных покрытий ZrSiN с различной концентрацией Si для исходных и облучённых ионами Xe^{2+} с энергией 360 кэВ и дозами 1×10^{16} см$^{-2}$ и 5×10^{16} см$^{-2}$

Облучение ионами Xe с дозой 5×10^{16} см$^{-2}$ приводит к значительному (15–20 %) снижению твердости нанокомпозитных покрытий, как видно из рисунка 2. Это происходит, главным образом, из-за аккумуляции ионов Xe в покрытии. В результате облучения в покрытии на глубине максимального пробега ионов формируются пузыри ксенона, которые и приводят к уменьшению твердости покрытий.

В результате облучения ионами ксенона нанокомпозитных покрытий ZrSiN обнаружено, увеличение максимальной концентрации ксенона от 8 до 17 ат.% и рост глубины проективного ионного пробега от 70 до 85 нм при увеличении дозы ксенона от 1×10^{16} до 5×10^{16} см$^{-2}$. Высокотемпературное облучение приводит к увеличению проективного пробега ионов до 200 нм.

Обнаружено, что твердость нанокомпозитных покрытий ZrSiN монотонно убывает с ростом концентрации кремния. Максимум твердости выявлен при концентрации кремния 3,2 ат.% и составляет 23,7 ГПа. Облучение нанокомпозитных ZrSiN покрытий ионами Xe с дозой 1×10^{16} см$^{-2}$ не приводит к значительным изменениям твердости покрытий (твердость уменьшается на 5 %). Обнаружено уменьшение твердости на 15-20 % при дозе облучения ионами ксенона равной 5×10^{16} см$^{-2}$. Уменьшение твердости может быть объяснено аккумулированием Xe в покрытии и росте радиационных дефектов кристаллической решетки.

Список литературы

1. Uglov, V. V. Ion-induced changes in the structure and phase composition of nanocrystalline TiZrSiN coatings formed via magnetron sputtering / V. V. Uglov, G. Abadias, S. V. Zlotski, A. Michel, I. A. Saladukhin, S. S. Leshkevich, P. I. Gaiduk & V. Jasulaitene // J. Surf. Inv. X-ray, Synch. Neutr. Tech. – 2015. –Vol. 9, is. 5. – P. 995–1004.

2. Zheng, Sh. High-strength and thermally stable bulk nanolayered composites due to twin-induced interfaces / Sh. Zheng, I. J. Beyerlein, J. S. Carpenter, K. Kang, J. Wang, W. Han & N.A. Mara // Nat. Commun. – 2013. – Vol. 4. – P. 1696.

3. Zhang, R. F. Phase stabilities of self-organized nc-TiN/a-Si_3N_4 nanocomposites and of $Ti_{1-x}Si_xN_y$ solid solutions studied by ab initio calculation and thermodynamic modeling / R. F. Zhang, S. Veprek // Thin Solid Films. – 2008. – Vol. 516. – P. 2264–2275.

4. Veprek, S. The formation and role of interfaces in superhard nc-Me_nN/a-Si_3N_4 nanocomposites / S. Veprek, M. G. J. Veprek-Heijman // Surf. Coat. Technol. – 2007. – Vol. 201. – P. 6064–6070.

5. Saladukhin, I. A. Thermal stability and oxidation resistance of ZrSiN nanocomposite and ZrN/SiN_x multilayered coatings: A comparative study / I. A. Saladukhin, G. Abadias, V. V. Uglov, S. V. Zlotski, A. Michel, A. Janse van Vuuren // Surf. Coat. Technol. – 2017. –Vol. 332. – P.428–439.

ZrSiN nanocomposite coatings formed by magnetron reactive sputtering were irradiated with 360 keV Xe ions at doses of 1×10^{16} to 5×10^{16} cm^{-2} at room temperature and 800°C. An increase in the maximum xenon concentration from 8 to 17 at.% and an increase in the projective ion range from 70 to 85 nm were observed with increasing xenon dose. High-temperature irradiation leads to an increase in the projective ion range to 200 nm. ZrSiN nanocomposite coatings exhibit high radiation resistance of their phase composition. The hardness of ZrSiN nanocomposite coatings decreases monotonically with increasing silicon concentration. The maximum hardness was observed at a silicon concentration of 3.2 at.% and is 23.7 GPa. Irradiation of ZrSiN nanocomposite coatings with Xe ions at 360 keV and a dose of 1×10^{16} cm^{-2} s did not significantly alter the coating hardness. A 15-20% decrease in hardness was observed with a xenon ion dose of 5×10^{16} cm^{-2}, which is due to the accumulation of Xe in the coating and the growth of radiation-induced defects in the crystal lattice.

Рюмшин Фёдор Денисович, учащийся УО «Национальный детский технопарк», Минск, Республика Беларусь.

Карпук Христина Вадимовна, УО «Национальный детский технопарк», Минск, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Злоцкий Сергей Владимирович*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИЛ физики ионно-плазменной модификации твердых тел кафедры физики твердого тела и нанатехнологий Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, sergey_zl@mail.ru.

УДК 535.33, 533.9, 543.423.1

А. Д. САМЕЦ

ЛАЗЕРНЫЙ ЭКСПРЕСС-МИКРОАНАЛИЗ ТАБЛЕТИРОВАННЫХ И ЖИДКИХ КОМПЛЕКСОВ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ, СОДЕРЖАЩИХ МАГНИЙ

Исследована возможность применения метода лазерной искровой спектроскопии (LIBS) для экспресс-анализа содержания магния в коммерческих препаратах – твердых таблетированных формах и жидких микроэлементных комплексах. Разработана методика пробоподготовки жидких проб путем их перевода в твердое состояние на фильтровальной бумаге. Проведена оптимизация условий возбуждения плазмы в двухимпульсном режиме, определен оптимальный межимпульсный интервал (1–2 мкс). Для жидких образцов выполнена оценка влияния глубины проникновения лазерного излучения на интенсивность аналитического сигнала. Осуществлен качественный и количественный анализ образцов, идентифицированы спектральные линии магния. Показано, что предложенный подход позволяет эффективно анализировать жидкие многокомпонентные среды методом LIBS, минимизируя эффект «плескания» и повышая стабильность измерений.

Экспериментальная установка: для реализации абляции и снятия спектров был использован ЛАЭМС спектрометр (рисунок 1).

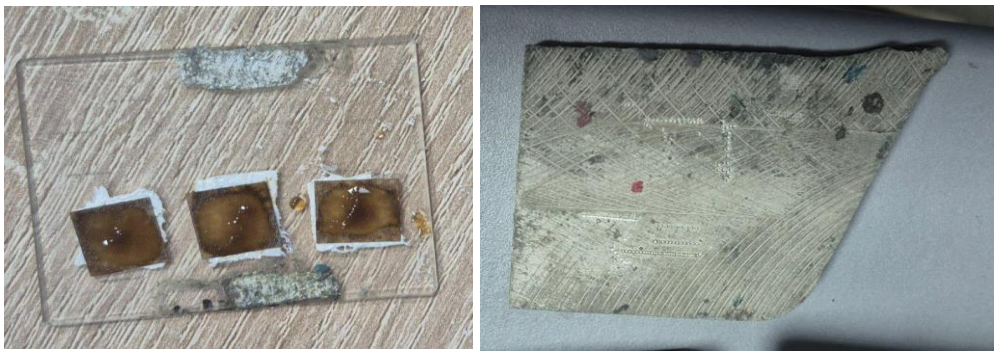
Рисунок 1 – ЛАЭМС спектрометр

Лазерная искровая спектроскопия является передовым методом элементного анализа, отличающимся простотой и скоростью проведения измерений, минимальной пробоподготовкой и возможностью анализа различных типов материалов (твердых, жидких, порошкообразных). Эти качества делают LIBS привлекательным инструментом для фармацевтического анализа и контроля качества биологически активных добавок и удобрений, где требуется быстрая идентификация элементного состава и проверка соответствия заявленным характеристикам. Прямой анализ жидкостей методом LIBS сопряжён с такими проблемами как «плескание» (что приводит к нестабильности сигнала), низкая чувствительность и быстрое затухание плазмы. Для преодоления этих трудностей применяют методы трансформации жидких проб в твердое состояние, например, путем абсорбции на фильтровальной бумаге или пористых материалах. Это позволяет анализировать их на тех же условиях, что и твердые образцы.

В основе метода лежит процесс локального испарения вещества с поверхности образца под действием сфокусированного лазерного излучения. Два лазерных пучка, сведённых в пятно малой площади, генерируют импульсы, энергия которых поглощается поверхностью, вызывая её нагрев, испарение и ионизацию. В результате формируется абляционная плазма, содержащая возбужденные атомы и ионы материала. Спектральный состав излучения этой плазмы несёт в себе информацию об элементном составе пробы. Свечение плазмы направляется на диспергирующий элемент (дифракционную решетку спектрографа), где раскладывается в спектр и проецируется на ПЗС-линейку. Полученные оцифрованные данные передаются на компьютер, где визуализируются в виде спектра – графика зависимости интенсивности излучения от длины волны. Каждый химический элемент характеризуется уникальным набором спектральных линий, что позволяет идентифицировать его присутствие в пробе. Более того, анализ интенсивности этих линий даёт возможность проводить не только качественное, но и количественное определение содержания элементов – интенсивность сигнала коррелирует с концентрацией компонента в исследуемом материале. Важной особенностью используемой установки является возможность реализации двух режимов лазерного воздействия – одноимпульсного и двухимпульсного. В одноимпульсном режиме оба затвора открываются синхронно, формируя единый импульс заданной энергии. В двухимпульсном режиме второй затвор открывается с программируемой временной задержкой относительно первого. Межипульсовый интервал задаётся исследователем в зависимости от типа образца и целей эксперимента. Физика процесса в двухимпульсном режиме заключается в следующем: энергия первого импульса расходуется преимущественно на разогрев поверхности, плавление и испарение материала с формированием первичного плазменного облака; энергия второго, задержанного импульса, направлена на дополнительный нагрев (подогрев) существующей плазмы. Такой подход приводит к существенному увеличению интенсивности

спектральных линий, что напрямую повышает чувствительность анализа и позволяет регистрировать малые концентрации с большей достоверностью.

В качестве объектов исследования были выбраны образцы чистого металлического магния, твёрдый таблетированный препарат, а также жидкие микроэлементные комплексы, содержащие магний, представленные в виде коммерческих концентратов. Жидкие образцы являются многокомпонентными смесями, в состав которых помимо магния входят другие микроэлементы, такие как цинк, медь, сера и другие (рис. 2.)



а б

Рисунок 2 – Образцы, подготовленные для лазерного микроанализа:
а) металлический магний; б) жидкий концентрат, нанесённый на фильтровальную бумагу

Для анализа жидких образцов была разработана методика пробоподготовки: небольшой объем жидкости наносился на беззольный фильтр и высушивался при комнатной температуре. В результате получался твердый носитель с равномерно распределенным по его поверхности анализируемым веществом, что позволяет проводить лазерную абляцию в стандартных условиях, применяемых для твердых материалов.

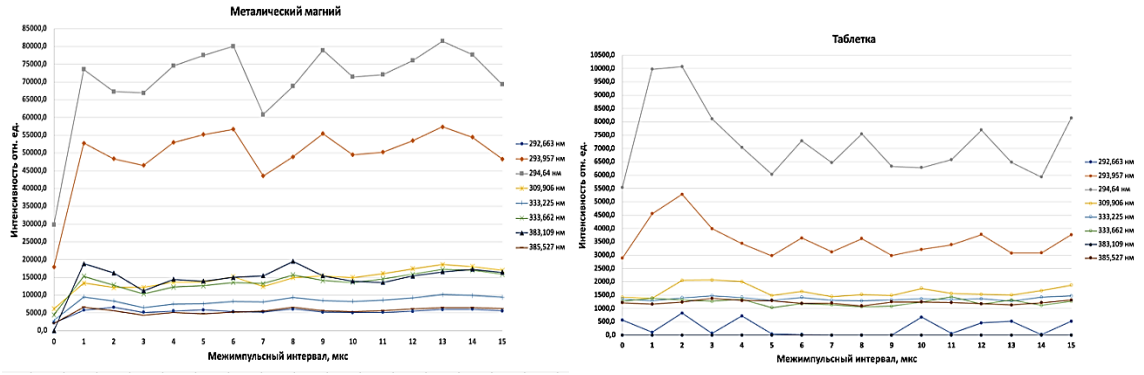
Для определения оптимальных условий возбуждения плазмы и максимизации аналитического сигнала магния в твердых образцах варьировался временной интервал между сдвоенными лазерными импульсами. Исследование чистого металлического магния и таблетированных форм микроэлементного комплекса проводилась при варьировании интервала от 0 до 15 мкс шагом в 1 мкс. Нулевое значение соответствовало одноимпульсному режиму и использовалось в качестве реперной точки. По результатам измерений для чистого магния и таблетированного образца были построены спектры испускания (зависимость интенсивности от длины волны), позволившие идентифицировать аналитические линии магния и оценить динамику интенсивности сигнала в зависимости от задержки между импульсами. (рис.3.)

Один из жидких микроэлементных комплексов имел существенное отличие в методике проб подготовки и проведения измерений. Для перевода пробы в твердое состояние и исключения эффекта «плескания» жидкие концентраты наносились на беззольные фильтры и высушивались. Для обеспечения репрезентативности активности анализа и усреднения возможной неоднородности распределения сухого остатка на фильтре использовалось сканирование поверхности по закону меандра. Лазерный луч последовательно воздействовал на матрицу из 81 точки (9 на 9 точек), что позволило получить интегральный спектр, характеризующий средний состав пробы. Возбуждение плазмы в этом случае проводилось сдвоенными лазерными импульсами с фиксированным межимпульсным интервалом 1 мкс, который был выбран как оптимальный на основе анализа данных, полученных для чистого магния

Ключевой особенностью анализа жидких образцов являлась необходимость контроля глубины проникновения лазерного излучения. Это необходимо для того, чтобы гарантировать, что аналитический сигнал генерируется именно материалом пробы, а не подложкой. Путем незначительной расфокусировки лазерного пучка относительно поверхности образца были заданы три различных значения глубины проникновения излучения в материал: 2, 3 и 4 мкм. Для каждого значения глубины была проведена серия измерений, зарегистрированы соответствующие спектры и оценена интенсивность линий магния. (Таблица 1).

Для идентификации спектральных линий и калибровки всей методики в качестве эталонного образца использовался чистый металлический магний. Полученные от него спектры позволили точно определить положение наиболее чувствительных линии магния, которые в дальнейшем использовались для расшифровки спектров сложных многокомпонентных таблетированных и жидких проб. Анализ динамики интенсивности этих линий показал, что максимальный рост сигнала для чистого магния наблюдается при межимпульсном интервале 1-2 мкс 2, в то время как для таблетированной пробы картина может отличаться из за матричных эффектов.

По результатам измерений для всех типов образцов были построены спектральные зависимости интенсивности от длины волны, а для жидких проб проведён сравнительный анализ влияния глубины проникновения лазера на интенсивность сигнала магния. Полученные данные представлены в таблицах и на рисунках.



а *б*

Рисунок 3 – Влияние временной задержки от 0 до 15 мкс между сдвоенными лазерными импульсами на интенсивность эмиссионных линий магния: а) металлический образец магния; б) таблетированный образец

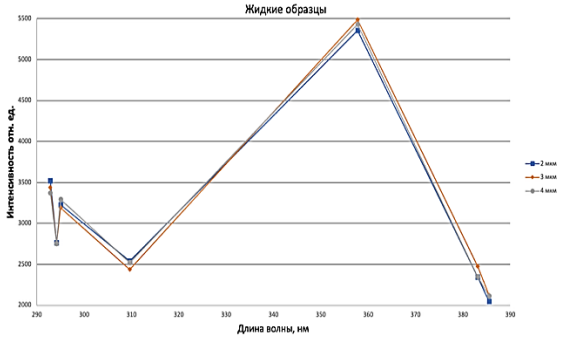
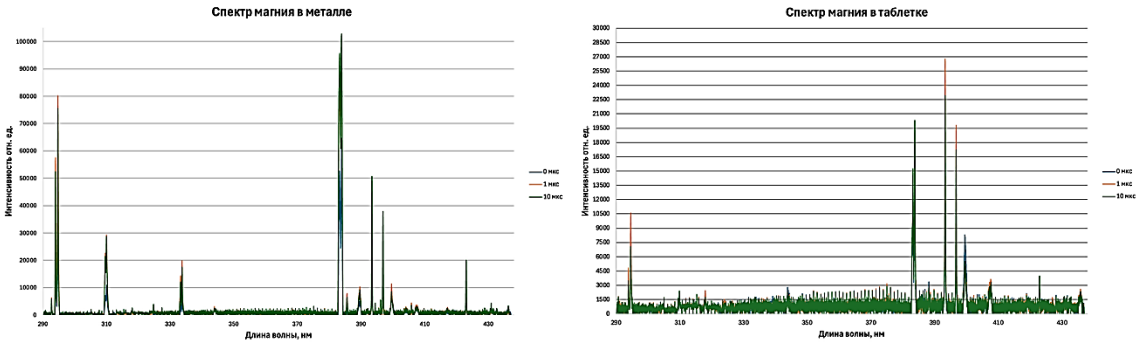


Рисунок 4 – Зависимость интенсивности аналитических линий магния от глубины проникновения лазерного излучения для жидкого микроэлементного комплекса



а *б*

Рисунок 5 – Зависимость интенсивности аналитических линий магния от межимпульсного интервала: а) металлический образец магния; б) таблетированный образец

Таблица 1 – Интенсивность спектральных линий магния в зависимости от глубины проникновения лазерного излучения для жидкого микроэлементного комплекса

Длина волны	Глубина проникновения, мкм		
	Интенсивность, отн. ед.		
292,901	3521,8	3441,3	3376,5
294,196	2764,5	2758,5	2757,0
295,086	3229,3	3191,5	3294,3
309,657	2540,7	2439,7	2523,7
357,796	5357,0	5487,5	5431,5
383,109	2347,5	2478,4	2350,2
385,527	2048,3	2124,8	2115,4

Список литературы

1. Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр с ахроматической оптической системой / Е. С. Воропай, И. М. Гулис, Д. С. Тарасов, К. Ф. Ермалицкая [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2021. – Т. 88, № 3. – С. 486–492.

2. Ермалицкая, К. Ф. Управление плотностью мощности лазерного излучения при двухимпульсной лазерной абляции металлов / К. Ф. Ермалицкая // Приборостроение 2021 : материалы 14-й Междунар. науч.-техн. конф., 17–19 нояб. 2021 г., Минск. – Минск, 2022. – С. 402–403.

3. Воропай, Е. С. Исследование механизмов возбуждения спектральных линий в абляционной плазме с помощью двухимпульсного спектрометра ЛАЭМС / Е. С. Воропай, К. Ф. Ермалицкая, Д. С. Тарасов // Приборостроение 2021 : материалы 14-й Междунар. науч.-техн. конф., 17–19 нояб. 2021 г., Минск. – Минск, 2022. – С. 404–405.

4. Спектральный анализ образцов двухимпульсным лазерным атомно эмиссионным спектрометром с ахроматической оптической системой / Е. С. Воропай [и др.] // Сборник научных трудов VII конгресса физиков Беларуси, Минск, Беларусь, 26–28 апр. 2023 г. – Минск, 2023. – С. 69–70.

5. Воропай, Е. С. Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия биообъектов и пористых тел / Е. С. Воропай, К. Ф. Ермалицкая, Е. Л. Тризнюк // Приборостроение – 2023 : материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф. 15–17 нояб. 2023 г., Минск, Республика Беларусь. – Минск, 2023. – С. 314–315.

The paper investigates the applicability of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) for the rapid analysis of magnesium content in commercial preparations – solid tablet forms and liquid micronutrient complexes. A sample preparation technique for liquid samples was developed by transforming them into a solid state on filter paper. The conditions for plasma excitation in double-pulse mode were optimized, and the optimal interpulse interval (1–2 μs) was determined. For liquid samples, the effect of laser radiation penetration depth on the intensity of the analytical signal was evaluated. Qualitative and quantitative analyses of the samples were performed, and the spectral lines of magnesium were identified. It is shown that the proposed approach makes it possible to effectively analyze liquid multicomponent media using LIBS, minimizing the «splashing» effect and increasing measurement stability.

Самец Анастасия Дмитриевна, студентка 3 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, nastya.samets@gmail.com.

Научный руководитель – *Ермалицкая Ксения Федоровна*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, ermalitskaia@gmail.com.

УДК 544.653.23

Д. А. СИМОНЕНКО, Э. А. БЕРДОВА

ФОРМИРОВАНИЕ АНТИОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ОКСИДА ЦИРКОНИЯ

Представлен метод формирования антиотражающих покрытий на основе наноструктурированного оксида циркония с использованием двухстадийного электрохимического анодирования. В качестве исходных материалов исследованы циркониевая фольга и тонкие пленки циркония, нанесенные методом магнетронного распыления. Процесс анодирования проводился в гальваностатическом режиме в водных растворах хлорида натрия и лимонной кислоты. Установлено, что последовательная смена электролитов позволяет управлять морфологией и составом слоев: от пористого циркония до наноструктурированного оксида циркония. С помощью растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального анализа изучена структура и элементный состав полученных пленок, выявлено встраивание углеродсодержащих анионов в структуру оксида. Экспериментально показано, что разработанная методика позволяет существенно снизить коэффициент отражения в видимом и ближнем ИК-диапазоне (380–1000 нм) до уровня около 1%. Полученные результаты характеризуются высокой воспроизводимостью (дисперсия не более 0,1%). Разработанные покрытия перспективны для применения в интегральной оптике, системах оптических межсоединений и устройствах преобразования световой энергии.

Цирконий, относящийся к группе тугоплавких металлов, сегодня широко применяется в двух ключевых областях: при создании медицинских имплантов [1; 2], а также в производстве компонентов интегральной электроники, включая запоминающие устройства, конденсаторы большой емкости и сенсоры [3–7]. Востребованность циркония и материалов на его основе объясняется его уникальными характеристиками: высокой износостойкостью, химической инертностью, отличными изоляционными свойствами и низкими диэлектрическими потерями в окисленной форме. В данной работе разработан метод формирования антиотражающих покрытий на основе наноструктурированного оксида циркония.

В ходе работы использовались два типа исходных материалов: циркониевая фольга толщиной 30 мкм и тонкие циркониевые пленки, нанесенные методом магнетронного распыления на кремниевые подложки. Толщина осажденных пленок варьировалась в пределах 200–250 нм. Предварительная подготовка образцов включала обезжиривание поверхности с последующей промывкой в дистиллированной воде. Для получения пленок анодного оксида циркония применялась двухэлектродная электрохимическая ячейка. Анодирование проводилось в гальваностатическом режиме при плотности тока от 10 до 20 мА/см^2. В качестве электролитов использо-

вались 1%-е водные растворы: хлорида натрия (для первого анодного процесса) и лимонной кислоты (для второго). Продолжительность процесса анодирования составляла от 10 до 20 минут.

Для исследования морфологии сформированных пленок была использована растровая электронная микроскопия (РЭМ). Для оценки элементного состава пленок использовался рентгеноспектральный анализ. Спектры отражения сформированных пленок снимались на спектрофотометре МС-12 в области длин волн (λ) 380–1000 нм. На рисунке 1 представлено РЭМ изображение типичной пленки, полученной в результате процессов электрохимического анодирования. Из рисунка видна наноструктура пленки.

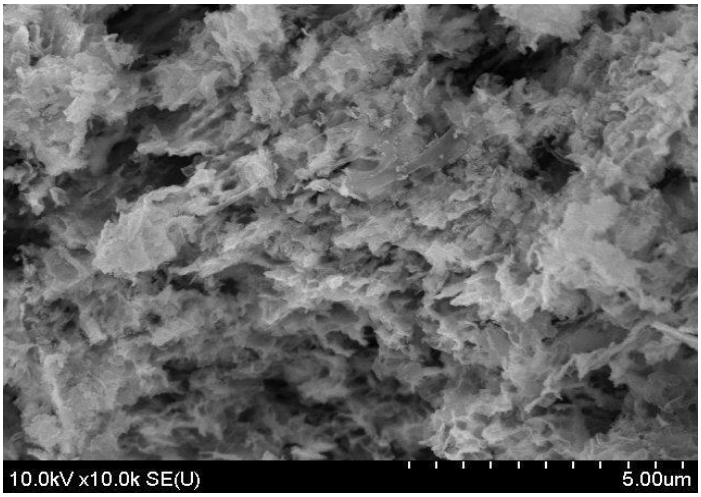
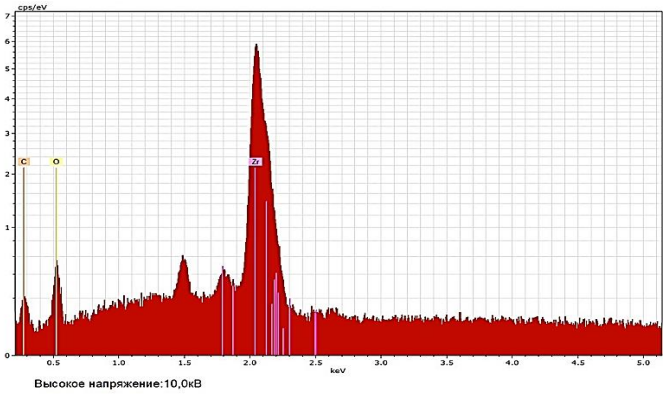


Рисунок 1 – РЭМ изображения поверхности; пористой пленки оксида циркония

В результате проведенных исследований было установлено, что выбор электролита для проведения анодного процесса оказывает влияние на структуру формируемых оксидных пленок. Так, при анодировании циркония в водных растворах хлористого натрия формируется наноструктурированная пористая пленка, состоящая из пористого циркония, а после второго анодирования в водном растворе лимонной образуется пленка наноструктурированная пленка оксида циркония.

На рис. 2 представлены результаты рентгеноспектрального анализа сформированной плени. Как видно на рисунке, сформированная пленка состоит из оксида циркония нестехиометрического состава с примесными атомами углерода. Присутствие углерода объясняется встраиванием углеродсодержащих анионов из электролита во время анодирования в водном растворе лимонной кислоты.



El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [wt.%]
Zr	40	L-series	64,91	81,56	40,62	2,5
O	8	K-series	8,76	11,01	31,27	1,7
C	6	K-series	5,91	7,43	28,11	1,5
		Total:	79,58	100,00	100,00	

Рисунок 2 – Рентгеноспектральный анализ пористой плёнки оксида циркония

На рисунке 3 представлены спектры отражения сформированных пленок после первого и второго процессов анодирования.

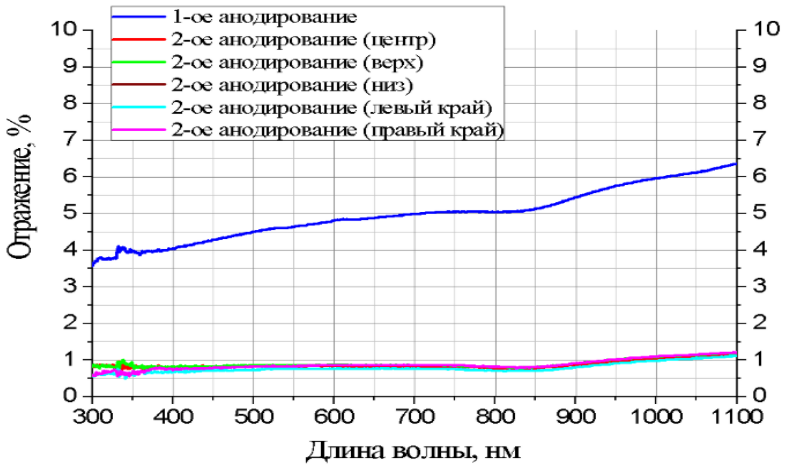


Рисунок 3 – Спектры отражения сформированных плёнок после первого и второго процессов анодирования

Как видно из рисунка 3 спектры отражения исследуемых образцов после первого анодирования находятся в диапазоне от 3 до 5 % для видимого диапазона. После второго анодного процесса отраженный световой сигнал снижается до уровня около 1 %. Измерения отраженного сигнала на финальных образцах проводились в 5 точках: центр и четыре крайний точки. Дисперсия отраженного сигнала не превышала 0,1 %, что свидетельствует о высокой воспроизводимости полученных результатов.

Полученные антиотражающие покрытия могут быть использованы в интегральной оптике для управления световыми потоками. В частности, при изготовлении систем оптических межсоединений [8-10], а также в устройствах, обеспечивающих преобразование световой энергии в другие виды энергии [11-12].

Список литературы

1. Wiedemann, T. G. Clinical Guideline for Zirconia Dental Implants: A Comprehensive and Critical Review and Update / T. G. Wiedemann // Journal of Clinical Medicine Research. – 2024. – Vol. 5(3). – P. 1–7.

2. Багаев, С. И. Биоактивные покрытия на основе оксидов титана и тантала для титановых имплантатов / С. И. Багаев, И. П. Смягликов, С. К. Лазарук, О. В. Купреева // ФТИ НАН Беларуси. – 2021. – Кн. 1. – С. 250–263.

3. Lazarouk, S. K. Nanoporous oxides of refractory metals: fabrication and properties / S. K. Lazarouk, D. A. Sasinovich, V. E. Borisenko // Physica Status Solidi C. – 2008. – Vol. 5 (12). – P. 3690–3693.

4. Lazarouk, S. Anodic nanoporous titania for electro-optical devices / S. Lazarouk, Z. Xie, V. Chigrinov, H. S. Kwok // Japanese Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 46 (7R). – P. 4390–4394.

5. Lazarouk, S. Porous and pillar structures formed by anodization for vertical alignment of nematic liquid crystal / S. Lazarouk, A. Muravski, D. Sasinovich, V. Chigrinov, H. S. Kwok // Japanese Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 46 (10R). – P. 6889–6892.

6. Jaguiro, P. Porous silicon avalanche LEDs and their application in optoelectronics and information displays / P. Jaguiro, P. Katsuba, S. Lazarouk, A. Smirnov // Acta Physica Polonica A. – 2007. – Vol. 112 (5). – P. 1031–1036.

7. Lazarouk, S. Optical characterization of reverse biased porous silicon light emitting diode / S. Lazarouk, S. Katsouba, A. Tomlinson, S. Benedetti, C. Mazzoleni, V. Mulloni, G. Mariotto, L. Pavesi // Materials Science and Engineering: B. – 2000. – Vol. 69–70. – P. 114–117.

8. Lazarouk, S. K. 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections Through Optical Interposer / S. K. Lazarouk, A. A. Leshok, T. A. Kozlova, A. V. Dolbik, L. D. Vi, V. K. Ilkov, V. A. Labunov // International Journal of Nanoscience. – 2019. – Vol. 18, No. 3–4. – P. 1940091.

9. Лазарук, С. К. Эффективность лавинных светодиодов на основе пористого кремния / С. К. Лазарук, А. А. Лешок, В. А. Лабунов, В. Е. Борисенко // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39, № 1. – С. 149–152.

10. Lazarouk, S.K. Electroluminescence from nanostructured silicon embedded in anodic alumina / S. K. Lazarouk, D. A. Sasinovich, P. S. Katsuba, V. A. Labunov, A. A. Leshok, V. E. Borisenko // Semiconductors. – 2007. – Vol. 41 (9). – P. 1109-1112.

11. Lazarouk, S. Visible Electroluminescence from Al-Porous Silicon Reverse Bias Diodes Formed on the Base of Degenerate n-Type Silicon / S. Lazarouk, V. Bondarenko, P. Pershukevich, S. La Monica, G. Maiello // MRS Online Proceedings Library Archive. – 1994. – Vol. 358. – P. 659–664.

12. Jaguiro, P. Si-based optoelectronic couple / P. Jaguiro, P. Katsuba, S. Lazarouk, S Moore, A Smirnov // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2009. – Vol. 41 (6). – P. 1094–1096.

This article presents a method for forming antireflective coatings based on nanostructured zirconium oxide using two-stage electrochemical anodization. Zirconium foil and thin zirconium films deposited by magnetron sputtering were studied as starting materials. The anodization process was carried out in galvanostatic mode in aqueous solutions of sodium chloride and citric acid. It was found that sequentially changing electrolytes allows for controlling the morphology and composition of the layers: from porous zirconium to nanostructured zirconium oxide. Using scanning electron microscopy and X-ray spectral analysis, the structure and

elemental composition of the resulting films were studied, revealing the incorporation of carbon-containing anions into the oxide structure. Experiments have shown that the developed technique can significantly reduce the reflectivity in the visible and near-IR ranges (380–1000 nm) to approximately 1%. The obtained results are characterized by high reproducibility (dispersion no more than 0.1%). The developed coatings are promising for use in integrated optics, optical interconnect systems, and light energy conversion devices.

Симоненко Дарья Александровна, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, simonenk0daria1@gmail.com.

Бердова Эвелина Андреевна, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, evelinaberdova975@gmail.com.

Научный руководитель – *Лешок Андрей Александрович*, кандитат физико-математических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, leshok@bsuir.by.

УДК 546.621.6:539.216:621.046:621.785.6

И. А. СТОЛЯР, З. А. МАЛУХА, У. А. ШИХОВА, С. С. ЗДАНОВИЧ, И. А. ПРИЩЕПОВ

ИЗУЧЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ ОТОЖЖЁННЫХ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВА Al–Mg–Li–Sc–Zr МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ ОБРАТНОРАССЕЯННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Методом дифракции обратно рассеянных электронов изучена микроструктура фольг сплава Al–Mg–Li–Sc–Zr, отожженных при 300 °C в течение 1 ч. Установлено формирование гетерогенной микроструктуры зеренно-субзеренного типа, характеризующейся преобладанием мелких зерен и развитой сеткой внутризеренных и межзеренных границ. Стабильность микроструктуры обеспечивается мелкодисперсными частицами метастабильных литийсодержащих фаз.

Алюминиево-магниевые сплавы системы Al–Mg–Li являются перспективными конструкционными материалами для авиа- и космической техники, где критически важными требованиями выступают снижение удельной массы, обеспечение высокой прочностной характеристики и стабильность мелкодисперсной структуры при повышенных температурах эксплуатации [1]. Особую актуальность приобретает использование сплавов, модифицированных сверхбыстрой закалкой из расплава, позволяющей получить неравновесное состояние твердорастворное состояние и подавить коагуляцию вторых фаз. Дополнительное легирование скандием и цирконием способствует образованию дисперсных частиц со структурой типа «ядро – оболочка» (структурный тип решетки $L1_2$) на основе фазы $Al_3(Li,Sc,Zr)$. Данные частицы эффективно препятствуют миграции границ зёрен, обеспечивая стабильность мелкодисперсной структуры в процессе термической обработки [2].

Настоящая работа является продолжением комплексного изучения эволюции микроструктуры быстрозатвердевших (БЗ) фольг промышленного сплава Al–Mg–Li–Sc–Zr (1421) после различных режимов термической обработки. Целью исследования является установление корреляций между параметрами отжига и характеристиками границ зерен (распределение углов разориентации, доля МУГ, СУГ и БУГ), определенными с помощью метода ДОЭ, а также оценка влияния структурно-фазовых превращений на стабильность зеренной структуры в процессе отжига. Ключевое преимущество ДОЭ – возможность статистически достоверного анализа больших массивов данных о границах зерен [3]. Метод позволяет надежно классифицировать границы на малоугловые (МУГ, $2 < \theta < 10°$), среднеугловые (СУГ, $10° \leq \theta \leq 30°$) и большеугловые (БУГ, $\theta > 30°$). В некоторых источниках граница между СУГ и БУГ может проходить при 25° или 35° в зависимости от энергии электронов и целей анализа. При этом применение метода ДОЭ сопряжено с рядом ограничений, связанных со степенью подготовки поверхности, пределом пространственного разрешения детектора и необходимостью исключения малых углов разориентации (~1–2°), сопоставимых с экспериментальной погрешностью прибора (±0,5°). Учёт данных факторов критичен при интерпретации результатов исследования БЗ фольг, поскольку характерные размеры субзерен могут быть соизмеримы с параметрами зоны генерации дифракционной картины.

Изучение БЗ фольг промышленного сплава 1421 (Al–5.8 ат. % Mg–8.1 ат. % Li–0.03 ат. % Zr–0.11 ат. % Sc) проводилось на образцах, полученных методом сверхбыстрой закалки из расплава на вращающемся медном цилиндре с линейной скоростью 15 м/с, что обеспечивает скорость охлаждения порядка 10^6 К/с [2]. Исходные свежезакаленные фольги толщиной 60-80 мкм имели неравновесную микроструктуру с преимущественной текстурой [111] и средним размером зерна около 12 мкм [4]. Образцы были отожжены при температуре 300°C в течение 1 ч. Анализ структурного состояния отожженных фольг проводился методом ДОЭ на растровом электронном микроскопе LEO1455VP с приставкой фазового анализа «HKL CHANNEL 5» при ускоряющем напряжении 20 кВ. Шаг сканирования менялся в зависимости от увеличения от 0,1 до 0,7 мкм (например, 0,2 мкм при увеличении 5000×). Обработка данных осуществлялась с помощью математического пакета OriginPro.

На рис. 1 приведена типичная ДОЭ-карта, полученная для отожженной фольги сплава 1421. Анализ показывает выраженную гетерогенность зеренной структуры. Основную площадь изображения занимают зерна малого и среднего размера. Однако наблюдаются локальные включения зерен увеличенных размеров, что может быть интерпретировано как следствие селективного зеренного роста в процессе термической обработки. Наличие внутризеренных цветовых градиентов (см. рис. 1) и сегментация цвета свидетельствуют о формировании развитой сети границ раздела с низкой степенью разориентации. Полученные результаты указывают на зеренно-субзеренную структуру сплава с преобладающей текстурой [111], характерную для алюминиевых материалов после высокоскоростной кристаллизации [4]. Это подтверждает сохранение метастабильного состояния образца: процессы релаксации исходной микроструктурной неоднородности остаются незавершенными после отжига при 300°C в течение 1 ч.

На рис. 2 *а* представлены гистограммы распределения границ зерен по углам разориентировки поверхности отожженной фольги сплава 1421. Гистограмма *1* отражает коррелированное распределение ориентаций соседних зерен и позволяет выделить преобладающие типы границ (низкоугловые, среднеугловые, большеугловые, специализированные). Гистограмма *2* (случайно выбранные зерна) служит эталоном для сравнения и демонстрирует статистически случайное распределение.

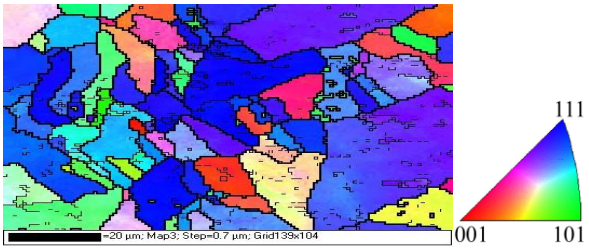


Рисунок 1 – Типичная карта ориентации зёрен сплава 1421, полученная методом ДОЭ после отжига при 300 °C. Показана цветовая кодировка относительно нормали образца в соответствии с треугольником инверсной полярной проекции [001]-[101]-[111]. Параметры измерения: масштаб 20 мкм, увеличение 3000×

Анализ гистограмм распределения границ зерен по углам разориентировки (см. рис. 2, *а*) выявил сложную картину формирования межзеренных структур. Распределение для соседних зерен (гистограмма *1*) характеризуется существенно более высоким пиком в области малых углов (θ<10 °) по сравнению с гистограммой случайно выбранных зерен (гистограмма *2*, пунктирная линия *3* соответствует расчетной кривой для некоррелирующих ориентаций). Это свидетельствует о том, что соседние зерна обладают более близкими кристаллографическими ориентациями, чем случайные пары, что является доказательством формирования развитой субструктуры (группы зерен со схожей ориентацией). В интервале средних углов наблюдается различие между профилями гистограмм, что указывает на вариативность механизмов роста зерен и восстановления деформационных дефектов в зависимости от начального состояния зерен. Отсутствие корреляции в ориентации случайно выбранных зерен подтверждает, что ориентация одного произвольно выбранного зерна не зависит от ориентации другого произвольного зерна в матрице, если они не являются соседними.

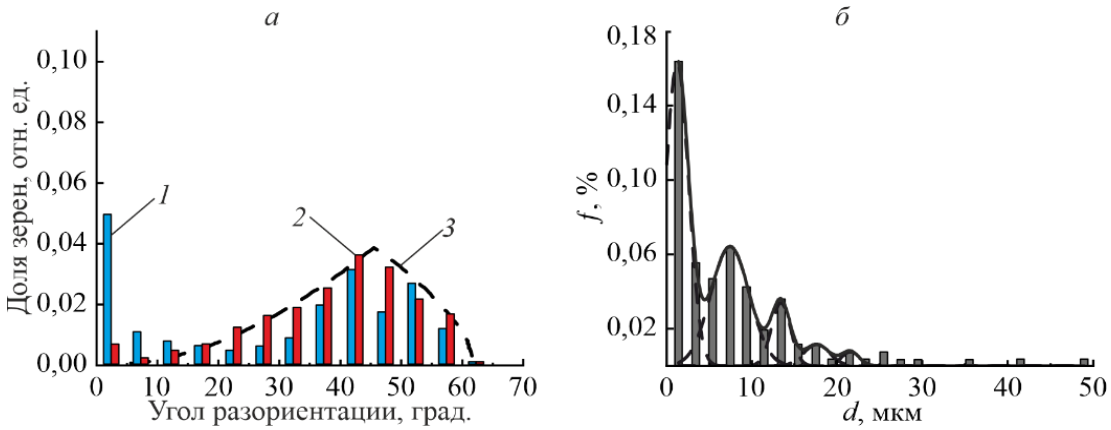


Рисунок 2 – Гистограммы распределения границ зёрен по углам разориентировки (*а*) и размеров зёрен (*б*) фольги сплава 1421 после отжига при 300 °C. Данные получены на основании ДОЭ-карты на рис. 1. На графике (*а*) синим цветом (1) обозначена гистограмма для соседних пар зёрен, красным (*2*) – для случайно выбранных зёрен, *3* – расчётная кривая разориентации некоррелирующих зёрен

Анализ гистограммы распределения углов разориентировки границ зерен показывает, что формирование микроструктуры образца после термообработки определяется преимущественным развитием большеугловых границ в интервале 34°–52° (рис. 2*а*). Суммарная площадь соответствующих пиков достигает 71 %, что свидетельствует о формировании развитой сети высокоугловых межзеренных границ, обеспечивающих структурную стабильность материала после термической обработки. Пик при 12,37° относится к переходной области среднеугловых границ (в диапазоне 5–15°), которые часто ассоциируются с начальными стадиями рекристаллизации или специфическими структурными перестройками, обусловленными фазовыми превращениями. При этом сохранение высокой доли малоугловых границ с максимумом распределения при ~2,6° указывает на незавершенность процессов релаксации остаточных напряжений и первичной рекристаллизации, а также на наличие развитой субзеренной структуры внутри кристаллитов. Высокая плотность указанных границ выполняет функцию эффективных барьеров для движения краевых дислокаций, что создает предпосылки для повышения предела текучести и микротвердости исследуемого сплава.

Распределение размеров зерен по размерным группам на рис. 2, *б* демонстрирует ярко выраженный многомодальный характер гетерогенной микроструктуры. Суммарно около 79 % выборки приходится на две основные размерные группы: мелкие зерна размером 1–2 мкм (с объемной долей ~32 %) и зерна среднего размера 7–8 мкм (с объемной долей ~47 %). Наличие менее выраженных максимумов в интервале 13–18 мкм и единичных крупных зерен (~41,5 мкм) подтверждает неоднородность структуры после отжига: наряду с мелкозернистой матрицей в ней присутствуют отдельные укрупненные зерна. Средний диаметр зерен составил 7,4 мкм. Такая преимущественно «бимодальная» структура является характерной для быстрозатвердевших сплавов, где процессы затвердевания и последующего отжига протекают неравномерно.

Температурный режим отжига (300°) оказывает существенное влияние не только на микроструктуру, но и на элементный состав приповерхностных слоев [4] фольг сплава 1421. Мелкодисперсные частицы метастабильных фаз, содержащих литий (фаза S_1 (Al_2MgLi) и фаза переменного состава $Al(Mg,Sc,Zr,Li)_x$), тормозя движение межзеренных границ, способствуют стабилизации границ зерен и подавлению миграции дислокаций. Это согласуется с ранее полученными данными об упрочнении фольг сплава 1421 в интервале температур 300–400 °С при изохронном отжиге. Одновременно наблюдается закономерное изменение концентрации лития в приповерхностной области, достигающее максимума при высоких температурах отжига (>380 °С) как при 1-ч выдержке, так и при 8-ч выдержке, что связывают с растворением частиц литийсодержащих фаз и диффузионным перераспределением легирующих элементов [2].

Следовательно, полученные результаты для отожженных БЗ фольг сплавов системы Al–Mg–Li–Sc–Zr могут быть объяснены взаимодействием микрокристаллической решетки и дисперсных включений. Частицы метастабильных литийсодержащих фаз подавляют равномерное укрупнение зерен и способствуют сохранению неоднородной структуры смешанного зеренно-субзеренного типа.

Таким образом, установлено, что термическая обработка БЗ фольг сплава 1421 при 300°С в течение 1 ч приводит к формированию стабильной зеренно-субзеренной смешанной структуры с доминирующей долей большеугловых границ при сохранении развитой сети малоугловых границ. Данная комбинация типов границ создает эффективные барьеры для движения дислокаций, способствуя повышению механической прочности материала. Совокупность результатов подтверждает, что даже в условиях частичного распада пересыщенного твердого раствора материал сохраняет уникальное сочетание эксплуатационных свойств, обусловленное взаимосвязью между параметрами зеренной структуры и фазовым состоянием. Выявленные закономерности позволяют оптимизировать режимы термообработки изделий из БЗ алюминиевых сплавов. Перспективным направлением дальнейших исследований является детальное изучение кинетики рекристаллизации и роста зерен в БЗ фольгах сплава 1421 при высокотемпературном отжиге с использованием метода ДОЭ.

Список литературы

1. Захаров, В. В. Обзор состояния и перспектив применения алюминиевых сплавов со скандием в российской промышленности / В. В. Захаров, Ю. А. Филатов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2025. – № 2. – С. 36–43.

2. Столяр, И. А. Влияние высокотемпературной термообработки на эволюцию композиционного состава поверхности быстрозатвердевших фольг сплава Al–Mg–Li–Sc–Zr // И. А. Столяр, В. Г. Шепелевич, И. И. Ташлыкова-Бушкевич, Р. Ву, Э. Вендлер // Поверхность. рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2025. – № 2. – С. 16–24.

3. Антонова, А. О. Исследование влияния статистической зависимости элементов выборки при EBSD измерениях на погрешность вычисления функции распределения ориентаций / А. О. Антонова, Т. И. Савелова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Т. 81, № 1. – С. 26–30.

4. Столяр, И. А. Ядерно-физическое исследование состава поверхностных слоев быстро затвердевших фольг сплава Al−Mg−Li−Sc−Zr после термообработки / И. А. Столяр, В. Г. Шепелевич, И. И. Ташлыкова-Бушкевич, Р. Ву, Э. Вендлер // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. – 2023. – № 2. – С. 23–32.

The microstructure of Al–Mg–Li–Sc–Zr alloy foils, annealed at 300 °C for 1 h, was examined using electron backscattered diffraction. A heterogeneous mixed grain–subgrain microstructure was identified, characterized predominantly by fine grains and a

well-developed network of intra- and inter-grain boundaries. The stability of the microstructure is ensured by dispersed precipitates of metastable lithium-containing phases.

Столяр Иулиана Алексеевна, аспирант физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, uyluana@gmail.com.

Малуха Захар Александрович, студент факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиотехники, Минск, Республика Беларусь, Zamalukha@gmail.com.

Шихова Ульяна Андреевна, студент факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиотехники, Минск, Республика Беларусь, sihovoulana@gmail.com.

Зданович Станислав Сергеевич, студент факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиотехники, Минск, Республика Беларусь, zdanowich.stas@gmail.com.

Прищепов Иван Александрович, студент факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиотехники, Минск, Республика Беларусь, ivanprischepov78@mail.ru.

Научный руководитель – *Шепелевич Василий Григорьевич*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, shepelevich@bsu.by.

Научный руководитель – *Ташлыкова-Бушкевич Ия Игоревна*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики факультета компьютерных систем и сетей Белорусского государственного университета информатики и радиотехники, Минск, Республика Беларусь, iya.itb@bsuir.by.

УДК 539.1

Р. А. ТАЗИЕВ, Е. Ф. МАРТЫНОВИЧ

КИНЕТИКА ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПРИРОДНОГО КВАРЦА: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ КАСКАДНОГО ЗАПОЛНЕНИЯ ЛОВУШЕК

Методом термостимулированной люминесценции (ТЛ) исследован природный монокристаллический кварц размером 4×4×2 мм. Образец облучался рентгеновскими лучами (30 кВ, 30 мкА) в течение 1–50 мин., а также УФ-излучением (172 нм). Кривые термовысвечивания записывались в интервале 50–400 °C со скоростью нагрева 0.25 °C/c с последующей коррекцией на ИК-фон нагревателя. В необлучённом образце обнаружен единственный пик при 220 °C, соответствующий природной («палео») ловушке. С увеличением дозы облучения наблюдается последовательное заполнение ловушек: 220 °C → 170 °C → 140 °C → 270 °C / 320 °C, что является прямой экспериментальной визуализацией модели каскадного перераспределения носителей заряда. При максимальной дозе (50 мин.) регистрируются пики при 175, 237, 270 и 320 °C, причём пики 237 °C и 320 °C совпадают с литературными данными для эталонного кварца. Методом термической чистки выделены изолированные пики 230 °C (E = 1.51 эВ, s = 2.35×10^{13} c^{-1}, $\tau \approx 1.6\times10^{5}$ лет) и 315 °C (E = 1.31 эВ, s = 1.85×10^{9} c^{-1}, $\tau \approx 6.7\times10^{5}$ лет). Расчёт параметра K = 280 подтверждает отсутствие тепловых искажений. УФ-облучение не создаёт ТЛ-сигнала, что согласуется с низкой фоточувствительностью образца. Полученные результаты подтверждают применимость исследованного кварца для дозиметрии и датирования.

Введение. Термостимулированная люминесценция (ТЛ) кварца является одним из наиболее информативных методов исследования радиационных дефектов в минералах [1]. Благодаря способности накапливать и сохранять информацию о радиационном воздействии, кварц широко используется в дозиметрии и геохронологии [2]. Однако ТЛ-свойства кварца сильно зависят от его генезиса, химического состава и условий отбора, что требует детального изучения каждого конкретного образца перед применением в датировании [3]. Целью настоящей работы являлось исследование дозовой зависимости ТЛ природного кварца при рентгеновском облучении, идентификация типов ловушек и сопоставление полученных данных с известными литературными моделями.

Методика исследования. Объект исследования: монокристаллический природный кварц размером 4×4×2 мм с полированными гранями. Условия облучения: рентгеновская трубка (U = 30 кВ, I = 30 мкА), времена экспозиции: 1, 5, 10, 25 и 50 минут; УФ-облучение в течение 3 минут. Регистрация ТЛ: кривые термовысвечивания записывались в интервале 50–400°C со скоростью нагрева v = 0.25 °C/c. Проведена коррекция на ИК-фон нагревателя. Метод анализа: кинетические параметры пиков (энергия активации E, частотный фактор s) определялись методом начального подъема с последующим расчетом по формуле первого порядка кинетики [4].

Результаты и обсуждение. На рис. 1 представлены ТЛ-кривые для различных времен облучения. В необлученном образце присутствует единственный пик при 220 °C, соответствующий природной («палео») ловушке, заполненной за время геологического существования кристалла. Этот пик является аналогом пика ~238 °C, описанного Tran Ngoc и соавторами [4] для природного кварца Вьетнама.

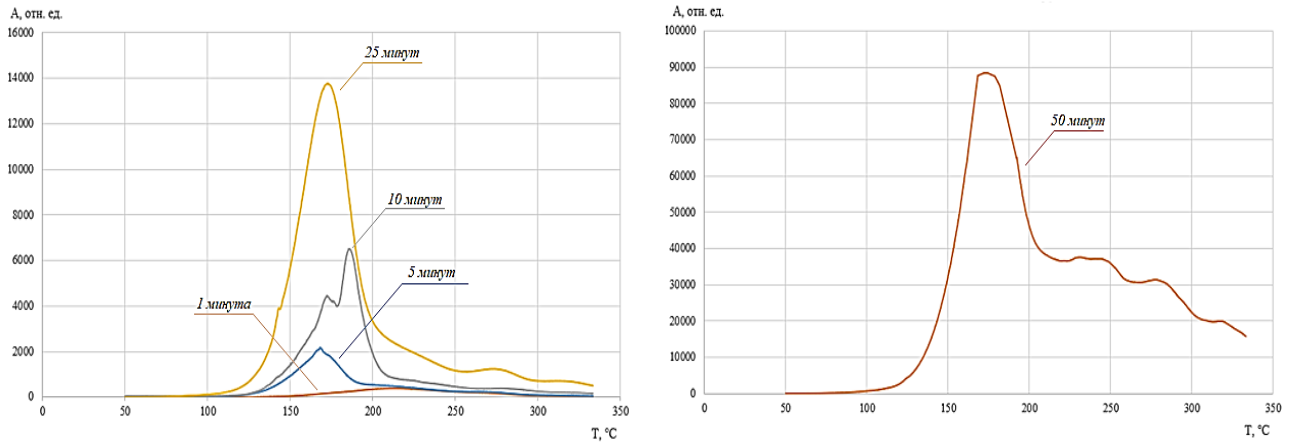


Рисунок 1 – Кривые термовысвечивания при разных временах облучения

При облучении в течение 1 минуты пик смещается к 214 °C, а его интенсивность незначительно возрастает, что свидетельствует о начале процесса перераспределения носителей заряда. При 5 минутах облучения наблюдается резкое появление нового пика при 168°C, который к 10 минутам расщепляется на два компонента – 172 °C и 186 °C. Данное расщепление указывает на наличие двух близких по энергии ловушек, вероятно, связанных с различным локальным окружением алюминиевых центров.

Дальнейшее увеличение дозы (25 минут) приводит к появлению мелкой ловушки при 140 °C и нового глубокого пика при 273 °C. При максимальной дозе (50 минут) регистрируется полный спектр пиков: 175 °C (доминирующий), 237 °C, 270 °C и 320 °C. Обращает на себя внимание, что пик 237 °C практически совпадает с литературным значением 238 °C [4], а пик 320 °C соответствует пику 325 °C из той же работы, однако в нашем образце эти глубокие ловушки активируются лишь при высоких дозах.

Для корректного определения кинетических параметров были проведены эксперименты по термической чистке образца после облучения 10 минут (метод T-stop). Полученные параметры сведены в таблице 1.

Таблица 1 – Кинетические параметры изолированных ТЛ-пиков

Пик, °C	T_{max}, K	E, эВ	s, c^{-1}
230	503	1,51	$2{,}35\times10^{13}$
315	588	1,31	$1{,}85\times10^{9}$

Модель каскадного заполнения Мамаева и Погребняка. Полученные результаты представляют собой прямую экспериментальную визуализацию каскадного заполнения ловушек «сверху вниз». Изначально заполнена лишь глубокая природная ловушка (~220 °C). При малых лабораторных дозах электроны начинают заполнять более мелкие ловушки (~170 °C), делая их доминирующими. Лишь при максимальных дозах заполняются очень глубокие ловушки (270 и 320 °C).

Данные Tran Ngoc et al. [4]. При дозе 50 минут наш образец демонстрирует пики при 237 °C и 320 °C, практически идентичные пикам 238 °C и 325 °C в эталонном кварце. Энергии активации и частотные факторы для этих пиков (табл. 1) хорошо согласуются с литературными значениями. Отсутствие пика 375 °C может указывать на более низкое содержание германия или титана в нашем образце.

Модель тепловых градиентов Шейнкмана и др. [5]. Расчет безразмерного параметра $K = \frac{\alpha \Delta T}{\nu R^2}$ для наших условий ($\alpha \approx 1.4\times10^{-6}$ м^2/с, $\Delta T \approx 200$°C, $\nu = 0.25$°C/с, $R = 2$ мм) дает $K = 280 >> 1$. Согласно [5], это означает, что тепловые градиенты в образце пренебрежимо малы, и наблюдаемые эффекты (расщепление пиков, смещение максимумов) являются физическими, а не методическими артефактами.

Выводы. Ключевым результатом работы является обнаружение четкой последовательности заполнения ловушек с увеличением дозы облучения. Эта последовательность – 220°C → 170°C → 140 °C → 270 °C / 320 °C – полностью соответствует модели каскадного перераспределения носителей, предложенной Мамаевым и Погребняком, и демонстрирует ее в реальном времени.

Аномально низкая энергия активации пика 175 °C (0.97 эВ) при его высокой температуре проявления может объясняться либо иной природой центра (не алюминиевой), либо эффектами повторного захвата, характерными для кинетики высокого порядка. Относительно низкий частотный фактор (10^9 c^{-1}) при высокой емкости ловушки объясняет суперлинейный рост этого пика.

Отсутствие отклика на УФ-облучение закономерно, поскольку в необлученном образце пусты глубокие ловушки, а мелкий фоточувствительный пик ~110 °C в нашем кварце практически отсутствует.

Показано, что при максимальной дозе облучения (50 мин.) система ловушек исследуемого образца приходит в состояние, качественно аналогичное эталонному кварцу из работы Tran Ngoc et al. [4].

Список литературы

1. Chen, R. Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena / R. Chen, S. W. S. McKeever // World Scientific. – 1997. – 559 p.

2. Quartz as a natural luminescence dosimeter / F. Preusser, M. L. Chithambo, T. Götte [et al.] // Earth-Science Reviews. – 2009. – Vol. 97. – P. 1–6.

3. Мамаев, А. Н. Дозовые изменения кривых термостимулированной люминесценции в кристаллах кварца / А. Н. Мамаев, А. Д. Погребняк // Вестн. Челяб. ун-та. – 1998. – Вып. 1. – С. 81–89.

4. Thermoluminescence properties and new insights on the UV-vis absorption features of colorless quartz after γ-ray irradiation / Tran Ngoc, Nguyen Xuan Ca, Nguyen Trong Thanh [et al.] // RSC Advances. – 2024. – Vol. 14. – P. 19154–19166.

5. Шейнкман, В. С. Численное моделирование термолюминесценции кварцевой частицы / В. С. Шейнкман, О. А. Симонов, Ю. Ю. Ерина // Вестн. Тюмен. гос. ун-та. Физико-математическое моделирование. – 2021. – Т. 7, № 3. – С. 136–151.

Renat Albertovich Taziev, Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation, tazievrenat@mail.ru.

Supervisor – *Evgeny Fedorovich Martynovich*, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Irkutsk Branch of the Institute of Laser Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk State University, Russian Federation, femto@bk.ru.

УДК 544.653.23

Л. П. ТОМАШЕВИЧ, В. В. ДУДИЧ, С. М. ИВАНЮТА,
А. В. ШЕВЕРДЕНКО, Г. Д. АРТЮШКЕВИЧ

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОРИСТЫХ ОКСИДОВ ВЕНТИЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ НА УДЕЛЬНУЮ ВНУТРИПОРОВУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Исследуется влияние ключевых геометрических параметров пористых оксидных пленок вентильных металлов (алюминия, титана, ниобия) на величину их удельной внутрипоровой поверхности. Рассматривается структурная модель в виде плотноупакованных гексагональных ячеек с центральными цилиндрическими порами. Приведены математические зависимости для расчета объемной доли пор (пористости) и удельной поверхности в зависимости от межпорового расстояния и диаметра пор. В ходе исследования установлено, что удельная поверхность пленок закономерно возрастает при уменьшении межпорового расстояния и увеличении диаметра пор. Выявлено, что максимальное значение удельной поверхности достигается при переходной пористости около 90 %. Показано, что дальнейшее увеличение пористости приводит к снижению удельной поверхности, что объясняется преобразованием структуры: переходом от системы гексагональных сот к столбчатой структуре. Полученные результаты имеют высокую практическую значимость для проектирования современных устройств интегральной электроники, оптимизации фотокатализаторов для очистки воды, а также при создании высокоэффективных теплоотводящих слоев и антиотражающих покрытий для солнечной энергетики.

Пленки пористых оксидов вентильных металлов таких как алюминий, титан, ниобий используются в качестве функциональных компонентов интегральной электроники [1; 2]. На основе этих пленок формируют диэлектрические слои [3; 4], светопроводящие структуры [5; 6], формозадающие матрицы для темплатного синтеза [7]. Вышеупомянутые пористые пленки имеют структуру типа пчелиных сот, состоящую из гексагональных ячеек с цилиндрической порой в центре ячейки [8–9].

Основными структурными параметрами пористых оксидов является: расстояние между центрами пор (D_{int}) и диаметр пор (d_{por}). Изменяя эти параметры, можно получать различные структуры: низкопористые (пористость 1-50%), высокопористые (пористость 51–90 %), а также столбчатые структуры (пористость 91–99 %) (рисунок 1).

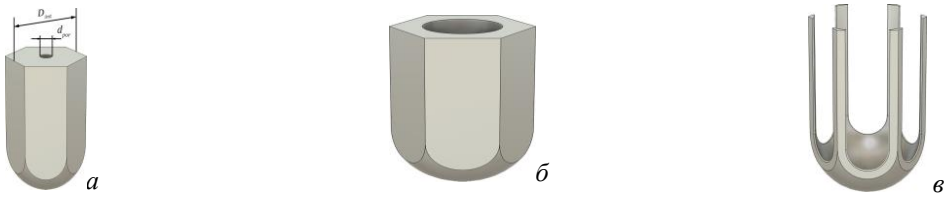


Рисунок 1 – Схематичное изображение гексагональных ячеек пористых оксидов вентильных металлов: а) ячейка с низкой пористостью (пористость 1–50 %); б) ячейка с высокой пористостью (пористость 51–90 %); ячейка со столбиковой структурой (пористость более 90 %)

Важным параметром пористых пленок является удельная (внутрипоровая) поверхность таких пленок. Исходя из обозначенных на рисунке 1 параметров, выведем формулы для расчета объемной доли пор (пористости P) и удельной поверхности (S_{sp}).

$$P = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{d_{por}^2}{D_{int}^2} \cdot 100\% \tag{1}$$

$$S_{sp} = \frac{1}{D_{int}} \cdot \sqrt{\frac{8\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{P}{100\%}} \tag{2}$$

Когда $d_{por} = D_{int}$, имеет место переход структуры типа «пчелиных сот» к столбчатой структуре, как это представлено на рисунке 1. При этом S_{sp} достигает максимального значения. Значение пористости при изменении структуры составляет 90,7% и обозначается как P_{tr}. При дальнейшем увеличении пористости S_{sp} рассчитывается по следующей формуле:

$$S_{sp} = S_{sp\,max} \cdot \left(1 - \frac{P - P_{tr}}{100\% - P_{tr}}\right) \tag{3}$$

На рисунке 2 представлена зависимость удельной поверхности исследуемых пленок от их пористости для структур с различным межпоровым расстоянием. Как видно из рисунка, удельная поверхность увеличивается при уменьшении межпорового расстояния и достигает максимального значения при увеличении диаметра пор и уменьшении межпорового расстояния. При этом максимальное значение удельной поверхности достигается при пористости около 90 %. При дальнейшем увеличении пористости за счет увеличения растрава стенок гексагональных ячеек имеет место уменьшение удельной поверхности, что объясняется преобразованием от структуры гексагональных ячеек (структуры пчелиных сот) к столбчатой структуре с центрами столбиков в так называемых местах соединения трех гексагональных ячеек, как это схематично показано на рисунке 1.

Достигнутый уровень удельной поверхности пористого оксида с гексагональной структурой около 100 м^2/см^3 представляет интерес для пористых материалов используемых в качестве фотокатализаторов химических реакций, например, пористый оксид титана используется для очистки воды от органических загрязнений [10]. Пористый оксид алюминия с минимальной пористостью может быть использован в качестве теплоотводящего слоя от алюминиевых электродов, работающих при высоких плотностях электрического тока, что позволяет повысить надежность электронных изделий [11]. Контролируемое управление пористостью может также использоваться при формировании многослойных световодных структур с сердцевиной, обладающей повышенным показателем преломления за счет более низкой пористости внутреннего слоя [12–14]. Столбчатые структуры с высокой пористостью могут быть использованы в качестве антиотражающих покрытий на металлических поверхностях в фотоэлектрических и фототепловых преобразователей солнечной энергии [15].

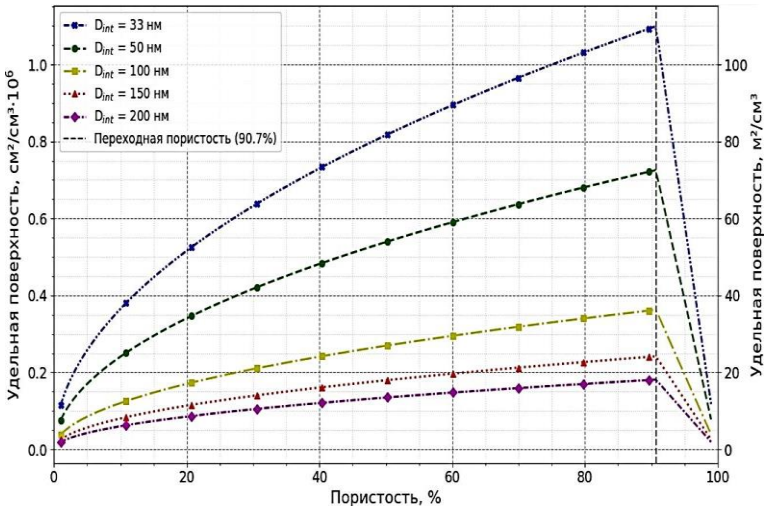


Рисунок 2 – График зависимости удельной поверхности пористых пленок с гексагональной структурой от структурных параметров составляющих их ячеек

Список литературы

1. Lazarouk, S. K. 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections Through Optical Interposer / S. K. Lazarouk, A. A. Leshok, T. A. Kozlova, A. V. Dolbik, L. D. Vi, V. K. Ilkov, V. A. Labunov // International Journal of Nanoscience. – 2019. – Vol. 18, No. 3-4. – P. 1940091.

2. Лазарук, С. К. Эффективность лавинных светодиодов на основе пористого кремния / С. К. Лазарук, А. А. Лешок, В. А. Лабунов, В. Е. Борисенко // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39, № 1. – С. 149–152.

3. Lazarouk, S. Anodic Nanoporous Titania for Electro-optical Devices / S. Lazarouk, Z. Xie, V. Chigrinov, H. S. Kwok // Japanese Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 46 (7A). – P. 4390–4394.

4. Lazarouk, S. Porous alumina as low-ε insulator for multilevel metallization / S. Lazarouk, S. Katsouba, A. Leshok, A. Demianovich, V. Stanovski, S. Voitech, V. Vysotski, V. Ponomar // Microelectronic Engineering. – 2000. – Vol. 50 (1–4). – P. 321-327.

5. Lazarouk, S. Visible Electroluminescence from Al-Porous Silicon Reverse Bias Diodes Formed on the Base of Degenerate n-Type Silicon / S. Lazarouk, V. Bondarenko, P. Pershukevich, S. La Monica, G. Maiello // MRS Online Proceedings Library Archive. – 1994. – Vol. 358. – P. 659–664.

6. Lazarouk, S. K. Room-temperature formation of erbium-related luminescent centers in anodic alumina / S. K. Lazarouk, A. V. Mudryi, V. E. Borisenko // Applied physics letters. – 1998. – Vol. 73 (16). – P. 2272–2274.

7. Nguyen, J. Effect of flattened surface morphology of anodized aluminum oxide templates on the magnetic properties of nanoporous Co/Pt and Co/Pd thin multilayered films / J. Nguyen, J. Fedotova, J. Kasiuk, V. Bayev, O. Kupreeva, S. Lazarouk, D. H. Manh, D. L. Vu, S. Chung, J. Akerman, V. Altynov, A. Maximenko // Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 427. – P. 649–655.

8. Lazarouk, S. K. Formation of Alumina Nanotubes and Jet Effect during High-Voltage Local Anodization of Aluminum / S. K. Lazarouk, D. A. Sasinovich, V. V. Dudich, A. S. Lazarouk, V. E. Borisenko // Advanced Engineering Materials. – 2022. – Vol. 24 (1). – P. 2100691.

9. Lazarouk, S. K. High Field Porous Anodization of Aluminium Films with a Photolithographic Mask / S. K. Lazarouk // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. World Scientific Press. – 2013. – P. 355–358.

10. Liang, K. Fabrication of double-walled titania nanotubes and their photocatalytic activity / K. Liang, B. K. Tay, O. V. Kupreeva, T. I. Orekhovskaya, S. K. Lazarouk, V. E. Borisenko // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2014. – Vol. 2 (4). – P. 991–995.

11. Lazarouk, S. K. Electroluminescence from nanostructured silicon embedded in anodic alumina / S. K. Lazarouk, D. A. Sasinovich, P. S. Katsuba, V. A. Labunov, A. A. Leshok, V. E. Borisenko // Semiconductors. – 2007. – Vol. 41 (9). – P. 1109-1112.

12. Jaguiro, P. Si-based emissive microdisplays / P. Jaguiro, P. Katsuba, S. Lazarouk, M. Farmer, A. Smirnov // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2009. – Vol. 41 (6). – P. 927–930.

13. Jaguiro, P. Porous silicon avalanche LEDs and their applications in optoelectronics and information displays / P. Jaguiro, P. Katsuba, S. Lazarouk, A. Smirnov // Acta Physica Polonica A. – 2007. – Vol. 112 (5). – P. 1031–1036.

14. Dolbik, A. V. Optical Properties of Transparent Conducting Coatings Based on an Aluminum Grid Embedded in Anodic Aluminum Oxide / A. V. Dolbik, D. A. Sasinovich, S. M. Zavadskii, D. A. Golosov, M. V. Meledina, G. G. Rabatuev, S. K. Lazarouk // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2025. – Vol. 61 (3). – P. 333–337.

15. Лазарук, С. К. Формирование трубчатых оксидов алюминия локальным электрохимическим анодированием в органических электролитах и их антиотражающие свойства / С. К. Лазарук, В. В. Дудич, Т. И. Ореховская, Д. А. Сасинович, Л. П. Томашевич, А. А. Устименко, А. А. Повжик, Н. А. Каланда, Д. А. Симоненко, С. М. Иванюта // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21 (6). – С. 21–28.

The influence of key structural parameters of porous valve-metal oxide films (aluminum, titanium, niobium) on their specific intra-pore surface area is investigated. A structural model based on close-packed hexagonal cells with central cylindrical pores is considered. Mathematical expressions are provided for calculating the pore volume fraction (porosity) and specific surface area as functions of the inter-pore distance and pore diameter. The study established that the specific surface area of the films consistently increases with decreasing inter-pore distance and increasing pore diameter. It was revealed that the maximum specific surface area is reached at a critical porosity of approximately 90%. It is shown that a further increase in porosity leads to a decrease in the specific surface area, which is explained by a physical structural transition from a hexagonal honeycomb system to a columnar structure. The obtained results have high practical significance for the design of modern integrated electronic devices, optimization of photocatalysts for water purification, and the development of highly efficient heat-dissipating layers and anti-reflective coatings for solar energy applications.

Дудич Владислав Валерьевич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, dudich@bsuir.by.

Томашевич Леонид Павлович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, lenya.tomashevich.forps@mail.ru.

Иванюта Сергей Михайлович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, saratnik101@gmail.com.

Шеверденко Алексей Викторович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, 375257699525@inbox.ru.

Артюшкевич Глеб Дмитриевич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, glebarf61@gmail.com.

Научный руководитель – *Лазарук Сергей Константинович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, serg@nano.bsuir.edu.by.

УДК 577.1, 539.2, 621.315

Л. П. ТОМАШЕВИЧ, А. В. ШЕВЕРДЕНКО, Г. Д. АРТЮШКЕВИЧ, В. В. ДУДИЧ

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО АНОДИРОВАНИЯ ПЛЁНОК ТИТАНА НА ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНОДНОГО ПРОЦЕССА

Исследуется влияние локализации электрохимического анодирования титановых пленок (толщиной 0,3–0,4 мкм на кремниевых подложках) на характеристики анодного процесса. Анодирование проводилось в 1 %-м водном растворе NaCl в потенциодинамическом режиме (скорость развертки 0,2 В/с до 10 В) с использованием ячеек диаметром 3, 7 и 11 мм. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) демонстрируют значительное увеличение плотности анодного тока (более чем в 4 раза при 10 В при уменьшении площади с 1 см² до 7 мм²), объясняемое краевыми эффектами сгущения линий тока в электролите высокого сопротивления (>0,5 Ом/м). Обнаруженный эффект актуален для анодирования вентильных металлов при высоких плотностях тока (>100 мА/см²), где газообразные продукты вызывают реактивную тягу. Удельная энергия окисления титана превосходит энергию сгорания углеводородов, открывая перспективы создания нано- и микродвигателей для перемещения микрообъектов в жидких средах.

Электрохимическое анодирование металлических пленок используется при формировании элементов полупроводниковых приборов и интегральных схем [1-7]. Для формирования заданного рисунка элементов процесс анодирования металлических пленок проводится с использованием маски, то есть электрохимическое анодирование проводится локально в местах, незащищенных маскирующим покрытием. В данной работе приведено исследование влияния локализации электрохимического анодирования титана на характеристики анодного процесса.

В качестве исходных образцов использовались пленки титана толщиной 0,3–0,4 мкм, осажденные на кремниевые подложки магнетронным распылением титановой мишени. Электрохимическое анодирование титановых пленок проводилось в 1% водном растворе NaCl в электрохимических ячейках с круглой формой обрабатываемой металлической поверхности. При этом диаметр обрабатываемой поверхности составлял 3, 7 и 11 мм в зависимости от ячейки. Процесс анодирования проводился в потенциалостатическом режиме со скоростью развертки напряжения формовки 0,2 В/сек с ростом напряжения до 10 В. Плотность тока анодного процесса регистрировалась как при росте напряжения, так и при его спаде.

На рисунке 1 представлены вольт-амперные характеристики процесса локального электрохимического анодирования титана в 1% водном растворе хлористого натрия в ячейках с различным значением диаметра круглой площади обрабатываемой титановой поверхности. Как видно из рисунка, локальная площадь обрабатываемой поверхности сильно влияет на воль-амперные характеристики исследуемого анодного процесса. Уменьшение обрабатываемой площади с 1см^2 до 7 мм^2 приводит к увеличению плотности анодного тока более чем в 4 раза для анодного напряжения 10В. Данное явление объясняется краевыми эффектами сгущения линий тока при локализации электрохимического процесса, как это схематично представлено на рисунке 2.

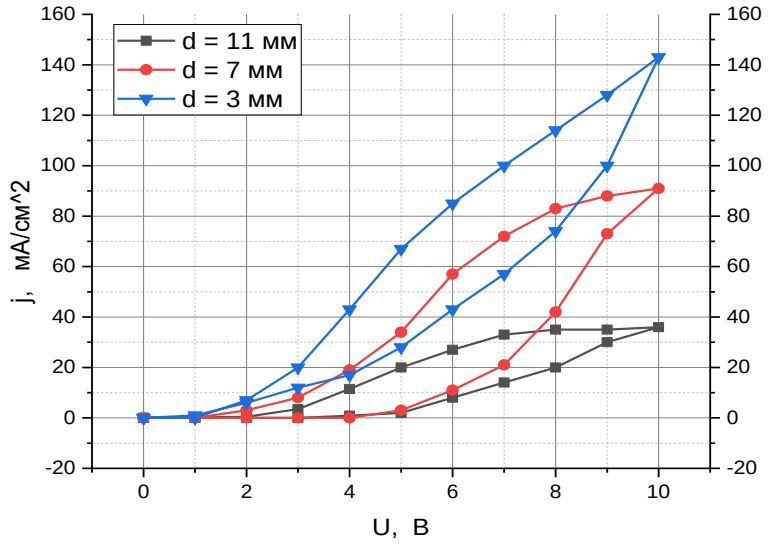
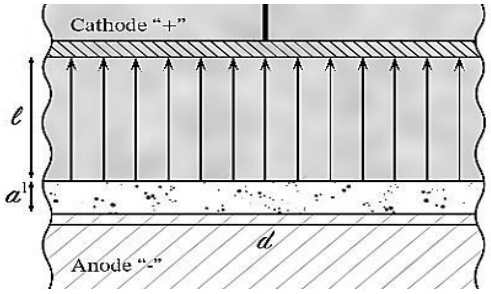
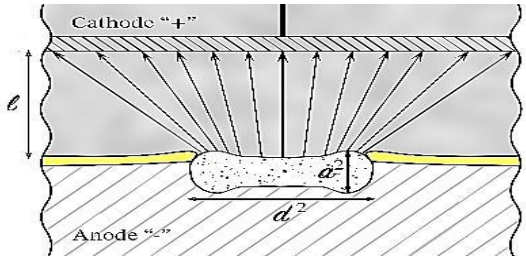


Рисунок 1 – Вольтамперные характеристики процесса локального электрохимического анодирования титана в 1 %-м водном растворе хлорида натрия в ячейках с различным значением диаметра

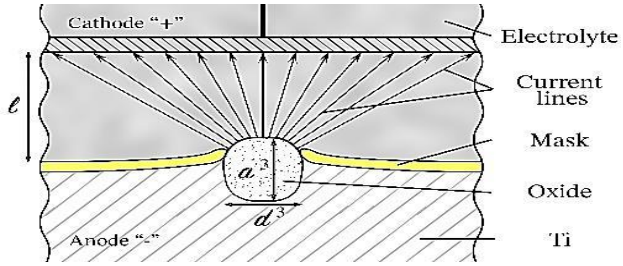
Если при анодной обработке больших площадей линии тока параллельны друг другу (рисунок 2*а*), то при локализации анодного процесса сгущение линий наблюдается на краях обрабатываемых участков (рисунок 2*б*). Дальнейшее уменьшение площади анодируемых участков приводит к более заметному эффекту сгущения линий тока как это показано на рисунке 2*в*. Особенно заметно действие описанного явления наблюдается в электролитах высокого удельного сопротивления, к которым относится исследуемый электролит (более 0,5 Ом/м).



а



б



в

Рисунок 2 – Схематическое изображение краевых эффектов сгущения линий тока при анодной обработке: а – параллельные линии на больших площадях; б – сгущение на краях локализованных участков; в – усиленное сгущение на малых площадях

Увеличением сопротивления всей исследуемой системы объясняется различие вольт-амперных характеристик при росте напряжения формовки от аналогичных характеристик при спаде напряжения формовки. Последние характеристики имеют более низкие значения плотности тока, что объясняется влиянием анодного оксида, который появился на поверхности титана во время развертки анодного напряжения до 10 В. Отмеченный эффект наблюдается для всех проведенных экспериментов с различным диаметром обрабатываемой металлической поверхности.

Обнаруженный эффект имеет значение для электрохимических процессов анодирования вентильных металлов при высоких плотностях анодного тока. В частности, как было обнаружено [8] при плотностях анодного тока более 100 мА/см^2 газообразные продукты реакции, выходящие из внутрипорового пространства вызывают реактивную тягу, что может быть использовано для разработки нано- и микродвигателей, обеспечивающих перемещение нано- и микросистем в жидких средах.

Важно отметить, что удельная энергия, выделяемая в процессе окисления вентильных материалов, превосходит аналогичную энергию, выделяемую при окислении (сгорании) углеводородов [9-11].

Таким образом локализация процесса электрохимического анодирования титана открывает новые возможности для разработки нано- и микро систем, способных преобразовывать энергию окисления в механическую энергию, обеспечивающую передвижение нано- и микро объектовв жидких средах.

Список литературы

1. Лазарук, С. К. Эффективность лавинных светодиодов на основе пористого кремния / С. К. Лазарук, А. А. Лешок, В. А. Лабунов, В. Е. Борисенко // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39, № 1. – С. 149–152.

2. Lazarouk, S. K. 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections Through Optical Interposer / S. K. Lazarouk, A. A. Leshok, T. A. Kozlova, A. V. Dolbik, L. D. Vi, V. K. Ilkov, V. A. Labunov // International Journal of Nanoscience. – 2019. – Vol. 18, No. 3–4. – P. 1940091.

3. Lazarouk, S. Anodic Nanoporous Titania for Electro-optical Devices / S. Lazarouk, Z. Xie, V. Chigrinov, H. S. Kwok // Japanese Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 46 (7A). – P. 4390–4394.

4. Lazarouk, S. Visible Electroluminescence from Al-Porous Silicon Reverse Bias Diodes Formed on the Base of Degenerate n-Type Silicon / S. Lazarouk, V. Bondarenko, P. Pershukevich, S. La Monica, G. Maiello // MRS Online Proceedings Library Archive. – 1994. – Vol. 358. – P. 659–664.

5. Lazarouk, S.K. Room-temperature formation of erbium-related luminescent centers in anodic alumina / S. K. Lazarouk, A. V. Mudryi, V.E. Borisenko // Applied physics letters. – 1998. – Vol. 73 (16). – P. 2272–2274.

6. Lazarouk, S. K. High Field Porous Anodization of Aluminium Films with a Photolithographic Mask / S. K. Lazarouk // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. World Scientific Press. – 2013. – P. 355–358.

7. Lazarouk, S.K. Electroluminescence from nanostructured silicon embedded in anodic alumina / S. K. Lazarouk, D. A. Sasinovich, P. S. Katsuba, V. A. Labunov, A. A. Leshok, V. E. Borisenko // Semiconductors. – 2007. – Vol. 41 (9). – P. 1109-1112.

8. Lazarouk, S. K. Formation of Alumina Nanotubes and Jet Effect during High-Voltage Local Anodization of Aluminum / S. K. Lazarouk, D. A. Sasinovich, V. V. Dudich, A. S. Lazarouk, V. E. Borisenko // Advanced Engineering Materials. – 2022. – Vol. 24 (1). – P. 2100691.

9. Lazarouk, S. K. Spherical plasmoids formed upon the combustion and explosion of nanostructured hydrated silicon / S. K. Lazarouk, A.V. Dolbik, V. A. Labunov, V. E. Borisenko // JETP letters. – 2007. – Vol. 84 (11). – P. 581-584.

10. Chelyadinsky, A. R. Deformation of porous silicon lattice caused by absorption/desorption processes / A. R. Chelyadinsky, A. M. Dorofeev, N. M. Kazuchits, S. La Monica [et al.] // Journal of the Electrochemical Society.– 1997. – Vol. 144 (4). – P. 1463–1468.

11. Томашевич, Формирование трубчатого пористого оксида титана электрохимическим анодированием в хлорсодержащих электролитах / Л. П. Томашевич, А. В. Шеверденко, Г. Д. Артюшкевич, В. В. Дудич / Физика конденсированного состояния : материалы XXXIII Междунар. науч.-практ. конф. аспир., магистр. и студ., Гродно, 3–4 апр. 2025 г. / ГрГУ им. Янки Купалы ; редкол.: Г. А. Гачко [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2025. – С. 105–108.

The paper investigates the influence of localization of electrochemical anodization of titanium films (0.3–0.4 μm thick on silicon substrates) on the characteristics of the anodic process. Anodization was carried out in a 1% aqueous NaCl solution in potentiodynamic mode (scan rate of 0.2 V/s up to 10 V) using cells with diameters of 3, 7, and 11 mm. The current-voltage characteristics (I-V characteristics) demonstrate a significant increase in the anode current density (more than 4 times at 10 V with a decrease in area from 1 cm² to 7 mm²), explained by the edge effects of current line thickening in a high-resistance electrolyte (>0.5 Ohm/m). The discovered effect is relevant for anodizing valve metals at high current densities (>100 mA/cm²), where gaseous products cause reactive thrust. The specific energy of titanium oxidation exceeds the combustion energy of hydrocarbons, opening up prospects for the creation of nano- and micro-engines for moving micro-objects in liquid media.

Томашевич Леонид Павлович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, lenya.tomashevich.forps@mail.ru.

Шеверденко Алексей Викторович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, 375257699525@inbox.ru.

Артюшкевич Глеб Дмитриевич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, glebarf61@gmail.com.

Дудич Владислав Валерьевич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, dudich@bsuir.by.

Научный руководитель – *Лазарук Сергей Константинович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, serg@nano.bsuir.edu.by.

УДК 535.37+535.34

Р. К. ТРАВКИНА, Д. С. МОЛЧАН

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НОВОГО ТРИКАРБОЦИАНИНОВОГО КРАСИТЕЛЯ В РАСТВОРАХ

Приведены результаты исследования спектральных и фотофизических свойств нового трикарбоцианинового красителя, разработанного с целью его применения для фотодинамической терапии бактерий туберкулеза. Изучены свойства красителя в водных и спиртовых растворах (этаноле, бутаноле), моделирующих среды различной полярности, с использованием спектрофотометрии, стационарной и временно-разрешенной флуориметрии. Установлено, что в спектралных свойствах нового трикарбоцианинового красителя в воде при высоких концентрациях проявляется агрегации его молекул с формированием мономерно-димерной системы. В органических растворителях в этаноле и бутаноле краситель преимущественно

существует в мономерной форме, о чем свидетельствует форма и положение полос поглощения и флуорисценции, а также одноэкспонентоциальный характер кинетики затухания флуоресценции порядка 1,4 нс. Проведена экстракция красителя из водных растворов бутанолом, обеспечивающая его выделение с высокой степенью экстрагирования (порядка 97,5 %). Полученные результаты демонстрируют перспективность нового трикарбоцианинового красителя в качетве основы фотосенсибилизатора, который активируется излучением, соответствующим окну прозрачности биологических тканей.

Туберкулез остается одним из более смертоносных инфекционных заболеваний в мире: по данным ВОЗ, в 2024 году им заболело около 10,7 миллионов человек, а число летальных исходов составляет 1,23 млн [1]. Основная проблема данного заболевания состоит в том, что бактерии *Mycobacterium tuberculosis,* вызывающие туберкулез, способны инициировать новые штаммы, устойчивые к имеющимся препаратам. В связи с этим перспективным направлением лечения данного заболевания является применение фотодинамической терапии, основанной на введении фотосенсибилизатора в организм и последующей активации посредством воздействия света, в результате чего происходит генерация активных форм кислорода, которая ведет к гибели бактерий. Перспективными фотосенсибилизаторами являются полиметиновые красители, которые имеют максимум поглощения в области терапевтического окна биологических тканей (700–900 нм).

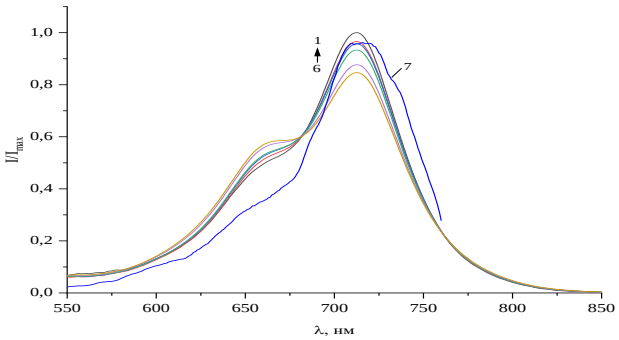
Для успешного применения новых фотосенсибилизаторов необходимо детально исследовать его спектральные свойства в средах, аналогичных по свойствам биологическим тканям. В связи с этим в данной работе представлены результаты исследования спектральных и фотофизических свойств нового специально разработанного для фотодинамической терапии нового трикарбоцианинового красителя в водном растворе, в этаноле и бутаноле, которые моделируют среды различной полярности.

Спектры поглощения полученных образцов зарегистрированы с помощью спектрофотометра PV 1251 фирмы SOLAR, рабочий диапазон длин волн которого 315–995 нм. Спектры флуоресценции и спектры возбуждения флуоресценции измерялись на модифицированном спектрофлуориметре Fluorolog. Он позволяет регистрировать спектры флуоресценции в диапазоне 265–900 нм и спектр возбуждения флуоресценции – 280–850 нм. Длительность времени затухания флуоресценции определялась с помощью спектрометрического комплекса, разработанного в лаборатории спектроскопии НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ. Он создан на основе модификации спектрофлуориметра Fluorolog.

В водных растворах наблюдается две полосы поглощения на длинах волн 656 нм и 713 нм. Наличие изобестической точки на длине волны 681 нм в спектрах поглощения (рисунок 1) при изменении концентрации красителя указывает на то, что в растворе присутствуют 2 типа поглощающих центров, коэффициенты поглощения которых на данной длине волны совпадают. Можно предположить, что раствор красителя в диапозоне концентраций от 1 мкМ до 50 мкМ представляет собой смесь мономеров и димеров. В спектрах флуорисценции красителя проявляется одна полоса, максимум которой соответствует длине волны 741 нм, а положение и форма не зависят от длины волны возбуждения. Спектр возбуждения флуоресценции красителя по форме совпадает со спектром поглощения для разбавленного раствора, в спектре проявляется только более длинноволновая полоса с максимумом на 713 нм. Это согласуется с данными, полученными в предыдущих работах, которые свидетельствуют о том, что димеры трикарбоцианиновых красителей не обладают флуоресценцией.

Таблица 1 – Спектрально-люминисцентные характеристики нового трикарбоцианинового красителя в растворе этанола и бутанола

Растворитель	λ_{abs}^{max}, нм	λ_{f}^{max}, нм	$\varepsilon \cdot 10^5$ М $\cdot$ см$^{-1}$	φ_f(20℃)	τ (20℃), нс
$C_4H_{10}O$	731	751	1,2	0,31	1,4
C_2H_6O	726	748	1,2	0,21	1,4



Цифрами 1–6 отмечены спектры, соответствующие следующим концентрациям: 0,020C; 0,053C; 0,066C; 0,079C; 0,132C; 0,168C соответственно, где $C = 1{,}0 \cdot 10^{-6}$М

Рисунок 1 – Спектры поглощения трикарбоцианинового красителя в водном растворе при изменении концентрации красителя и спектр возбуждения флуорисценции (7) красителя при концентрации $1{,}7 \cdot 10^{-7}$М

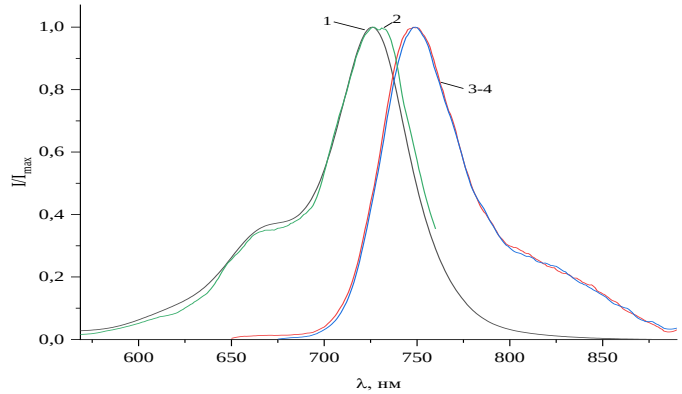


Рисунок 2 – Нормированные спектры поглощения (1), испускания флуорисценции (3–4 при длинах волн возбуждения 640 нм и 665 нм соответсвенно) и возбуждения флуоресценции (2) красителя в этиловом спирте при концентрации красителя $1,3 \cdot 10^{-5}$М

Для выяснения возможности определения концентрации красителя в биологических структурах была проведена экстракция красителя из водной среды бутанолом. Для этого к 1 мл водного раствора красителя, соответствующая концентрации $C_1 = 1{,}66 \cdot 10^{-5}$М добавляли 1 мл бутанола. После интенсивного пипетирования в течение 0,5 ч краситель переходил в органическую среду. Концентрация красителя в бутанольном экстракте составила $C_2 = 1{,}61 \cdot 10^{-5}$М, что соответствует степени экстрагирования 97,5 %.

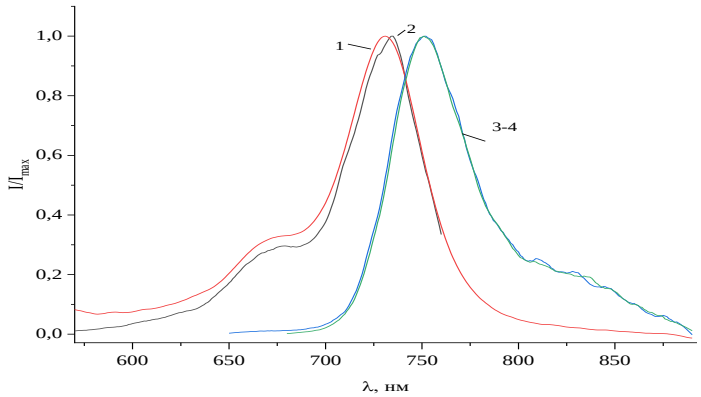


Рисунок 3 – Нормированные спектры поглощения (1), возбуждения (2) и испускания флуорисценции (3-4) красителя при длинах волн возбуждения 640 нм и 670 нм соответсвенно в бутиловом спирте при концентрации красителя $7,7 \cdot 10^{-6}$М

Список литературы

1. World Health Organization. Global tuberculosis report 2024. – Geneva : WHO, 2024. – 77 p.

This paper presents the results of a study on the spectral and photophysical properties of a new tricarbocyanine dye developed for use in photodynamic therapy against Mycobacterium tuberculosis. The properties of the dye in aqueous and alcoholic solutions (ethanol, butanol), simulating media of varying polarity, were studied using spectrophotometry, steady-state, and time-resolved fluorimetry. It was established that the spectral properties of the new tricarbocyanine dye in water at high concentrations reveal aggregation of its molecules with the formation of a monomer-dimer system. In organic solvents such as ethanol and butanol, the dye predominantly exists in the monomeric form, as evidenced by the shape and position of the absorption and fluorescence bands, as well as the single-exponential nature of the fluorescence decay kinetics of approximately 1.4 ns. Extraction of the dye from aqueous solutions using butanol was performed, ensuring its recovery with a high extraction efficiency (approximately 97.5%). The results obtained demonstrate the potential of the new tricarbocyanine dye as a photosensitizer base, which is activated by radiation corresponding to the transparency window of biological tissues

Травкина Рената Константиновна, студенка 4 курса Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, renata.travkina31@gmail.com.

Научный руководитель – *Самцов Михаил Петрович*, доктор физико-математических наук, профессор, НИИПФП им. А. Н. Севченко, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, samtsov@bsu.by.

УДК 620.22

В. С. ФЕДОСЕНКО, Г. Г. ГОРОХ

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ИСХОДНЫХ РАСТВОРОВ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ Bi–Fe–O

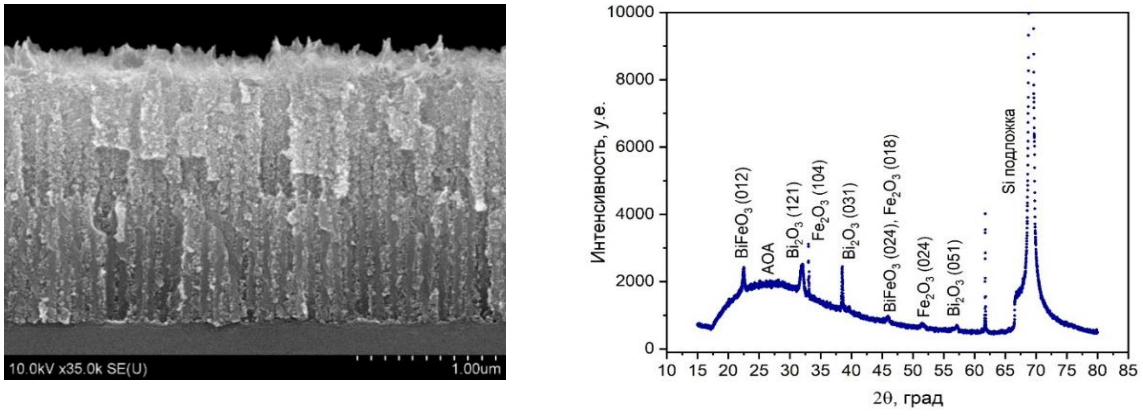
Исследовано влияние концентрации исходных растворов на структурно-фазовое состояние композитных плёнок системы Bi–Fe–O, сформированных методом ионного наслаивания в порах анодного оксида алюминия. Матрицы получали двухстадийным анодированием в 0,2 М растворе щавелевой кислоты. Осаждение проводили с использованием растворов нитратов висмута и железа с последующим отжигом при 500 °С. Методами СЭМ и рентгенофазового анализа установлено формирование пространственно упорядоченной многофазной структуры, включающей α-Bi_2O_3, α-Fe_2O_3 и $BiFeO_3$. Показано, что изменение концентрации прекурсоров влияет на процессы нуклеации, рост кристаллитов и фазовое соотношение компонентов.

Оксидные композиты системы Bi–Fe–O представляют интерес с точки зрения физики конденсированного состояния благодаря способности формировать различные структурные конфигурации, включая раздельные оксидные фазы и перовскитную фазу $BiFeO_3$, обладающую мультиферроическими свойствами. Структурные изменения сопровождаются перераспределением компонентов, изменением степени кристаллической упорядоченности и формированием межфазных границ, что определяет совокупность физических характеристик материала [1–3].

Дополнительные возможности управления структурным состоянием открываются при формировании композита в пространственно упорядоченной архитектуре. Ограничение роста фаз в объёме регулярных пор позволяет контролировать размер кристаллитов и плотность межфазных границ, а также способствует стабилизации метастабильных состояний, включая перовскитную фазу $BiFeO_3$. Использование пористых матриц анодного оксида алюминия (АОА) обеспечивает формирование пространственно упорядоченной структуры с развитой удельной поверхностью, что является благоприятным фактором для сенсорных, каталитических и мультиферроических применений.

Композитные плёнки системы Bi–Fe–O формировали в порах АОА, полученного методом двухстадийного анодирования алюминия в 0,2 М растворе щавелевой кислоты. Сформированные матрицы характеризовались регулярной пористой структурой с диаметром пор порядка 50 нм. Осаждение проводили методом ионного наслаивания. В качестве катионных прекурсоров использовали растворы нитрата висмута $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ (0,01–0,10 М) и нитрата железа $Fe(NO_3)_2 \cdot 9H_2O$ той же концентрации; стабилизацию ионов Bi^{3+} обеспечивали добавлением триэтаноламина (ТЕА). Один цикл включал выдержку в растворе $Bi(NO_3)_3$ (15 с), промывку в дистиллированной воде (5 с), обработку в подогретой до 70 °С воде (15 с), затем выдержку в растворе $Fe(NO_3)_2$ (15 с) с последующей промывкой и обработкой в подогретой воде. Количество циклов составляло 15. После завершения осаждения образцы подвергали отжигу при 500 °С.

На рисунке 1*а* представлено СЭМ-изображение поперечного сечения композита АОА/Bi_2O_3–Fe_2O_3 после 15 циклов ионного наслаивания. Из изображения видно, что поры матрицы АОА равномерно заполнены композитным материалом без формирования выраженного поверхностного слоя, что свидетельствует о преимущественном протекании осаждения внутри пор и сохранении геометрии пористой структуры. На рисунке 1*б* приведена рентгеновская дифрактограмма полученных композитных плёнок.



а *б*

Рисунок 1 – Структурно-морфологическая характеристика композитных плёнок Bi_2O_3–Fe_2O_3, сформированных в матрице анодного оксида алюминия: а) СЭМ-изображение поперечного сечения; б) рентгеновская дифрактограмма

Дифрактограмма образца характеризуется сочетанием узких кристаллических рефлексов и выраженного диффузного фона в области 20–30° по 2θ. Широкий максимум в данном диапазоне обусловлен преимущественно аморфной природой анодного оксида алюминия и свидетельствует о сохранении структуры пористой матрицы после термообработки.

На фоне диффузного максимума фиксируются кристаллические рефлексы, относящиеся к оксидным фазам системы Bi–Fe–O. Интенсивный пик при 2θ ≈ 31,8–32,0° соответствует отражению (121) моноклинной фазы α-Bi_2O_3 (PDF 41-1449, ICDD). Дополнительные рефлексы при 2θ ≈ 38,1° ((031)) и 57,1° ((051)) подтверждают присутствие данной фазы в составе покрытия. Рефлексы в областях 33,0°, 49,5° и 54–55° могут быть отнесены к гематитной фазе α-Fe_2O_3 (PDF 33-0664, ICDD), соответствуя отражениям (104), (024) и (018).

В области малых углов (2θ ≈ 22,2–22,6°) наблюдается слабый дифракционный максимум, который может быть сопоставлен с отражением (012) ромбоэдрической перовскитной фазы $BiFeO_3$ (пространственная группа R3c, PDF 86-1518). Низкая интенсивность данного пика и его расположение на фоне аморфного максимума указывают на ограниченную долю перовскитной фазы и начальный характер её формирования при выбранной температуре термообработки. В диапазоне 31–35° по 2θ наблюдается перекрытие рефлексов α-Bi_2O_3, α-Fe_2O_3 и возможных отражений $BiFeO_3$. Такое перекрытие отражает многофазный характер системы и свидетельствует о сосуществовании нескольких кристаллических модификаций в объёме композитного слоя. Интенсивные узкие пики при 2θ ≈ 61,7–61,8° и 68,9–69,2° соответствуют отражениям (311) и (400) монокристаллической кремниевой подложки (PDF 27-1402) и не связаны с фазовым составом сформированного покрытия.

Изменение концентрации растворов нитрата висмута существенно влияет на процессы нуклеации и роста фаз. При низкой концентрации (0,01 М) формируется тонкий прерывистый слой, что свидетельствует о недостаточной плотности центров кристаллизации. Низкая степень пересыщения раствора приводит к ограниченной скорости образования зародышей фазы Bi_2O_3 и замедленному росту кристаллитов. В этих условиях формируется структурно неоднородное покрытие с неполной реализацией гетерофазного взаимодействия.

При концентрации 0,05 М достигается баланс между скоростью гидролиза и диффузией ионов в объёме пористой матрицы. Стабильность комплекса Bi^{3+}–TEA обеспечивает контролируемое высвобождение ионов, что способствует равномерной нуклеации и формированию более однородной многофазной структуры. В данных условиях наблюдается более выраженная кристалличность покрытия и формирование устойчивого соотношения фаз. Дальнейшее увеличение концентрации до 0,075 М сопровождается ростом степени пересыщения и ускорением гидролитических процессов. Это приводит к увеличению скорости роста кристаллитов и их агрегации, что отражается в укрупнении зеренной структуры и снижении морфологической однородности покрытия. Усиление объёмного гидролиза вызывает конкуренцию гетерогенного осаждения на подложке и образования частиц в объёме раствора, что влияет на структурное состояние формируемой системы. При концентрации 0,10 М осаждение практически не реализуется вследствие потери устойчивости комплекса Bi^{3+}–TEA и усиления объёмного гидролиза. Образование нерастворимых соединений в растворе приводит к подавлению селективного формирования оксидного слоя и нарушению механизмов направленного роста.

Полученные результаты показывают, что варьирование концентрации прекурсоров оказывает существенное влияние на процессы нуклеации, рост кристаллитов и фазовое соотношение в системе Bi–Fe–O. Использование пористых матриц анодного оксида алюминия в сочетании с методом ионного наслаивания позволяет получать пространственно упорядоченные наноструктурированные композиты с развитой межфазной границей. Предложенный подход создаёт условия для управляемого формирования структурно-фазового состояния системы Bi–Fe–O и может быть использован для целенаправленного получения функциональных оксидных материалов.

Список литературы

1. Multiferroic behavior of the functionalized surface of a flexible substrate by deposition of Bi_2O_3 and Fe_2O_3 / S. Ramazanov, A. A. Guseinov, R. S. Mammadov [et al.] // Microscopy Research and Technique. – 2022. – Vol. 85, № 4. – P. 1300–1310.

2. Structure, performance, and application of $BiFeO_3$ nanomaterials / N. Wang, Y. Chen, X. Li [et al.] // Nano-Micro Letters. – 2020. – Vol. 12, № 1. – P. 81.

3. Nayak A. K. Phase- and crystal structure-controlled synthesis of Bi_2O_3, Fe_2O_3, and $BiFeO_3$ nanomaterials for energy storage devices / A. K. Nayak, T. Gopalakrishnan // ACS Applied Nano Materials. – 2022. – Vol. 5, № 10. – P. 14663–14676.

Bi–Fe–O oxide composites are of interest due to the formation of multiphase structures, including the perovskite phase $BiFeO_3$. The precursor concentration influences nucleation, crystallization and phase composition of the coatings. Porous anodic alumina matrices provide spatial confinement and promote ordered nanostructure formation. In this work, the effect of precursor concentration on the structural and phase state of Bi–Fe–O nanocomposites prepared by ionic layer deposition was studied.

Федосенко Владимир Сергеевич, аспирант кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатки и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, v.fedosenko@bsuir.by.

Научный руководитель – *Горох Геннадий Георгиевич,* кандидат технических наук, заведующий НИЛ 4.10 «Нанотехнологии» НИЧ Белорусского государственного университета информатки и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, gorokh@bsuir.by.

УДК 535.37+546.06

М. В. ХОМБАК, В. В. КРЮКОВ, А. А. РОМАНЕНКО, О. С. КУЛАКОВИЧ

СИНТЕЗ ПЕРОВСКИТНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ СОСТАВА $CsPbBr_xI_{3-x}$ И ИХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА

В данной работе рассмотрено влияние 3-меркаптопропилтриметоксисилана (MPTMS) в качестве лиганда для постсинтетической стабилизации нанокристаллов (НК) $CsPbBr_xI_{3-x}$. Изучена возможность варьирования максимума фотолюминесценции НК с помощью допирования ионами Br^-. Показано, что стабильность допированных бромид-ионами перовскитов сохраняется в течение 12 недель.

Перовскиты на основе галогенидов свинца цезия зарекомендовали себя в качестве высокоэффективных излучающих структур благодаря высокому квантовому выходу фотолюминесценции (ФЛ) и термостабильности. Данные преимущества позволяют их применять при создании солнечных элементов, светодиодов, светочувствительных фотодетекторов [1]. Однако, недостаточная термодинамическая и химическая стабильность ограничивают потенциальное применение нанокристаллов перовскитов. В настоящей работе проведено исследование влияния условий синтеза (соотношения галогенид-ионов, химического состава лигандов) нанокристаллов состава $CsPbBr_xI_{3-x}$ на их фотолюминесцентные свойства.

Для синтеза нанокристаллов $CsPbBr_xI_{3-x}$ использовался метод горячей инжекции [2]. Предварительно был синтезирован олеат цезия (CsOA), получаемый при смешении и последующем нагреве 61.1 мг карбоната цезия (Cs_2CO_3) и 241 мкл олеиновой кислоты (OA), при использовании 3 мл октадецена-1 в качестве растворителя. В дальнейшем смешивали 1 мл олеиламина (OLA), 1 мл OA, 10 мл октадецена-1 с добавлением PbI_2 (173.5 мг) либо смеси PbI_2 и $PbBr_2$ для получения различных соотношений галогенид ионов в НК. Затем добавляли CsOA (0.8 мл) и после 5 секунд протекания реакции смесь охлаждали на ледяной бане. Для стабилизации синтезированных перовскитных нанокристаллов использовался MPTMS в дополнение к используемому по методике [2] OLA. Данный лиганд зарекомендовал себя в качестве перспективного постсинтетического стабилизатора в случае перовскитов состава $CsPbBr_3$ [3], поэтому был выбран для исследования эффективности в случае НК $CsPbBr_xI_{3-x}$. При исследовании влияния концентрации лигандов на стабильность дисперсий варьировали количество добавляемого MPTMS от 0.25x до 4x, где x – добавляемый объем лиганда, равный 149 мкл.

Показано, что более стабильные НК формируются при концентрации лиганда в области средних значений (1x – 2.5x), крайние значения 0.25x, 4x приводят к быстрому переходу НК в «неперовскитную» нелюминесцирующую фазу.

Анализ возможностей варьирования длины волны ФЛ с помощью изменения химического состава нанокристаллов проводился с помощью допирования НК бромид-ионами. В результате было установлено, что происходит характерный сдвиг в коротковолновую область спектра с уменьшением соотношения исходных концентраций $[I^-]$:$[Br^-]$, равных 2.85:0.15; 2.7:0.3; 2.55:0.45; 2:1, соответственно (рис. 1а). Кинетики затухания ФЛ представлены на рисунке 1б, анализ фотолюминесцентных характеристик дисперсий НК − в таблице 1.

Полученные НК сохраняют свои фотолюминесцентные характеристики на протяжении 3-12 недель. На стабильность образцов влияет хранение на воздухе, поскольку вода и кислород вызывают образование поверхностных дефектов, что ускоряет переход НК из люминесцирующей α-фазы в δ-фазу $CsPbBr_xI_{3-x}$ [1].

Таблица 1 – Фотолюминесцентные характеристики перовскитных НК при изменении соотношения галогенид-ионов.

НК с различным соотношением $[Br^-]$:$[I^-]$ исходных реагентов при концентрации MPTMS 2x	Квантовый выход ФЛ, %	Среднее время затухания ФЛ, нс	Полуширина спектра ФЛ, нм	Максимум длины волны ФЛ, нм
$CsPbI_3$	75	40	33	686
$CsPbBr_{0.15}I_{2.85}$	76	22	32	677
$CsPbBr_{0.3}I_{2.7}$	79	24	32	674
$CsPbBr_{0.45}I_{2.55}$	65	44	33	674
$CsPbBrI_2$	76	17	33	635

В результате были получены НК перовскитов состава $CsPbBr_xI_{3-x}$, покрытые оболочкой MPTMS, люминесцирующие в красной области спектра (635–690 нм) с квантовым выходом ФЛ до 80 %. Стабильность дисперсий на воздухе без изменения люминесцентных характеристик составила до 12 недель.

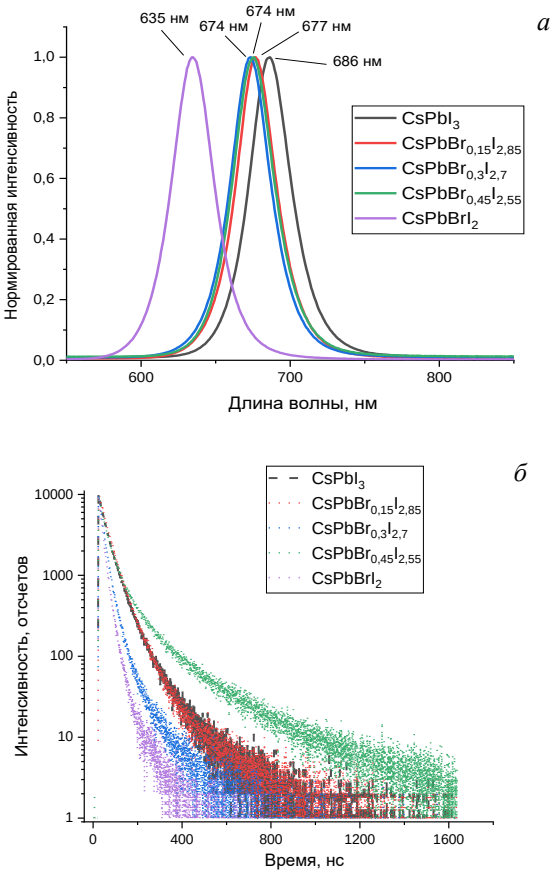


Рисунок 2 – Спектры ФЛ перовскитных НК с разным соотношением галогенид-ионов ($\lambda_{возб}$ = 535 нм) (а) и их кинетики затухания ФЛ ($\lambda_{возб}$ = 405 нм) (б)[8]

Список литературы

1. Stabilizing CsPbI3 perovskite for photovoltaic applications / X. Tan, S. Wang, Q. Zhang [et al.] // Matter. – 2023. – Vol. 6. – № 3. – P. 691-727.

2. Nanocrystals of Cesium Lead Halide Perovskites ($CsPbX_3$, X = Cl, Br, and I): Novel Optoelectronic Materials Showing Bright Emission with Wide Color Gamut / L. Protesescu, S. Yakunin, M. I. Bodnarchuk [et al.] // Nano Letters. – 2015. – Vol. 15. – № 6. – P. 3692-3696.

3. Thiol ligands engineering for long-term luminescence efficiency of perovskite nanocrystals / V. Krukov, A. Ramanenka, A. Rotkovich [et al.] // Journal of Nanoparticle Research. – 2025. – Vol. 27. – № 8. – P. 200.

In this work, the effect MPTMS as a ligand for the post-synthetic stabilization of $CsPbBr_xI_{3-x}$ nanocrystals (NCs) has been investigated. The possibility of tuning the photoluminescence wavelength of the NCs through Br^- doping has been studied. It is shown that the stability of the perovskites has been maintained for 12 weeks.

Хомбак Максим Валерьевич, магистрант 1 курса, Университет Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь, maxim.hombak@dragon.bas-net.by.

Крюков Виталий Валерьевич, Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, v.krukov@dragon.bas-net.by.

Романенко Андрей Алексеевич, Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, a.ramanenka@ifanbel.bas-net.by.

Научный руководитель – *Кулакович Ольга Сергеевна*, кандидат химических наук, доцент, Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, o.kulakovich@ifanbel.bas-net.by.

[8]Работа выполнена при финансовой поддержке проекта БРФФИ № Ф25МЭ-001.

УДК. 535.333

Д. М. ЧУМАЧЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ БЕНЗТИАЗОЛОВОГО КРАСИТЕЛЯ Th-C7 ПРИ ВСТРАИВАНИИ В БЕЛОК БСА

Исследованы спектральные свойства водного раствора бензтиазолового красителя Th-C7 в присутствии белка плазмы крови бычьего сывороточного альбумина (БСА). Увеличение концентрации белка ведет к усилению флуоресценции, что говорит о возрастании квантового выхода данного красителя. Объяснение дано на основе предположения о том, что Th-C7 является молекулярным ротором и при встраивании в белковую структуру блокируется торсионное вращение его фрагментов.

Введение. Значительный интерес для современной спектроскопии представляют флуорофоры, обладающие свойствами молекулярных роторов. Особенным свойством данных соединений является безызлучательная релаксация возбужденного состояния, обусловленная конформационной подвижностью фрагментов молекулы и переходом в состояние с внутримолекулярным переносом заряда (TICT-состояние, Twisted Intramolecular Charge Transfer). Переход в TICT-состояние и перенос заряда является тушащим процессом для флуоресценции. При переносе заряда происходит поворот фрагментов молекулы, в результате чего она принимает скрученную конформацию. Такой класс красителей активно используют как флуоресцентные маркеры для разного рода исследований [1].

Методика исследования. В исследовании представлена молекула бензтиазолового красителя, монокарбостирил-бензтиазола (Th-C7) с линкерной карбоксильной группой (рис. 1). Для регистрации спектров флуоресценции использовался спектрофлуориметр СМ2203 (СОЛАР, РБ). Спектры поглощения регистрировали с помощью спектрофотометра Specord M200 (Карл Цейсс, Германия). В качестве растворителя использована бидистиллированная вода.

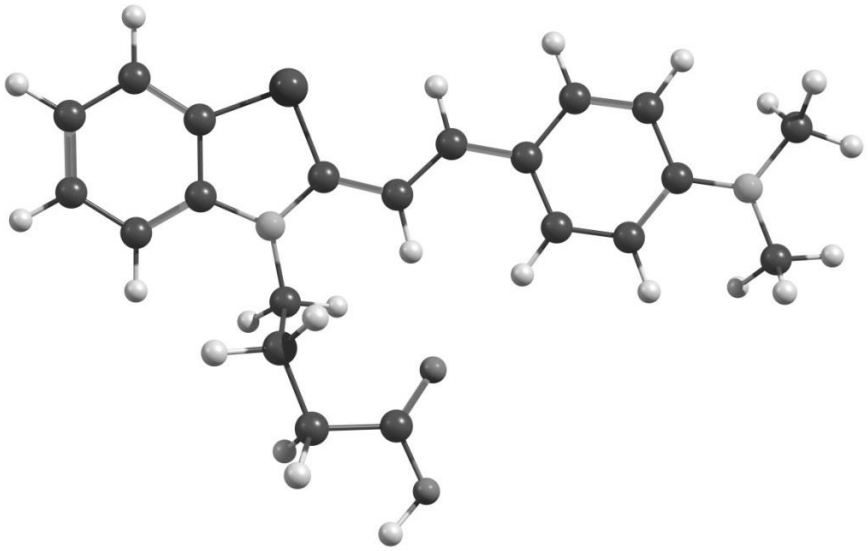


Рисунок 1 – Соединение Th-C7

Результаты. В данной работе исследовано влияние БСА на спектры поглощения и квантовый выход флуоресценции Th-C7. Как можно наблюдать на рисунке 2, добавление в раствор белка и последующее увеличение его концентрации практически не влияет на оптическую плотность и положение спектра красителя. Изменения в оптической плотности составили порядка 0,002 отн. ед., поэтому изменения флуоресценции связаны именно с изменением концентрации белка. Концентрация красителя в ходе всего исследования не изменялась и составляла $C = 2 \cdot 10^{-6}$ моль/л.

Для таких молекул, как Th-C7, обладающих свойствами молекулярного ротора [2], ключевым процессом, происходящим при встраивании в белковые молекулы, является ингибирование перехода в TICT-состояние, которое отвечает за тушение флуоресценции. В свободном состоянии в водном растворе молекула Th-C7 имеет крайне слабую флуоресценцию (рис. 3). Ввиду того, что вращение молекулы никак не ограничено, происходит свободный перенос заряда, и интенсивность флуоресценции незначительная. При добавлении 0.5 мг/мл БСА происходит рост флуоресценции практически в два раза. Дальнейшее увеличение концентрации белка приводит к еще большему увеличению интенсивности флуоресценции, что отражает увеличение количества молекул, встроенных в белковую структуру. Мы полагаем, что механизм встраивания красителя в белок такой же, как и у тиофлавина Т (ThT), так как Th-C7 является его производной [3].

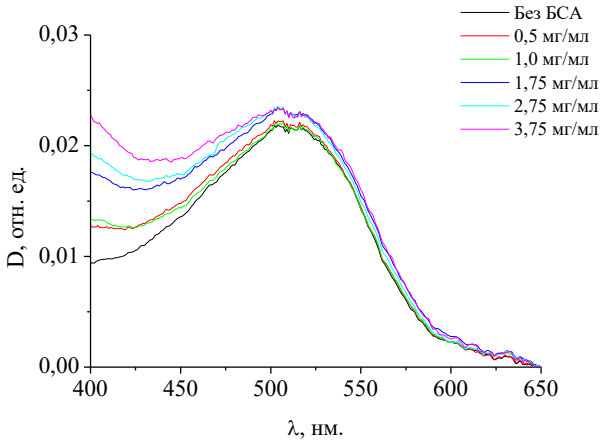


Рисунок 2 – Спектр поглощения Th-C7 при добавлении БСА 0.5 – 3.75 мг/мл

При встраивании в белок ранее свободное торсионное вращение фрагментов молекулы красителя ограничивается. Это приводит к уменьшению тушащего процесса, вследствие чего происходит существенное увеличение интенсивности флуоресценции.

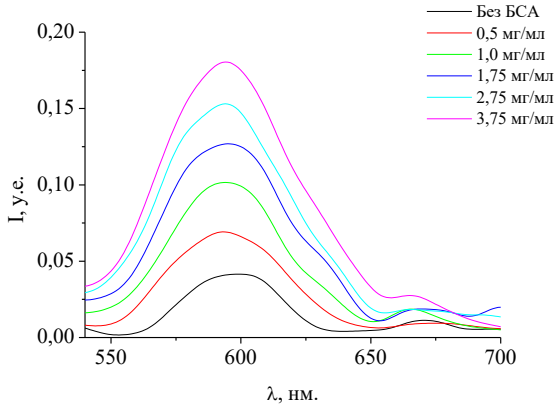


Рисунок 3 – Спектр флуоресценции Th-C7 при добавлении БСА 0.5 – 3.75 мг/мл, $\lambda_{возб.}$ = 490нм

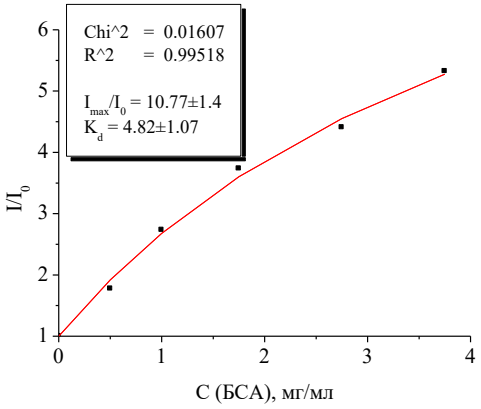


Рисунок 4 – Зависимость отношения I/I_0 для Th-C7 от концентрации БСА

Для количественной характеристики процесса связывания красителя с белком построена концентрационная зависимость I/I_0, где I – интегральная интенсивность флуоресценции, I_0 – интегральная интенсивность флуоресценции красителя без добавления белка. Полученная зависимость (рис. 4) имеет нелинейный характер. Такая зависимость как раз типична для процессов, связанных с образованием комплексов краситель-белок. Это свидетельствует о связывании молекул Th-C7 и белка БСА с последующей блокировкой торсионной релаксации красителя. Аппроксимация нелинейной зависимости проводилась с помощью модели связывания 1:1:

$$\frac{I}{I_0} = 1 + \frac{\left(\frac{Imax}{I_0} - 1\right) \cdot C_{БСА}}{K_d \cdot C_{БСА}},$$

где I_{max} – максимальное усиление интенсивности, $C_{БСА}$ – концентрация БСА, K_d – константа диссоциации. Анализ данной зависимости показал, что максимальное усиление флуоресценции для данной концентрации красителя составляет I_{max}/I_0 = 10.77, что говорит о возможном росте флуоресценции почти в 11 раз. Такой рост доказывает высокую чувствительность Th-C7 как молекулярного зонда к изменению микроокружения. Константа диссоциации составила около K_d = 4.82 мг/мл. Данное значение указывает на формирование устойчивого комплекса краситель-белок.

Заключение. Выполненные исследования показывают, что краситель Th-C7, проявляющий свойства молекулярного ротора, эффективно связывается с белком БСА. При концентрации белка более 4.0 мг/мл интенсивность флуоресценции красителя увеличивается более чем на порядок. Исследование показывает, что данное соединение имеет хорошую перспективу использования в качестве флуоресцентного зонда для исследования и детекции белков.

Список литературы

1. Haidekker, M. A. Environment-sensitive behavior of fluorescent molecular rotors / M. A. Haidekker, E. A. Theodorakis // Organic & Biomolecular Chemistry. – 2007. – Vol. 5, № 11. – P. 1669–1678.

2. Физика конденсированного состояния – 2025 : материалы XXXIII Междунар. науч.-практ. конф. аспир., магистр. и студ., 3–4 апр. 2025 г., Гродно / ГрГУ им. Янки Купалы ; редкол.: Г. А. Гачко (гл. ред.), Н. Г. Валько, С. С. Ануфрик, А. А. Маскевич, А. Е. Герман. – Гродно : ГрГУ, 2025. – С. 108–110.

3. Spectral Properties of Thioflavin T in Solvents with Different Dielectric Properties and in a Fibril-Incorporated Form / A. A. Maskevich, V. I. Stsiapura, V. A. Kuzmitsky [et al.] // Journal of Proteome Research. – 2007. – Vol. 6, № 4. – P. 1392–1401.

The study examined the effect of BSA protein added to a solution containing the Th-C7 dye. Increasing the protein concentration leads to increased fluorescence, indicating an increase in the quantum yield of this dye in the presence of the protein. This finding is explained by the assumption that the torsional rotation of the molecular rotor is blocked.

Чумаченко Даниил Михайлович; аспирант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета им. Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, chumachenko.daniil1@gmail.com.

Научный руководитель – *Маскевич Александр Александрович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета им. Янки Купалы г. Гродно, Республика Беларусь, amaskevich@grsu.by.

УДК 535.015

С. В. ШЕВЧИК, А. А. КУСТАНОВИЧ

СОЛЮБИЛИЗАЦИЯ CdSe/ZnS КВАНТОВЫХ ТОЧЕК НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ

Применение квантовых точек (КТ) CdSe/ZnS в качестве флуоресцирующих меток в биомедицине требует их перевода в водно-буферные растворы. В данной работе решается задача солюбилизации гидрофобных квантовых точек, стабилизированных триоктилфосфином (ТОФ), методом лигандного обмена на тиолсодержащие поверхностно-активные вещества (ПАВ) ионогенными группировками. Для достижения поставленной задачи применен метод солюбилизации КТ на поверхности раздела фаз двух несмешивающихся жидкостей – воды и хлороформа. Полученные дисперсии отличаются оптической прозрачностью и высокой стабильностью к агрегации в диапазоне pH от 10 до 4.

Последние десятилетия ознаменованы бурным прогрессов в понимании физико-химических свойств и путей всестороннего применения люминесцентных квантовых точек в биомедицинских исследованиях. Подтверждением тому является тот факт, что 2023 году нобелевская премия по химии присуждена Алексею Екимову, Луису Брюсу и Мунги Бавенди за открытие и синтез квантовых точек – наночастиц, размер которых определяет их свойства. На рисунке 1 приведены спектры оптической плотности (рис. 1, а) и фотолюминесценции (рис. 1, б) КТ CdSe/ZnS разных размеров от 4, до 2,1 нм. На этом рисунке видно, что край поглощения и положение максимума полосы фотолюминесценции (ФЛ) плавно изменяются. В соответствии с квантово-размерным эффектом эти параметры смещаются в коротковолновую область с уменьшением размеров наночастиц. Основными и давно признанными преимуществами КТ по сравнению с органическими красителями являются их (1) высокая фотостойкость, (2) мультицветовой набор хорошо разделенных свечений при использовании одного единственного источника возбуждения (рис. 1, а, вставка) и (3) высокая яркость. Ведутся активные работы по сопряжению КТ с моноклональными антителами [1] для использования в высокоэффективном иммуногистохимическом анализе и визуализации [2] биологических тканей.

Было показано, что КТ CdSe/ZnS, могут выступать [3] в качестве неспецифических красителей для биопсии тканей в клинической морфологии даже без дополнительной конъюгации. Помимо известных флуоресцентных свойств, эти наночастицы открывают новые возможности в качестве локальных pH-зондов в биологических тканях [4]. Данное функциональное свойство обусловлено высокой чувствительностью их флуоресцентных спектров к полярности окружающей среды, что проявляется в сдвигах полос поглощения и испускания при изменении pH водного растворителя.

Первоочередной задачей применения КТ в биомедицинском анализе требует их диспергирование в водно-буферных растворах, тогда как сразу после синтеза поверхность нанокристаллов покрыта остатками триоктилфосфина – гидрофобного растворителя, применяемого в высокотемпературном синтезе. Из-за этого КТ диспергируются исключительно в органических средах (хлороформ, толуол и др.). Для переноса в воду необходим лигандный обмен: замена ТОФ на ионогенные ПАВ, содержащие серу для связывания с поверхностью и ионогенную группу, экспонируемую в водную фазу.

Процесс замещения лигандов на границе раздела фаз часто сопровождается снижением квантового выхода фотолюминесценции и риском агрегации нанокристаллов. Поэтому ключевой задачей является подбор таких ПАВ и условий переноса (pH, концентрация), которые позволят сохранить малый гидродинамический диаметр

частиц и высокий квантовый выход фотолюминесценции. Решение этой задачи открывает возможность использования гидрофильных КТ в качестве чувствительных маркеров для онкодиагностики.

Материалы и методы.

В работе использовали гидрофобные КТ CdSe/ZnS со средними размерами 3,2 и 4,0 нм, стабилизированные триоктилфосфином. В качестве гидрофилизующего агента применяли ионогенное поверхностно-активное вещество – цистеамин.

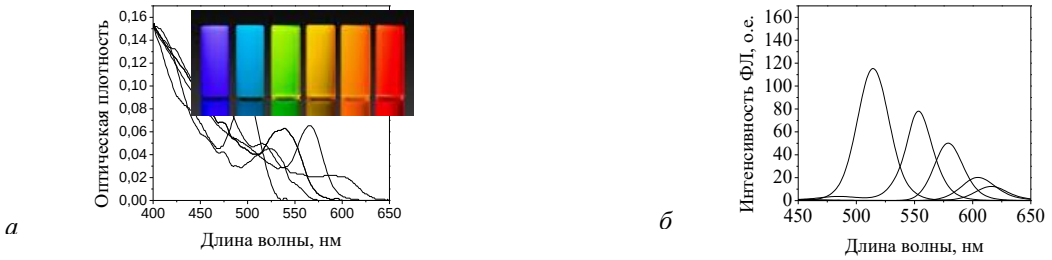
Исходные КТ растворяли в хлороформе (2мл). Для удаления избытка ТОФ часть образца (2/3 объёма) подвергали предварительной очистке: добавляли эквивалентный объём метанола с последующим центрифугированием при 7500 об/мин в течение 10 мин. Надосадочную фракцию, содержащую неосевшие КТ в смеси хлороформа и метанола, отделяли и использовали для дальнейшей солюбилизации. Оставшуюся часть КТ (1/3 объёма) не отмывали метанолом и использовали в эксперименте без предварительной обработки.

Исходя из геометрических размеров КТ, их молярной массы и исходной концентрации в хлороформе, было рассчитано необходимое количество цистеамина. В первой серии экспериментов концентрация цистеамина составляла ~160 молекул на одну квантовую точку. Для этого навеску цистеамина (40 мг) растворяли в 3 мл деионизованной воды.

Солюбилизацию проводили на границе раздела фаз в системе неполярный растворитель (хлороформ или толуол, содержащий КТ) – полярная фаза (водный раствор цистеамина) [5]. В подготовленный водный раствор цистеамина вносили 2 мл раствора КТ (очищенных или неочищенных). Бинарную систему инкубировали в темноте при температуре выше 18℃ в течение 12 ч, в течение которых наблюдали самопроизвольный переход нанокристаллов из нижней органической фазы в верхнюю водную фазу (рис. 2).

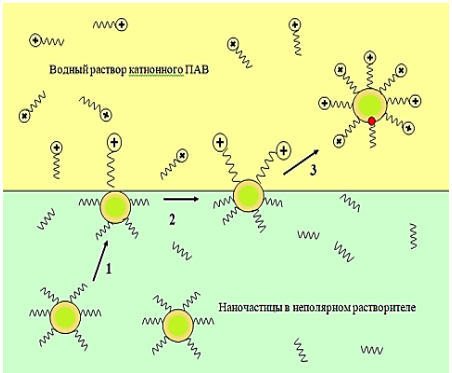
При понижении температуры окружающей среды ниже 18℃ для инициации переноса требовалась дополнительная активация. В этом случае реакцию проводили при ультразвуковом (УЗ) воздействии и одновременном нагреве: реакционный сосуд с бинарной смесью помещали в ультразвуковую ванну на несколько часов. Совместное действие УЗ-перемешивания и нагрева индуцировало спонтанный переход КТ в водную фазу.

Очистку полученных гидрозолей КТ от избытка несвязанного цистеамина проводили центрифугированием при 500 об/мин в течение 5 минут с последующим удалением супернанта. Полученные дисперсии оптически прозрачны и сохраняют седиментационную устойчивость в интервале pH от 4 до 10.



а) спектры оптической плотности; (б) спектры ФЛ; $\lambda_{ex}^{fl} = 400$ нм

Рисунок 1 – Электронные спектры наночастиц CdSe/ZnS в толуоле



Стрелки на рисунке: 1–2 – движение КТ у поверхности раздела с одновременным замещением ТОФ на цистеамин; 3 – диффузия КТ в водную фракцию и последующее замещение ПАВ.

Рисунок 2– Реакция на границе раздела фаз двух несмешивающихся жидкостей наночастиц в неполярном растворителе (внизу) и водного раствора катионного ПАВ (цистеамина) вверху

Полученные фракции CdSe/ZnS КТ были отобраны для проведения дальнейших исследований, результаты которых представлены в докладе «Применение CdSe/ZnS для оценки pH флуоресцентным методом» А. А. Кустановича и С. В. Шевчик[9].

Список литературы

1. Brazhnik K., Nabiev I., Sukhanova A. Oriented conjugation of single-domain antibodies and quantum dots. Quantum Dots: Applications in Biology. *Humana Press*, New York, NY, 2014; P. 129-140.

2. Grodzinski P, Silver M, Molnar LK. Nanotechnology for cancer diagnostics: promises and challenges. *Expert Rev Mol Diagn* 2006;6:307A318.

3. Motevich I., Strekal N., Shulha A., Maskevich S. Spectrophotometric determination of the characterictic of stromal and parenchymal components of colon tumor. *Journal of applied spectroscopy*. 2016:83:234-239.

4. Флуоресцентные наночастицы CdSe/ZnS как нанозонды локального pH в диагностике онкологических заболеваний / И. Г. Мотевич [и др.] // Оптика и спектроскопия = Optics and Spectroscopy. – 2018. – Т. 124. – № 5. – С. 605-611.

5. Strekal N., Maskevich S. patent « Method for modifying the surface of CdSe/ZnS nanoparticles « 17735 BY. 2013.

Шевчик Сусанна Владимировна, студентка 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета им. Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, shevchik_sv_25@student.grsu.by;

Кустанович Артём Анатольевич, студент 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета им. Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, kustanovich_aa_25@student.grsu.by;

Научный руководитель – *Стрекаль Наталья Дмитриевна*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета им. Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, strekal@grsu.by.

УДК 535.8

Д. И. ШТЫРЁВ

РЕЛЬЕФНЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ

На основе полимерного материала с боковыми антраценовыми группами были оптимизированы условия голографической записи и созданы рельефно-фазовые пропускающие дифракционные элементы для формирования фазовых сингулярных пучков с заданными топологическими зарядами. Проведен анализ фазовой топологии восстановленных оптических вихрей с использованием жидкокристаллической линзы Френеля и исследована зависимость дифракционной эффективности пропускающих решеток от длины волны восстанавливающего пучка. Полученные результаты демонстрируют перспективность применения предложенного полимерного материала для создания высокоэффективных мультиплексных элементов для использования во многих приложениях современной фотоники.

Среди множества пространственно структурированных полей можно выделить оптические вихри за счет своих необычайных свойств. Это сингулярные световые пучки, которые переносят орбитальный угловой момент фотонов, а также характеризуюся наличием ядра (дислокации) и винтовой структурой волнового фронта в окрестности этой дислокации. Оптические вихри нашли свое применение в манипулировании микрообъектами, в системах оптической связи, в лазерной обработке и т.д. Поэтому остается актуальной задача разработки эффективных методов формирования таких пучков. Одним из таких методов, используемый в настоящей работе, является запись голографической дифракционной решетки с, так называемой, вилочной дислокацией [1].

Поиск новых сред и разработка на их основе методов голографической записи решают задачу создания пассивных, высокоэффективных, мультиплексных элементов (формирующие фазовые сингулярные пучки) недостижимых другими методами (фотолитография, пространственные ЖК модуляторы, q-пластинки и др.).

В работе исследованы условия эффективной голографической записи оптических вихрей на основе полимерных материалов с боковыми антраценовыми группами. Фотоокисление молекул антрацена в полимерных стеклах нашло применение при создании фоторегистрирующих материалов объемно- и рельефно-фазового типов [2]. Фазовый отклик в среде происходит за счет фотосенсибилизаторов (метиленовый синий) для генерации синглетного кислорода, которые позволяют сдвинуть границу фоточувствительности в длинноволновую область. Фотоокисление приводит к фоторефракции в объеме и образованию на поверхности слоя фоторельефа. Последний процесс особенно эффективен для тонких слоев при стимуляции набуханием в жидком углеводороде с последующей сушкой.

В ходе работы была проведена оптимизация параметров голографических методов создания рельефных пропускающих дифракционных элементов на основе полимерных материалов с боковыми антраценовыми

[9]Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф26РНФ-173).

группами (толщина слоя составляла порядка 1 мкм). Запись голограммы проводилась по схеме Лейта-Упатниекса [3]. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

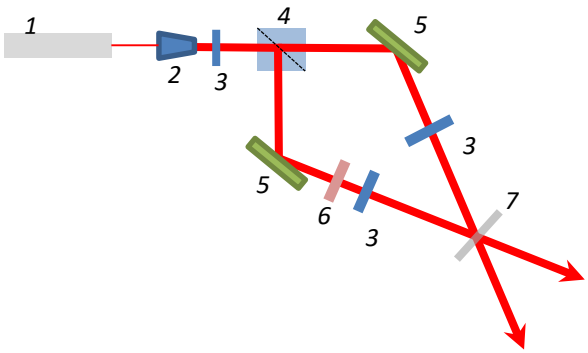
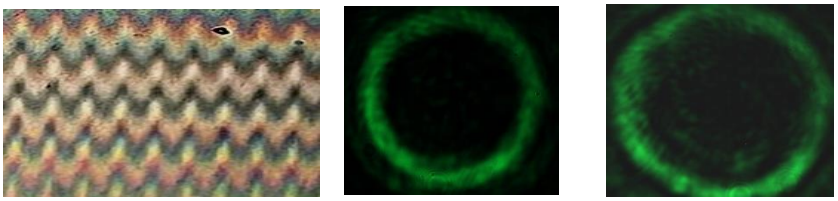


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Излучение He-Ne *1* на длине волны генерации 633 нм проходило систему «микрообъктив-пинхол» *2* амплитудно делилось (1/2) делительным кубиком *4* на два плеча, лазерное излучение в которых при помощи зеркал *5* сводилось в плоскости пластинки *7*. Помещенная в одно из плеч спиральная фазовая пластинка *6* формировала предметную волну в виде фазового сингулярного пучка. Полуволновые пластинки *3* обеспечивали равенство мощности интерферирующих волн и их вертикальную линейную поляризацию.

Морфология рельефа поверхности голографической решетки оценивалась по интерференционной картине когерентного сложения опорного (отраженного от гладкого эталона) и предметного (отраженного от исследуемой поверхности) пучков, наблюдаемой в интерференционном микроскопе. Фазовая топология восстановленных оптических вихрей экспериментально анализировались с использованием жидкокристаллической (ЖК) электрически управляемой линзы Френеля [4].

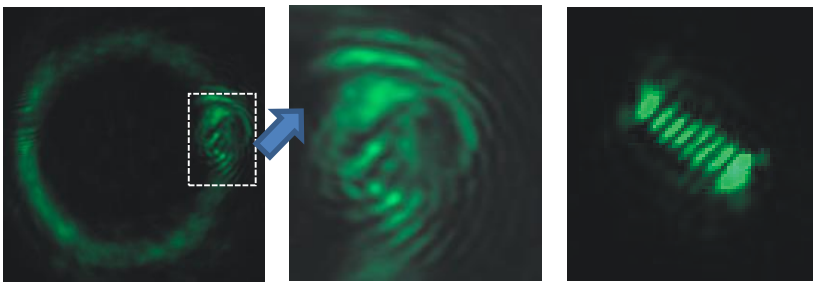
На рисунке 2 представлены результаты исследований голографической записи рельефно-фазовой голограммы с топологическим зарядом $l = +7$ (глубина рельефа 0,17 мкм) и фотографии оптических вихрей, образованных при дифракции гауссового пучка (532 нм) в +1(ДЭ 19 %), +2 порядки дифракции



а *б* *в*

Рисунок 2 – Рельеф решетки (*l* = +7, интерференционный микроскоп) (а); восстановленные оптические вихри +1(б), +2 (в) порядки дифракции

Результаты экспериментального анализа фазовой топологии образованного в 1-м порядке дифракции оптического вихря с зарядом $l = +7$ представлены на рисунке 3.



а *б* *в*

Рисунок 3 – Результат анализа оптического вихря с топологическим зарядом *l* = +7:
а) линза Френеля (интерференция пучков 0-го и +1-ого порядков);
б) линза Френеля в Фурье-плоскости с внесенным астигматизмом

С использованием параметрического генератора излучения была исследована зависимость дифракционной эффективности рельефной дифракционной решетки в первом порядке дифракции от длины волны восстанавливающего пучка. На рисунке 4 представлены фотографии оптических вихрей, образованных при дифракции гауссового пучка в +1 порядки дифракции для 500 нм (ДЭ 23 %), 600 нм (ДЭ 14 %), 800 нм (ДЭ 10 %), 900 нм (ДЭ 8 %).

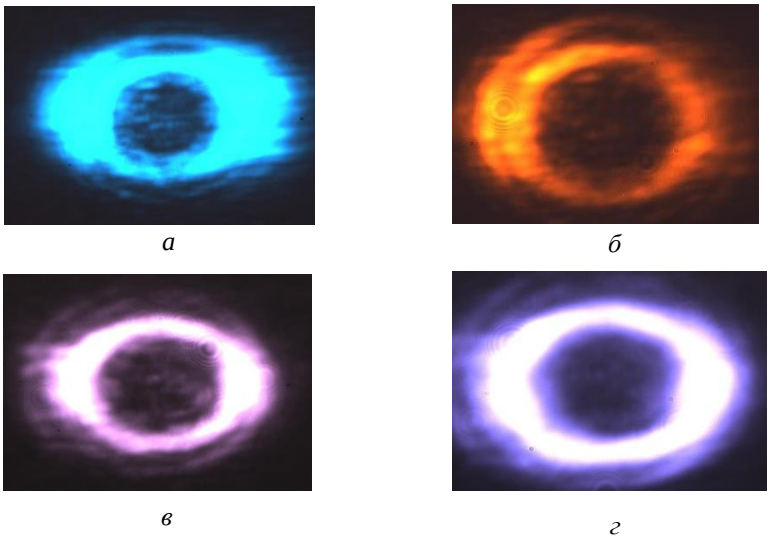


Рисунок 4 – Восстановленные оптические вихри $l = +7$ **опорными пучками разных длин волн: 500 нм (а), 600 нм (б), 800 нм (в), 900 нм (г)**

Теоретическая зависимость дифракционной эффективности от длины волны описывается квадратом функции Бесселя первого рода, аргумент которой определяется фазовым набегом световой волны [5]. На рисунке 5 представлены результаты теоретического и экспериментального исследования дифракционной эффективности рельефно-фазовой голограммы от длины волны.

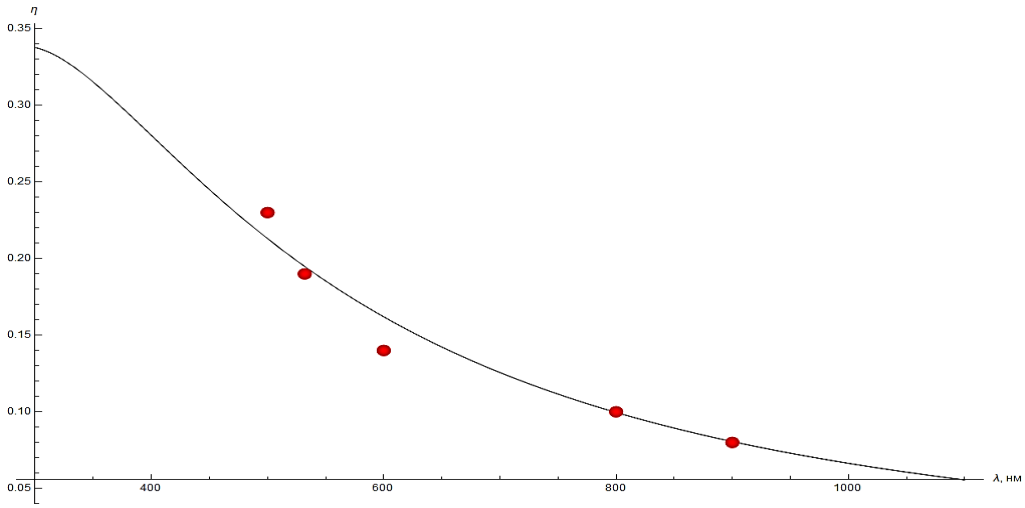


Рисунок 5 – Теоретическая зависимость ДЭ пропускающей рельефной дифракционной решетки от длины волны восстанавливающего пучка с отмеченными экспериментальными точками для $l = +7$

Проведенные экспериментальные исследования показали, что использование полимерного материала с боковыми антраценовыми группами в качестве голографической среды позволило реализовать эффективную запись ДОЭ, представляющего рельефно-фазовую вортекс-голограмму. Полученные результаты демонстрируют перспективность применения предложенного полимерного материала для создания высокоэффективных мультиплексных элементов современной фотоники.

Список литературы

1. Bazhenov, V. Yu. Laser beams with screw dislocations in their wavefronts / V. Yu. Bazhenov, M. V. Vasnetsov, M. S. Soskin // JETP Lett. – 1990. – Vol. 52, № 8. – P. 429–431.
2. Могильный В. В. Фоточувствительный полимерный материал для объемно- и рельефно-фазовой голографической записи в широкой спектральной области / В. В. Могильный, Д. Е. Стасевич, Э. А. Храмцов, А. П. Шкадаревич // Журнал прикладной спектроскопии. – 2025. – Т. 92, № 2. – С. 246–254.
3. Leith, E. N. Reconstructed Wavefronts and Communication Theory* / E. N. Leith, J. Upatnieks // J. Opt. Soc. Am., JOSA. – 1962. – Vol. 52, № 10. – P. 1123–1130.
4. Phase Topology Stability of an Optical Vortex via an Electrically Controlled Twist-Planar Oriented Liquid Crystal Fresnel Lens / E. Melnikova, K. Pantsialeyeva, D. Gorbach [и др.] // arXiv:2506.02632 [physics]. – arXiv, 2025.
5. Кольер, Р.Дж. Оптическая голография / Р. Дж. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин ; пер. с англ. ; под ред. Ю.И. Островского. – М. : Мир. Редакция литературы по физике, 1973. – 698 с.

Relief-phase transmitting diffraction elements for the generation of phase singular beams with predefined topological charges were fabricated using a polymer material with pendant anthracene groups. The holographic recording conditions were optimized for this material. The phase topology of the reconstructed optical vortices was analyzed using a liquid crystal Fresnel lens, and the dependence of the diffraction efficiency of the transmitting gratings on the wavelength of the reconstructing beam was investigated. The obtained results demonstrate the potential of the proposed polymer material for the creation of highly efficient multiplexed elements for various applications in modern photonics.

Штырёв Денис Игоревич, студент 4 курса Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, fiz.shtyrev@bsu.by.

Научный руководитель – *Мельникова Елена Александровна*, доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, Melnikova@bsu.by.

УДК 537.528;536.421.5

А. Р. ШУМЕЙКО, Е. А. НЕВАР

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКА ТС4 ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ОБРАБОТКИ

Представлены исследования морфологии, структуры и состава микро- и наноразмерных материалов, полученных путем электроразрядной обработки микропорошка сплава Ti-6Al-4V. Установлено, что после 60 минут обработки формируются частицы размером 0.25 мкм. В осадочной фракции выявлено конкурирующее влияние процессов фрагментации и агломерации, приводящее к формированию устойчивого бимодального распределения размеров частиц. Результаты спектросокпии KPC и XRD свидетельствуют о присутствии гексагональной α-Ti и кубической TiC структур в полученных образцах.

Титановые сплавы, в частности сплав ТС4 (Ti-6Al-4V), востребованы благодаря своей прочности и коррозионной стойкости. Одним из эффективных подходов к повышению эксплуатационных характеристик является формирование упрочненного сплава Ti-6Al-4V за счёт введения карбида титана [1]. Электроразрядная обработка порошков в жидкой среде представляет собой один из вариантов разрядно-плазменных технологий, применяемых для модификации металлических порошков и синтеза композитных структур, и отличается простотой реализации, низкой стоимостью и возможностью совмещения процессов диспергирования, активации и химического преобразования в одном цикле. Вместе с тем особенности структурной модификации сплава ТС4 при электроразрядной обработке в жидких средах остаются мало изученными.

Целью настоящей работы является исследование и описание особенностей морфологии, размера и фазового состава частиц порошка ТС4 после электроразрядной обработки в этаноле.

Подробное описание экспериментальной установки и параметров разряда можно найти в работе [2]. Рабочая жидкость представляла собой 100 мл ректификованного этилового спирта высокой концентрации (≥96,3 %). В качестве исходного материала был взят промышленный порошок ТС4 массой 0.2 г со средним размером частиц 65 ± 24 мкм. Для изучения динамики морфологических изменений частиц порошка в зависимости от времени воздействия проведены серии экспериментов продолжительностью 10, 30 и 60 мин при прочих постоянных условиях. Перед каждой серией порошок и рабочая жидкость заменялись свежими для исключения накопления примесей.

По окончании обработки полученную суспензию сливали из реакционной емкости, выдерживали при комнатной температуре в течение 1 ч для естественного осаждения крупных частиц, после чего осуществлялось разделение на две фракции: осадочную (преимущественно крупные и различимые визуально частицы) и верхнюю (темный раствор без видимых включений). Обе фракции хранились в герметичных пробирках при комнатной температуре (20–25 °C). Непосредственно перед измерениями суспензии подвергали ультразвуковому диспергированию. Для электронно-микроскопических исследований (SUPRA 55WDS, Carl Zeiss, Германия) и метода спектроскопии комбинационного рассеяния света (Nanoflex, Solar LS, Беларусь; λ = 488 нм) пробы были

получены путем капельного нанесения суспензий на подложки с последующим высушиванием. Для рентгенодифракционного анализа (XRD) (DRON-2, Bourevestnik, Russia; λ = 0.154 нм), требующего порошковой формы материала, образцы высушивались при 60 °C в течение 12 ч.

Статистический анализ изображений, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), позволил количественно оценить динамику изменения размеров частиц ТС4 после электроразрядной обработки в этаноле для верхней и осадочной фракций (рис. 1).

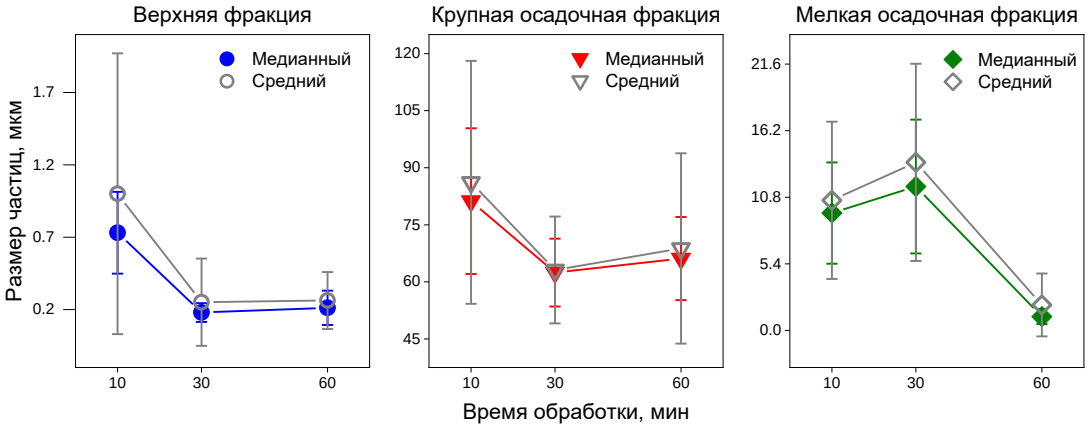


Рисунок 1 – Зависимость медианного и среднего размеров частиц от времени электроразрядной обработки для исследованных фракций рабочей жидкости

Частицы исходного порошка характеризовались средним диаметром 65.1 ± 24.5 мкм. После 10 мин обработки электрическим разрядом в верхней фракции сформировалась субмикронная популяция частиц ($D_{ср}$ = 1.00 ± 0.97 мкм, D_{50} = 0.73 ± 0.28 мкм), обусловленная фрагментацией материала в результате высокоэнергетического воздействия в зоне разряда [3]. Для осадочной фракции наблюдалось бимодальное распределение размеров: мелкая компонента ($D_{ср}$ = 10.6 ± 6.4 мкм, D_{50} = 9.5 ± 4.1 мкм) формируется за счет разрушения исходных гранул, крупная компонента ($D_{ср}$ = 86.2 ± 31.9 мкм, D_{50} = 81.2 ± 19.1 мкм) увеличивается вследствие термически индуцированной агломерации.

По мере увеличения длительности обработки порошка до 30 минут в верхней фракции сохраняется субмикронный масштаб ($D_{ср}$ = 0.25 ± 0.30 мкм, D_{50} = 0.18 ± 0.07 мкм). Сближение среднего и медианного значений относительно образца, полученного после 10-минутной обработки, отражает уменьшение асимметрии распределения и тенденцию системы к формированию устойчивого характерного размера частиц. В осадочной фракции сохраняется бимодальный характер распределения. Для мелкой компоненты обнаружено некоторое увеличение среднего и медианного значений ($D_{ср}$ = 13.6 ± 8.0 мкм, D_{50} = 11.7 ± 5.4 мкм). Для крупной компоненты осадка наблюдалась тенденция, аналогичная верхней фракции ($D_{ср}$ = 63.1 ± 14.0 мкм, D_{50} = 62.4 ± 8.9 мкм).

После 60 мин обработки верхняя фракция достигает размерно-стабилизированного состояния с сохранением остаточной полидисперсности ($D_{ср}$ = 0.26 ± 0.20 мкм; D_{50} = 0.21 ± 0.12 мкм, рис. 2a). Мелкая осадочная компонента уменьшается до $D_{ср}$ = 2.1 ± 2.6 мкм, D_{50} = 1.1 ± 0.6 мкм, локализуясь на крупных частицах осадка в результате адгезии (рис. 2b). Крупная осадочная компонента приобретает размер, близкий к исходному порошку ($D_{ср}$ = 68.8 ± 25.0 мкм, D_{50} = 66.1 ± 10.9 мкм).

Проведённый анализ показал, что электроразрядная обработка порошка ТС4 в этаноле сопровождается переходом системы от режима преимущественной фрагментации (10 мин) к динамическому балансу между разрушением и агломерацией частиц (30–60 мин). При этом в верхней фракции коллоида формируется устойчивая субмикронная популяция частиц (D_{50} = 0.21 мкм), тогда как осадочная фракция сохраняет размерный диапазон, близкий к исходному порошку.

В процессе анализа морфологических признаков установлено, что основной массив частиц характеризуется преимущественно сферической формой с различной степенью рельефности поверхности и тенденцией к агломерации. Наблюдаемые выпуклые образования на частицах осадка с центральным «кратером» и радиальными бороздками (рис. 2c) можно рассматривать как частный случай взаимодействия частиц во время электроразрядной обработки: при столкновении расплавленных или размягчённых частиц доля кинетической энергии расходуется на пластическую деформацию и растекание материала в зоне контакта. Быстрое охлаждение расплава сопровождается неравномерной кристаллизацией и объёмной усадкой, что приводит к формированию центральной вогнутости и радиальных бороздчатых структур на поверхности частиц.

С помощью энергодисперсионной спектроскопии был проведен элементный анализ частиц верхней фракции коллоида после 30 минут электроразрядной обработки. Элементный состав, показанный на рис. 3, демон-

стрирует компоненты сплава исходного порошка, а также появление углерода и кислорода, образующихся при термическом разложении этанола и адсорбированных на поверхности частицы.

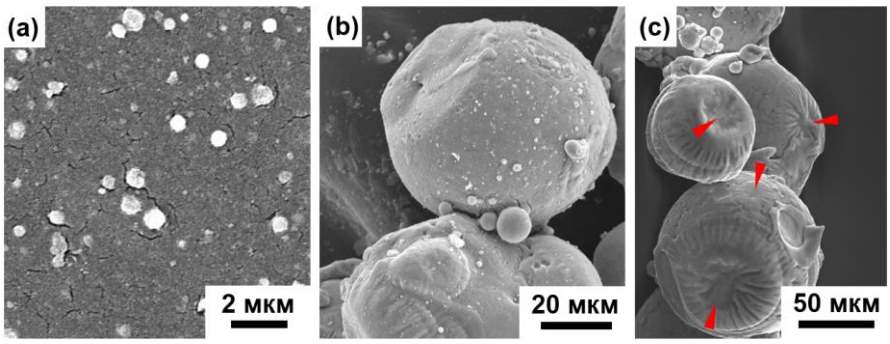


Рисунок 2 – СЭМ-изображения частиц порошка ТС4 из верхней (a) и осадочной (b, c) фракций коллоида, полученного после электроразрядной обработки продолжительностью 60 минут (a, b) и 10 минут (c)

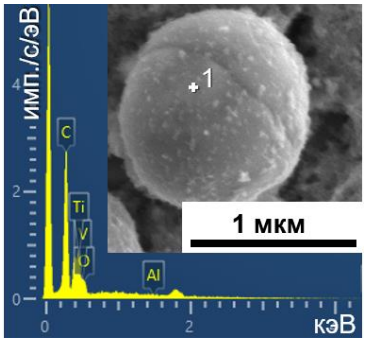


Рисунок 3 – Спектр ЭДС и соответствующее СЭМ-изображение

В рентгенограммах верхней и осадочной фракций (рис. 4) обнаружены пики, соответствующие гексагональной α-Ti (P63/mmc) и кубической TiC (Fm-3m) структурам. Основные дифракционные линии TiC размещаются при 36.4° (111), 42.2° (200) и 61.3° (220) согласно данным COD 5910091. Для α-Ti наблюдаются линии при 35.2° (100), 38.8° (002), 40.1° (101) и 52.9° (012), совпадающие со справочными значениями COD 9008517.

Следует отметить отсутствие на рентгенограммах линий, характерных для оксидных фаз титана, таких как анатаз (25.3°, 37.8°, 48.0°, COD 9008213) или рутил (27.4°, 36.1°, 41.2°, COD 9004141). Также в спектрах не выявлено линий, типичных для кристаллических форм углерода: графит (26.5°, 44.5°, 54.7°, COD 9011577) или алмазоподобный углерод (43.9°, 75.3°, 91.5°, COD 9008564).

Данные спектроскопии КРС представлены на рис. 5. Для верхней фракции образца были зарегистрированы спектральные полосы при 264, 420 и 608 $см^{-1}$, которые соответствуют фазе карбида титана [4]. В литературе [5] отмечают, что стехиометрический TiC не обладает активными колебательными модами. Наблюдение полос в диапазоне 220–650 $см^{-1}$ возможно для нестехиометрического карбида титана (TiC_x, $x < 1$), когда наличие углеродных вакансий и связанных с ними локальных искажений симметрии решетки приводит к активации оптических мод.

Кроме того, в спектре КРС наблюдаются полосы при 1339 $см^{-1}$ (D-полоса) и 1583 $см^{-1}$ (G-полоса), свидетельствующие о присутствии углеродной фазы, в частности, свободного углерода на поверхности частиц, дополняя результаты ЭДС. Тот факт, что свободный углерод не выявляется с помощью рентгенографии, дает основание полагать, что он присутствует в виде аморфной фазы.

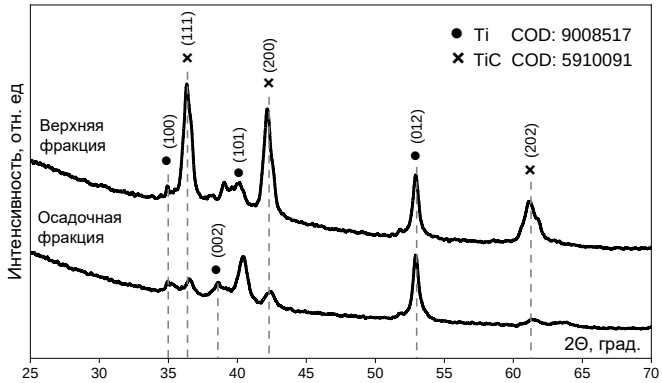


Рисунок 4 – Рентгенограммы продуктов электроразрядной обработки порошка ТС4 в этаноле

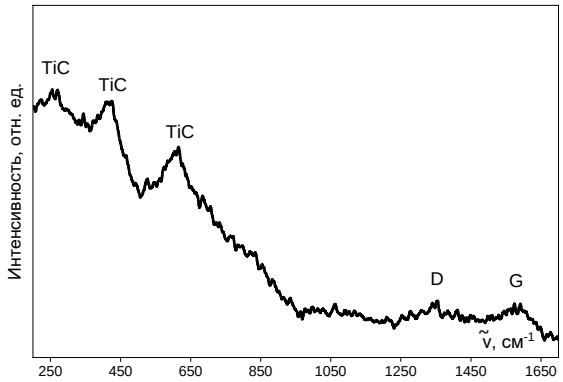


Рисунок 5 – Спектр КРС верхней фракции коллоида, полученного после электроразрядной обработки порошка ТС4 в этаноле

Всесторонний анализ морфологии, фазового состава, данных ЭДС и спектров КРС показал, что обработка электрическим разрядом порошка ТС4 в этаноле сопровождается комплексом процессов диспергирования и агломерации частиц, а также образованием карбидной фазы и слоя из аморфного углерода на поверхности частиц.

Полученные результаты указывают на необходимость углубленного изучения механизмов взаимодействия продуктов разложения рабочей жидкости с поверхностью обрабатываемого материала и характеристик формируемого при этом покрытия. Будущие исследования необходимо также сосредоточить на изучении механических и триботехнических характеристик полученного порошка для оценки перспектив его практического применения.

Список литературы

1. Microstructure and mechanical properties of TiC/Ti–6Al–4V composites processed by in situ casting route / Z. J. Wei [et al.] // Materials Science and Technology. – 2011. – Vol. 27, № 8. – P. 1321–1327.

2. Tarasenka, N. Synergistic Effect of Plasma and Laser Processes in Liquid for Alloyed-Nanoparticle Synthesis / N. Tarasenka [et al.] // Phys. Rev. Appl. – 2020. – Vol. 13. – P. 014021.

3. Analysis of multi-scale Ni particles generated by ultrasonic aided electrical discharge erosion in pure water / Y. Liu [et al.] // Advanced Powder Technology. – 2018. – Vol. 29, № 4. – P. 863–873.

4. Lohse, B. H. Raman spectroscopy as a tool to study TiC formation during controlled ball milling / B. H. Lohse, A. Calka, D. Wexler // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 97. – P. 114912.

5. The Raman spectrum of Ti3SiC2 / M. Amer [et al.] // J. Appl. Phys. – 1998. – Vol. 84, № 10. – P. 5817–5819.

This work presents a study of the morphology, structure, and composition of micro- and nanoscale materials obtained by electric discharge modification of Ti-6Al-4V alloy micropowder. As a result of 60 min modification, 0.25 μm particles are formed. Competing effects of fragmentation and agglomeration have been revealed in the sediment fraction, leading to the formation of a stable bimodal particle size distribution. The results of Raman spectroscopy and XRD indicate the presence of hexagonal α-Ti and cubic TiC structures in the obtained samples.

Шумейко Александра Рэмовна, младший научный сотрудник Цетра «Физика плазмы» Института физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь, al.shumejko@gmail.com.

Научный руководитель – *Невар Елена Аркадьевна*, кандидат физико-математических наук, доцент, Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь, a.nevar@ifanbel.bas-net.by.

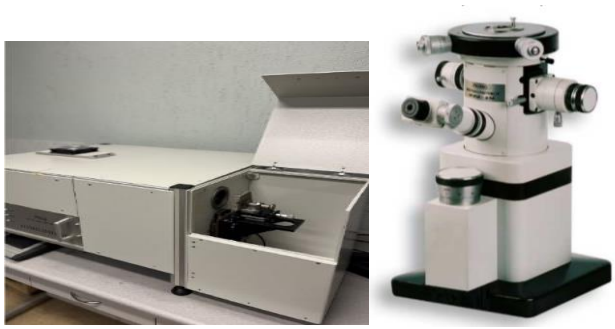
УДК 535.33, 533.9,543.423.1

У. К. ЩЕРБА

ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ СИЛЬНОЗАГРЯЗНЁННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ПОРИСТЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ АРТЕФАКТОВ ПОСРЕДСТВОМ ДВУХИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

В ходе исследования были произведена оценка применимости метода двухимпульсной лазерной абляции для произведения элементного анализа археологических находок. В качестве образцов были взяты 13 металлических и пористых неметаллических образцов датированных V–VIII веками н. э. из фондов музея исторического факультета БГУ с различными степенями повреждения и загрязнения поверхностей. Разработана методика оценки толщины патины на поверхности образцов.

Экспериментальная установка: для реализации абляции и снятия спектров был использован ЛАЭМС спектрометр (рис. 1*а*) [1], для оценки толщины патины на поверхности образцов использовался микроинтерферометр Линника [2] (рис. 1*б*).



а б

Рисунок 1 – а) ЛАЭМС спектрометр; б) микроинтерферометр Линника

Метод лазерной абляции образца – передовой метод элементного анализа образцов отличающийся простотой, скоростью и бюджетностью эксперимента. С помощью данного метода возможен анализ как металлических, так и неметаллических образцов различной степени пористости и загрязнения. При проведении элементного анализа археологических находок химическими методами требуется выполнения нескольких этапов

из-за сильно загрязнения образцов в силу того, что артефакты продолжительное время находились под земной толщей и подвергались воздействию воды и огня. Помимо этого, археологические артефакты часто состоят из нескольких частей и звеньев, концентрация веществ в различных точках образца также варьируется из-за несовершенных методов изготовления сплавов в древности. Для проведения элементного анализа археологических артефактов необходим анализ нескольких точек образца, а также отдельный анализ каждого из звеньев. Использование лазера позволяет проводить анализ в различных точках образца не критично увеличивая время анализа. Недостатком метода лазерной абляции является деструкция образца. Величина деструкции варьируется в зависимости от параметров лазерного излучения, а также от материала образца.

Два лазерных пучка фокусируются в точку малой площади на поверхности образца. Лазерные импульсы нагревают поверхность образца и формируют абляционную плазму. Излучение плазмы падает на диспергирующий элемент и далее идет на ПЗС линейку. Данные ПЗС линейки передаются на компьютер, который строит спектр данного излучения (график зависимости интенсивности излучения от его длины волны). Спектр каждого химического элемента уникален. Анализируя спектр испускания абляционной плазмы возможно не только определение химического состава образца, но и количественная оценка содержания различных веществ. Осуществление лазерной абляции возможно в двух режимах−одноимпульсном и двухимпульсном. При одноимпульсном режиме затворы двух лазерных пучков открываются одновременно, при двухимпульсном второй затвор открывается с временной задержкой. Временной межимпульсный интервал задается исследователем. При двухимпульсном режиме энергия первого импульса идет на нагрев образца и формирование абляционной плазмы, энергия второго−на подогрев плазмы. При использовании сдвоенных импульсов (двухимпульсный режим) наблюдается рост интенсивностей линий примесей, что приводит к росту чувствительности эксперимента.

Предметом исследования являются 13 металлических и пористых неметаллических археологических находок фонда музея исторического факультета БГУ с различными степенями загрязнения поверхности (рис. 2). Образцы датированы V–VIII веками до н. э. и были найдены в селище «Речки-2» в деревне Речки Вилейского района Минской области. Предположительно в этом месте в указанный период времени находилась ювелирная мастерская. Для качественной оценки элементного состава артефактов необходимо провести оценку толщины патины на их поверхности.

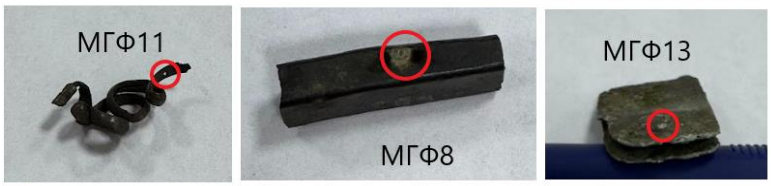
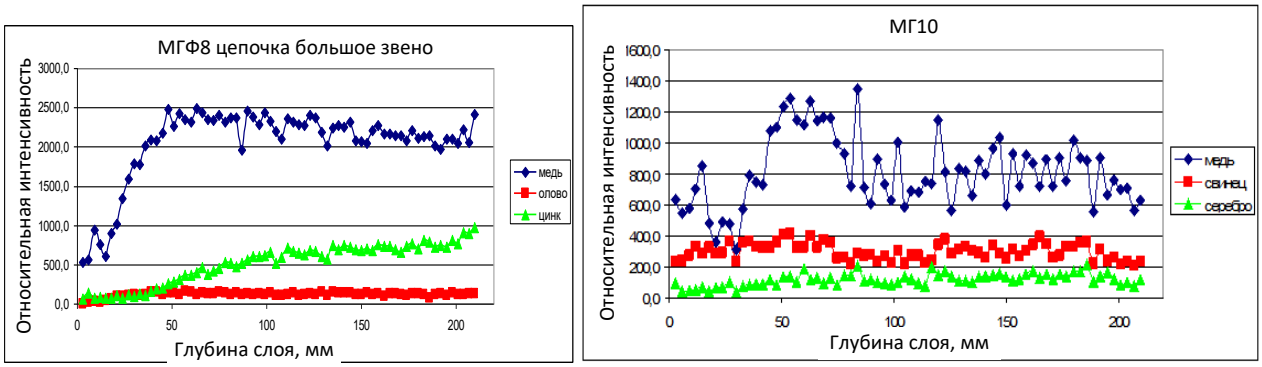


Рисунок 2 – Фотографии археологических предметов с заметными следами деструкции при проведении элементного анализа методом двухимпульсной лазерной абляции

Была разработана методика оценки толщины патины, удаляемой с поверхности образца при одном ударе сдвоенными лазерными импульсами. Использовалась «грязная» медная монета 5 копеек 1788 года с «толстым» слоем патины на поверхности. Медная монета была подвержена 100 сдвоенным лазерным импульсам в одну точку. Спектр снимался после каждого импульса. По результатам спектров был получен номер импульса, при котором наблюдается резкий скачек интенсивности линии меди т.е. переход от патины к «чистой» медной поверхности. Измерив глубину деструкционного кратера на поверхности монеты при помощи микроинтерферометра Линника на первом «чистом» импульсе была рассчитана толщина слоя патины, снимаемая при одном сдвоенном лазерном импульсе − 3мкм.

Каждый артефакт был подвержен 70 сдвоенным лазерным импульсам с межимпульсным интервалом 10 мкс, энергией 50 мДж. Спектр снимался после каждого импульса. Далее строился градировочный график динамики интенсивности спектральной линии, по которому определялась толщина патины на поверхности. Эти данные исключались из рассмотрения. При этом толщина слоя патины для каждого из образцов различна поэтому и измерения для стандартных образцов необходимо проводить на различной глубине.

Градировочные графики для различных артефактов выглядят по-разному: у части образцов наблюдается резкий скачек интенсивности при переходе к «чистому» веществу и в дальнейшем величина интенсивности остается практически неизменной (рис. 3а), у других образцов после скачка интенсивность флуктуирует (рис. 3б). Флуктуация интенсивности образцов указывает на наличие пор и полостей.



а *б*

Рисунок 3 – Динамика интенсивности спектральных линий элементов при двухимпульсной лазерной абляции артефактов: а) четко видна граница патины (50 мкм), незначительные флуктуации интенсивности, что указывает на однородную структуру образца; б) граница патины около 50 мкм, «скачки» интенсивности указывают на наличие внутри образца полостей размеров 10–20 мкм

С учетом вышеупомянутых обстоятельств был проведен элементный анализ 13 археологических артефактов. Результаты количественного анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты количественного анализа

№	Образец	Ag	Fe	Cu	Pb	Sn	Zn
1	МГФ1 бок	4,9	1,5	51,5	9,1	13,6	19,4
2	МГФ1 торец	4,6	3,9	61,3	7,2	19,7	3,2
3	МГФ2	2,6	2,5	68,3	1,6	16,6	8,5
4	МГФ3 пласти-на	0,9	0,2	51,5	2,7	5,7	39,0
5	МГФ3 цепочка большое звено	3,0	4,0	66,2	3,6	4,5	18,6
6	МГФ3 цепочка	0,5	0,0	70,3	1,4	2,4	25,5
7	МГФ4 внутренний сгиб	6,9	8,0	52,0	4,9	25,4	2,8
8	МГФ4 торец	6,1	8,0	52,5	5,4	25,8	2,2
9	МГФ5 внутр	2,6	2,0	57,4	11,7	8,7	17,7
10	МГФ6 внутр	5,7	1,8	56,9	8,5	19,5	7,5
11	МГФ6 торец	11,4	2,2	48,7	5,8	25,7	6,2
12	МГФ7 бок	2,3	7,2	56,7	11,0	13,6	9,1
13	МГФ7 торец	3,6	6,9	56,3	12,6	15,5	5,1
14	МГФ8 бок	42,6	2,5	10,8	9,0	24,0	11,0
15	МГФ8 торец	38,7	1,8	10,1	16,0	24,5	8,8
16	МГФ9	0,0	97,2	2,4	0,4	0,0	0,0
17	МГФ10	4,1	2,3	71,5	9,5	11,6	0,9
18	МГФ11	9,1	1,2	59,0	5,8	15,4	9,5
19	МГФ12	0,6	0,3	55,6	3,9	6,8	32,8
20	МГФ13 винт внутри	2,9	2,2	56,7	9,0	7,5	21,6
21	МГФ13 красивая	5,3	0,8	47,4	10,3	10,4	25,9
22	МГФ13 некрасивая	4,6	1,0	40,5	12,9	8,9	32,0

Большинство из них можно отнести к бронзе (Cu+Sn) с примесями серебра, цинка, свинца и железа. Образец МГФ8, на поверхности которого после абляции было заметно значительно светло серое пятно вокруг кратера является сплавом серебро-свинец-олово с небольшим содержанием меди и цинка.

Список литературы

1. Воропай, Е. С. Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр / Е. С. Воропай, И. М. Гулис, К. Ф. Ермалицкая. – Минск : Изд-во Белорус. гос. ун-та, 2021.
2. Описание микроинтерферометра Линника. – URL: https://www.lomo.ru/production/grazhdanskogo-naznacheniya/ mikroskopy/ mikroskopy-tekhnicheskie/mii-4m.
3. Miziolek, Andrzej W. Laser-induced breakdown spectroscopy / Andrzej W. Miziolek, Vincenzo Palleschi, Israel Schechter. − New York : Cambridge University Press, 2008 – С. 5–7.

In the course of the study, the applicability of the doublepulse laser ablation method for the production of an elemental analysis of archaeological finds was evaluated. 13 metallic and porous non-metallic samples dated to the 5th-8th century A.D. from the collections of the museum of the History Faculty of BSU with various degrees of damage and contamination of surfaces were taken as samples. A technique for estimating the thickness of the patina on the surface of the samples has been developed.

Щерба Ульяна Константиновна, студент 5 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь; ulshch04@gmail.com.

Научный руководитель – *Ермалицкая Ксения Фёдоровна*, кандидат физико-математических наук, доцент, физический факультет, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, ermalitskaia@gmail.com.

УДК 539.2:537.226:53.092

А. С. ЯРНЫХ, Н. В. КОРОСТИК

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА ПЕРОВСКИТОВ В СИСТЕМЕ ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ $Bi_{1-x}Ho_xFeO_3$

Показано, что в условиях высоких давлений (5.5 ГПа) и температурах 1350–1450 °С в системе получается однофазная керамика системы $Bi_{1-x}Ho_xFeO_3$ со структурой перовскита. Установлены структурные особенности твёрдых растворов данной системмы.

На протяжении последних двадцати лет в фокусе внимания многих исследователей находятся мультиферроики ([1 и ссылки в ней)]. Одним из модельных мультиферроиков является феррит висмута $BiFeO_3$ [2]. Однако его характеристики не оптимальны. Известно, что одним из путей оптимизации свойств феррита висмута является введение в состав различных элементов, прежде всего редкоземельных в подрешётку висмута [3]. В качестве редкоземельного элемента для подрешётки Bi в данной работе выбран Ho.

Целью работы являлось определение условий синтеза перовскитов-мультиферроиков в системе твёрдых растворов $Bi_{1-x}Ho_xFeO_3$, установление закономерностей изменения их структурных характеристик в зависимости от состава.

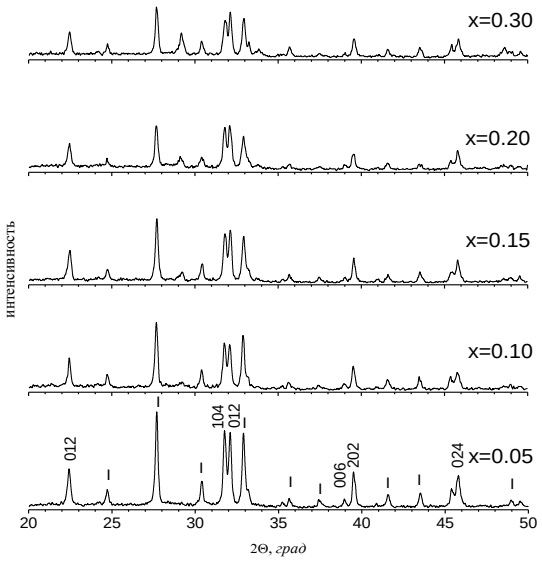


Рисунок 1 – Участки рентгеновских дифракционных спектров твёрдых растворов системы $Bi_{1-x}Ho_xFeO_3$ после термообработки при 700 °С в течение 15 мин.
Цифрами обозначены индексы Миллера перовскита, штрихами – фазы селленита.
Справа на каждом графике указана концентрация Ho в твёрдом растворе

В работе использовались предворительно просушенные оксиды Bi_2O_3, Ho_2O_3, Fe_2O_3 марки «ос.ч.». Эквимолярную смесь исходных оксидов мололи в шаровой мельнице с добавлением этанола. После сушки порошки прессовались в таблетки и проводилась их термообработка при атмосферном давлении при температурах 700-870 ºС в течение 10-15 мин. Для синтеза под высоким давлением использовалась не подвергавшаяся термической обработке шихта. Для определения фазового состава синтезированных образцов проводился рентгенофазовый анализ с использованием управляемого компьютером рентгеновского дифрактометра ДРОН-3 с монохроматизированным CuK_α – излучением.

На рисунке 1 приведены участки спектров ряда твёрдых растворов после термообработке при 700 ºС.

Установлено, что дифракционных спектрах присутствуют линии перовскитной (пространственная группа $R3c$) и силленитной фаз. Предполагается, что химический состав силленитной фазы соответствует $Bi_{25}FeO_{40}$. Из рисунка видно, что для всех выбранных составов фаза перовскита не является доменирующей.

На рисунке 2 приведены участки спектров тех же твёрдых растворов после термообработке при 870 ºС.

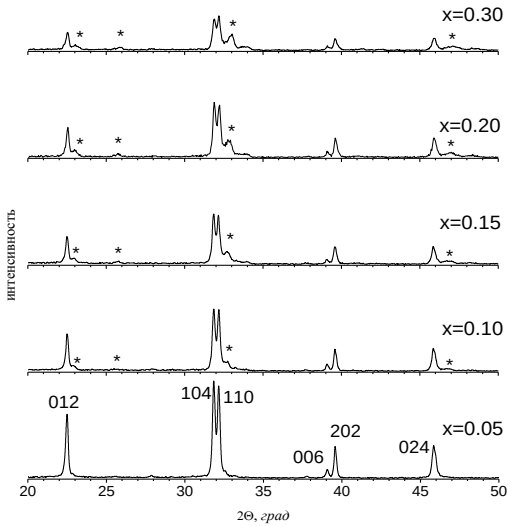


Рисунок 2 – Участки рентгеновских дифракционных спектров твёрдых растворов системы $Bi_{1-x}Ho_xFeO_3$ после термообработки при 870 ºС в течение 10 мин.
Цифрами обозначены индексы Миллера перовскита, звёздочками – линии других фаз(фазы).
Справа на каждом графике указана концентрация Ho в твёрдом растворе

Из рисунка 2 видно, что спектр твёрдого раствора с x = 0.05 не содержит линий, не относящихся к перовскиту. При увеличении концентрации гольмия на рентгеновских спектрах наблюдаются линии другой фазы или фаз.

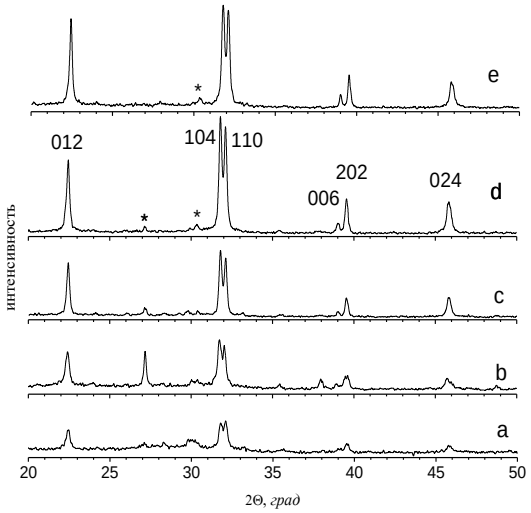


Рисунок 3 – Участки рентгеновских дифракционных спектров твёрдого раствора системы $Bi_{1-x}Ho_xFeO_3$ с x = 0.05 после синтеза в условиях высоких давлений и температур: a – 1200 ºС и 5.5 ГПа, b – 1350 ºС и 4 ГПа, c – 1350 ºС и 5.5 ГПа, d – 1400 ºС и 5.5 ГПа , и отожжённого при 400 ºС в течение 2.5 часа образца, синтезированного при 1200 ºС и 5.5 ГПа

Далее на примере состава с $x = 0.05$ были выбраны оптимальные условия синтеза исходной шихты в условиях высоких давлений и температур [4]. Синтез во всех случаях длился 3 мин. На рисунке 3 представлены участки рентгеновских дифракционных спектров твёрдого раствора с $x = 0.05$ синтезированного при различных температуре и давлении. Из рисунка видно, что при давлении 4 ГПа кроме фазы перовскита с пространственной группы *R*3*c* формируется фаза, предположительно силенита (рисунок 3b), при температуре 1200 ºС и давлении 5.5 ГПа крроме перовскита образуются и другие фазы/фаза. Мы предполагаем, что это, кроме упомянутой ранее фазы $Bi_{25}FeO_{40}$, может быть $Bi_2Fe_4O_9$, подобно описанному в [5]. При температурах синтеза выше 1350 ºС и давлении 5.5 ГПа на рентгенограммах видны следы дополнительных фаз. Было установлено, что фаза перовскита, синтезированная при 1400 ºС и давлении 5.5 ГПа устойчива на воздухе при температурах не менее 400 ºС. Как видно из рисунка 3e отжиг приводит к устранению некоторых дефектов структуры в рамках пространственной группы *R*3*c*.

При выбранных условиях 1350 ºС и давлении 5.5 ГПа были синтезированы и другие составы твёрдых растворов. На рисунке 4 представлены рентгеновские дифракционные спектры керамики высокого давления системы твёрдых растворов $Bi_{1-x}Ho_xFeO_3$.

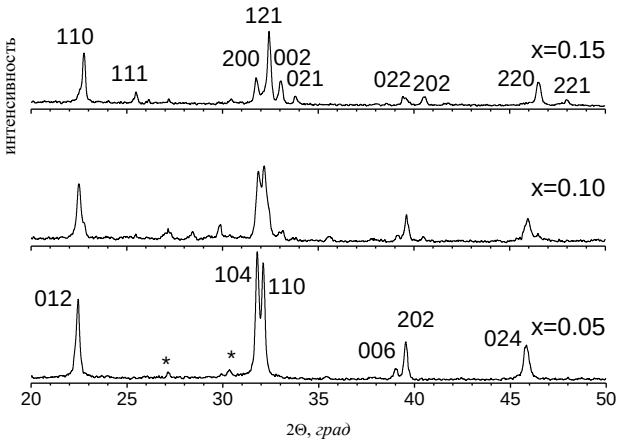


Рисунок 4 – Участки рентгеновских дифракционных спектров твёрдых растворов системы $Bi_{1-x}Ho_xFeO_3$ после термообработки при высоких температуре и давлении 1400 ºС и 5.5 ГПа, 3 мин. Цифрами обозначены индексы Миллера перовскита, звёздочками – линии других фаз(фазы). Справа на каждом графике указана концентрация Ho в твёрдом растворе

Из рисунка 4 видно, что твёрдые растворы с $x \leq 0.10$ синтезируются в структуре с пространственной группой *R*3*c* как и крайнее соединение $BiFeO_3$, а с $x \geq 0.10$ – с пространственной группой *Pnma*, подобно, описанному в [6], но без области сосуществования перовскитных фаз.

Список литературы

1. Пятаков, А. П. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики / А. П. Пятаков, А. К. Звездин // УФН. – 2012. – Т. 182. – С. 593–620.

2. Multiferroic and Magnetoelectric Materials / W. Eerenstein [et al.] // Nature. – 2006. – Vol. 442. – P. 759–765.

3. Arnold, D. C. Composition-Driven Structural Phase Transitions in Rare-Earth-Doped $BiFeO_3$ Ceramics: A Review / D. C. Arnold // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2015. – Vol. 62, no. 1. – P. 62–82.

4. Мазуренко, А. М. Устройство для физико-химических исследований при высоких давлениях и температурах / А. М. Мазуренко. – М. : Наука, 1978. – С. 144–147.

5. Effect of holmium substitution for the improvement of multiferroic properties of $BiFeO_3$ / S. K. Pradhan [et al.] // J. Phys. Chem. Solids. – 2010. – Vol. 71, no. 11. – P. 1557–1564.

6. Phase evolution and magnetic property of $Bi_{1-x}Ho_xFeO_3$ powders / Y.-J. Wu [et al.] // Solid State Commun. – 2011. – Vol. 151, no. 24. – P. 1936–1940.

It has been shown that, under high pressures (5.5 GPa) and temperatures of 1350–1450 °C, a single-phase $Bi_{1-x}Ho_xFeO_3$ ceramic with a perovskite structure were formed. The structural characteristics of the solid solutions in this system have been determined.

Ярных Артём Святославович, студент 4 курса Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь.

Коростик Никита Вадимович, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Радюш Юрий Владимирович*, кандидат физико-математических наук, доцент, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, radyush@physics.by.

УДК 535.421

А. А. КОВЕЦКАЯ, И. Г. ДАДЕНКОВ

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПРИ ПОМОЩИ ПРОСТРАНСТВЕННО-МОДУЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО КОГЕРЕНТНОГО СИГНАЛА

В ходе работы была сконструирована установка, позволяющая определять тепловые характеристики материала методом пространственно-модуляционной спектроскопии при помощи использования дополнительного когерентного сигнала (гомодина) и апробирована на эталонном образце нержавеющей стали.

Изучение процессов теплообмена в металлах и полупроводниках имеет большое значение как для теоретических исследований, так и для практических применений, так как эффективное управление тепловыми процессами в этих материалах становится ключевым для повышения надёжности и долговечности электронных устройств, что обуславливает необходимость создания точных и удобных методов измерения тепло- и температуропроводности. При этом традиционные методы измерения зачастую сталкиваются с ограничениями по точности и пространственному разрешению, что особенно заметно при исследовании микро- и наноразмерных объектов.

Метод пространственно-модуляционной спектроскопии, рассматриваемый в данной работе, обладает широким спектром применения для определения различных характеристик материалов, объединяя в себе некоторые приложения теории дифракции и интерференции. Для повышения точности проводимых измерений, была применен метод использования дополнительного когерентного сигнала (гомодина), суть которого заключается в учете дополнительного когерентного фона, который возникает ввиду рассеяния на неоднородностях поверхности исследуемого материала. Данный фон будет интерферировать с исследуемым сигналом, что приведет к усилению или ослаблению искомого сигнала.

Метод основан на формировании в исследуемом материале тепловых динамических решеток с последующим наблюдением их релаксации [1]. Лазерный импульс, предварительно разделенный надвое, собирается вместе на поверхности исследуемого образца таким образом, чтобы сформировать интерференционную картину из чередующихся светлых и темных полос. Благодаря данной интерференции двух когерентных пучков от лазерного импульса в образце создаются пространственно-периодический источник тепла (тепловая динамическая решетка), которая может быть представлена в виде модуляции температуры, плотности, диэлектрической проницаемости и т.д. При сильном поверхностном поглощении и формировании исключительно поверхностной решетки, распад решетки происходит, в равной степени, через горизонтальную диффузию, а также уходит вглубь материала. В случае слабого поглощения релаксация будет происходить только в плоскости модуляции. Проследить за релаксацией можно при помощи непрерывного зондирующего излучения, дифрагирующего на сформированной решетке.

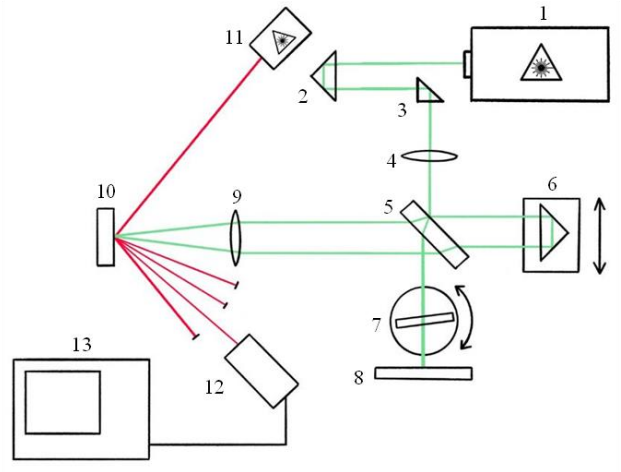


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для записи динамических решеток на тонкопленочном материале с использованием гомодина, где 1 – импульсный Nd:YAG лазер с генератором второй гармоники λ = 532 нм, 2 и 3 – направляющие призмы полного внутреннего отражения, 4 и 8 – собирающие линзы с фокусными расстояниями 45 см и 21 см соответственно, 5 – полупропускающее зеркало, 6 – призма полного внутреннего отражения на подвижной подставке, 7 – тонкая стеклянная пластинка на вращающейся подставке, 8 – зеркало, 10 – исследуемый образец, 11 – непрерывный гелий-неоновый лазер, 12 – фотоэлектронный умножитель, 13 – цифровой осциллограф

Для проведения исследований по записи динамических решеток на образце использовалась оптическая схема, представленная на рисунке 1. Лазерный пучок, генерируемый импульсным наносекундным Nd:YAG-лазером *1*, внутри телескопической системы из двух линз *4* и *9* разделяется на два луча одинаковой интенсивности с помощью полупропускающего зеркала *5*. Один луч возвращается на зеркало с помощью призмы полного внутреннего отражения *6*, установленной на подвижной подставке, благодаря которой возможна регулировка расстояния между лазерными пучками, и, как следствие, изменение периода интерференционной картины, падающей на образец. Второй луч проходит через тонкую стеклянную пластинку *7*, расположенной на вращающейся платформе, затем попадает на зеркало, возвращающее излучение в оптическую схему. Такое расположение пластинки позволяет регулировать оптический путь в разных плечах оптической схемы, что напрямую влияет на разность фаз и, как следствие, на положение полос интерференционной картины. Положение полос интерференционной картины будет влиять на положение полос динамической решетки, что, в свою очередь будет влиять на фазу дифрагированной волны, однако никак не будет влиять на фазу рассеянного поля, или, другими словами, гомодина. Устанавливая определенные положения вращающейся пластинки можно добиваться усиления или ослабления исследуемого сигнала, который регистрировался при помощи ФЭУ *12* и цифрового осциллографа *13*.

В результате интерференции постоянного поля гомодина E_1 и затухающего сигнала $E_2(t)$ интенсивность на детекторе $|E_1 + E_2(t)|^2$ записывается в виде суммы трех слагаемых:

$$I_D(t) = I_1 + I_2(t) + 2\sqrt{I_1 I_2(t)}cos\Delta\varphi. \quad (1)$$

Последнее слагаемое зависит от разности фаз двух взаимодействующих полей, которым можно управлять, манипулируя относительным положением гомодина и формируемой динамической решетки относительно друг друга, вследствие чего возможность выделить одну компоненту дифрагированного сигнала и исключить из рассмотрения сопутствующие кинетики. Для этого необходимо сделать разность фаз двух полей $\Delta\varphi$ равной 0 и π, и зарегистрировать две кинетики, затем находится разностный сигнал $I_{D1}(t) - I_{D2}(t)$, который позволяет выделить искомую компоненту с временем релаксации τ, описываемой функцией вида [2]:

$$\mathrm{I}(t) = I_0 Erfc(-t/\tau) \quad (2)$$

Горизонтальная температуропроводность χ_x определяется связана с временем релаксации решетки τ и ее пространственным периодом Λ согласно уравнению [3]:

$$\chi_x = \frac{\Lambda^2}{4\pi^2\tau} \quad (3)$$

Таблица 1 Сравнение температуропроводности χ_x эталонного образца нержавеющей стали полученной в ходе эксперимента со справочным значением.

Справочное значение χ_x, м^2/с	Полученное значение χ_x, м^2/с
4.0×10^{-6}	3.9×10^{-6}

Таким образом, учет дополнительного поля дифракции, позволяет добиться улучшения точности аппроксимации кинетики затухания динамической решетки образца. В ходе проведения работы было показано, что температуропроводность образца вычисленная по рассмотренному методу с большой точностью совпадает со справочным значением.

Список литературы

1. Толстик, А. Л. Пространственно-модуляционная спектроскопия полупроводниковых материалов на основе динамических решеток / А. Л. Толстик, И. Г. Даденков, А. А. Станкевич // Оптический журнал. – 2022. – Т. 89. – № 5. – С. 3–10.

2. Ivakin, E. V. Optical studies of heat transfer in PbTe:Bi(Sb) thin films / E. V. Ivakin, I. G. Kisialiou, L. I. Nykyruy, Y. S. Yavorskyy // Semiconductors. – 2018. – Vol. 52. – No 13. – P. 1691–1695.

3. Yano, R. Thermal conductivity measurement of water-ethanol solutions by the laser-induced transient grating method / R. Yano, Y. Fukuda, T. Hashi // Chem. Phys. – 1988. – Vol. 124, No 2. – P. 315–319.

During the work, a setup was constructed that allows the thermal characteristics of a material to be determined using spatial modulation spectroscopy with the use of an additional coherent signal (homodyne) and tested on a reference sample of stainless steel.

Ковецкая Анна Алексеевна, физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь; fiz.koveckayAA@bsu.by.

Научный руководитель – *Даденков Иван Геннадьевич*, физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь; dadenkov.ivan@gmail.com.

СЕКЦИЯ 2.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФИЗИКЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 004.94

В. В. АБРАМУК

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

На современном этапе развития физического образования необходимо повышать эффективность процесса усвоения знаний учащимися. В этих условиях все большее значение приобретает компьютерное моделирование, которое позволяет визуализировать сложные физические процессы. В работе представлены визуальные компьютерные модели преломления световых лучей в неоднородных средах.

Процесс разработки компьютерной модели состоит из нескольких ключевых этапов.

Постановка задачи. Определяем, какое явление мы хотим смоделировать. Рассмотрим задачу расчёта траектории луча света, распространяющегося в среде с показателем преломления, зависящим от координаты по оси Y по закону:

$$n(y) = a\sqrt{y} + b.$$

Луч выходит из точки с координатами (x_0, y_0) и составляет угол α_0 с осью OY.

Выбор инструмента. Решаем, на какой платформе и на каком языке будем реализовывать модель. В данном случае выбрана разработка на C# (например, в Unity или стандартном приложении Windows Forms/WPF). C# обеспечивает простую реализацию графического интерфейса, имеется готовая математика для векторов, а также библиотеки рисования. При необходимости можно использовать игровой движок (Unity), чтобы получить готовые функции отображения и анимации, или разработать собственную простую отрисовку в 2D.

Проектирование интерфейса. Планируем взаимодействие пользователя с моделью. Например, пользователь может управлять положением линзы и источника света, изменять угол падения лучей или показатель преломления среды. Нужно решить, как отображать результаты: рисовать сами лучи, объекты-линзы, оптическую ось и т.д. На этом этапе мы также проектируем структуру данных: будем хранить лучи как векторные объекты, описывать оптические элементы (поверхности, носители).

Реализация и отладка кода. Пишем код на C# для создания объектов модели и вычисления оптики. На этом этапе включаем основные алгоритмы: проверка пересечения лучей с оптическими поверхностями, вычисление углов падения и преломления (по законам геометрической оптики), построение траекторий лучей. После написания кода проводим тестирование: проверяем работу модели при известных конфигурациях (например, убедимся, что параллельные лучи сходятся в фокусе линзы, а при переносе источника отображается корректный размер изображения). Отладка может выявлять погрешности (например, ошибку в вычислении угла преломления) или неточности при отрисовке, которые нужно исправить.

Визуализация результатов. Результатом модели является визуальное отображение: например, график, на котором показываются преломлённые лучи и точка изображения. Здесь важно сделать вывод удобным для восприятия: можно выделять цветом падающий и преломлённый лучи, обозначать фокусы и вершины линз, показывать динамические изменения при взаимодействии. Для наглядности можно добавлять подписи и легенду. Затем проводится анализ результатов: моделирование даёт ответы на заданную задачу (например, положение изображения линзы) и наглядно демонстрирует законы оптики.

Описание идеи модели. Алгоритм состоит в пошаговом пересчёте углов α_i и координат (x_i, y_i) с сохранением постоянства произведения $n(y)\cdot\sin(\alpha)$. На каждом шаге вычисляются новые значения $\sin(\alpha_{i+1})$, $\cos(\alpha_{i+1})$ и координаты точки. Недостаток метода проявляется при $\alpha_i \to \pi/2$: программа выдает $\alpha_{i+1} \approx \pi/2$, в то время как на практике луч искривляется в сторону увеличения показателя преломления.

Логика реализации. В модели вводятся следующие основные объекты:

Класс Ray (луч) – содержит точку начала Origin и направляющий вектор Direction. Используются векторы Unity (Vector2) или аналогичные. Луч нормализован по направлению. Построение траектории луча демонстрирует его искривление в сторону областей с большим показателем преломления, что соответствует законам геометрической оптики. Таким образом, реализованный алгоритм позволяет моделировать поведение луча в неоднородной среде с переменным показателем преломления и может быть использован для расчётов в задачах оптической диагностики, атмосферной оптики и разработки оптических систем. Производится вычисления угла преломления и построение конечной траектории луча.

Ниже приведены фрагменты кода на C#, иллюстрирующие основные шаги:

Расчёт показателя преломления в текущей точке Y

```
double n(double y)
{
   return a * Math.Sqrt(y) + b;
}
```

```
Инвариант геометрической оптики и новый угол наклона
double sin_alpha_new = (n_current / n_next) * Math.Sin(alpha);
if (Math.Abs(sin_alpha_new) >= 1.0)
   break; // полное внутреннее отражение
double cos_alpha_new = Math.Sqrt(1 - sin_alpha_new * sin_alpha_new);
double alpha_new = Math.Atan2(sin_alpha_new, cos_alpha_new);
Расчёт новых координат точки луча
double x_new = x + l * Math.Sin(alpha_new);
double y_new = y + l * Math.Cos(alpha_new);
Сохранение точки в список
points.Add(new PointF((float)x_new, (float)y_new));
Отрисовка траектории на форме
g.DrawLine(pen, screenP1, screenP2);
```

В результате работы программы были получены траектории световых лучей, распространяющихся в среде с переменным показателем преломления. На каждом шаге расчёта вычислялись координаты новой точки луча и соответствующий угол наклона. Полученные данные позволяют построить графическую траекторию распространения луча. Графически полученная траектория представляет собой плавно искривляющуюся линию, отклоняющуюся в сторону областей с большим показателем преломления, что соответствует теоретическим ожиданиям. При увеличении параметра a в законе изменения показателя преломления, луч искривляется сильнее, демонстрируя более резкий поворот в сторону увеличивающегося $n(y)$.

Пример визуализации: На экране Windows Forms (рисунок 1) траектория отображается в виде красной линии на белом фоне, отклоняющейся вниз (в сторону увеличения показателя преломления). Оси координат подписаны, параметры модели заданы в коде.

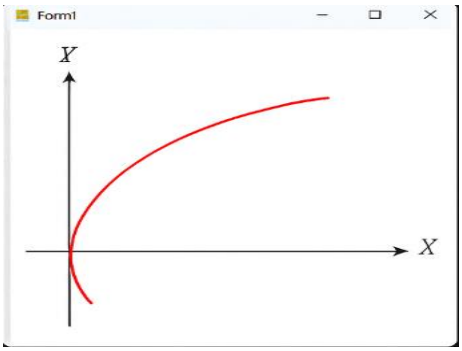


Рисунок 1 – Визуализация хода светового луча в неоднородной среде

Моделирование преломления света на сфере.

Необходимо смоделировать прохождение параллельного пучка света через сферическую каплю жидкости радиусом *R*. Луч падает на каплю на расстоянии ρ от центральной оси (прицельный параметр). Угол отклонения светового луча сначала растет, достигает максимума, а затем резко падает. Пик графика – это и есть та область, где концентрируется энергия света. Зависимость угла видимости радуги от радиуса сферы, на которую падает световой луч, показана на рисунках 2, 3.

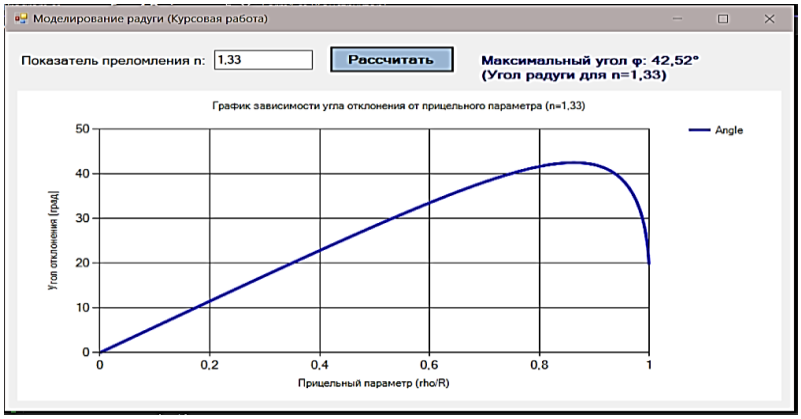


Рисунок 2 – Угол видимости радуги для капли воды

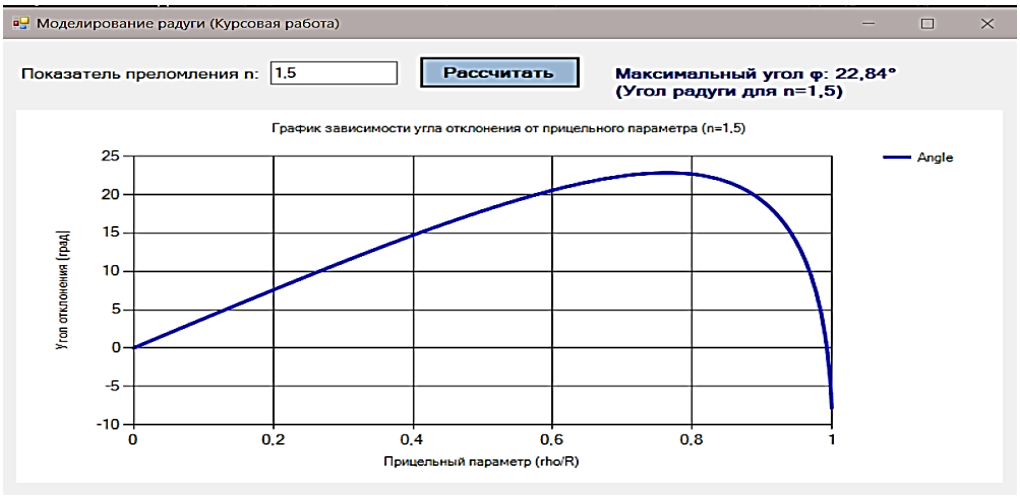


Рисунок 3 – Угол видимости радуги для стеклянной сферы

В целом, разработанная модель иллюстрирует основные законы геометрической оптики в неоднородных средах, показывая искривление траектории светового луча в зависимости от изменения показателя преломления по заданному закону. Несмотря на упрощения (плоскослоистая среда, дискретный пошаговый алгоритм), модель наглядно демонстрирует характер искривления луча и подтверждает выполнение закона инварианта геометрической оптики. Приведённые фрагменты кода показывают, что для численного расчёта и визуализации подобных процессов на языке C# достаточно нескольких элементарных операций, циклов и стандартных функций работы с тригонометрией. Это доказывает, что использование C# и Windows Forms для построения подобных симуляций является удобным и эффективным решением как для учебных целей, так и в качестве основы для создания более сложных оптических моделей и приложений.

Была разработана простая модель распространения светового луча в среде с переменным показателем преломления на языке C#. Она иллюстрирует искривление траектории луча в зависимости от изменения показателя преломления. Описаны этапы постановки задачи, выбора метода расчёта и реализации: от применения закона инварианта геометрической оптики до пошагового вычисления углов наклона и координат луча. Представленные фрагменты кода демонстрируют, как с помощью встроенных средств C# и графического интерфейса Windows Forms можно численно смоделировать поведение светового луча в неоднородной среде. Полученная модель наглядно подтверждает теоретические закономерности распространения света в градиентных оптических структурах и может использоваться как эффективное средство для изучения геометрической оптики и разработки простых виртуальных лабораторий.

Разработка таких компьютерных моделей имеет высокую значимость. Во-первых, они углубляют понимание теории геометрической оптики за счёт визуализации непонятных на слух явлений. Во-вторых, они сокращают время и ресурсы, необходимые для демонстраций и экспериментов, так как позволяют быстро менять параметры системы и получать мгновенный результат. Далее такую модель можно расширять: вводить шумы и погрешности, добавлять нелинейные эффекты, делать её интерактивной для пользователей. В перспективе комбинация компьютерной физики и геометрической оптики открывает широкие возможности, как в образовательной сфере, так и при проектировании сложных оптических приборов.

Список литературы

1. Майер, Р. В. Компьютерное моделирование.: учеб.-метод. пособие для студентов пед. вузов [Электронное учебное издание на компакт-диске] / Р. В. Майер. – Глазов : Глазов. гос. пед. ин-т, 2015. – 24,3 Мб.

2. Власов, Л. А. Оптика. Геометрическая и волновая теория : учеб. для вузов / Л. А. Власов. – М. : Высшая школа, 2002. – 352 с.

3. Гальперин, Е. А. Основы вычислительной физики / Е. А. Гальперин. – М. : Физматлит, 2011. – 328 с.

At the current stage of physics education development, it is necessary to improve the efficiency of student learning. In this context, computer modeling, which allows for the visualization of complex physical processes, is becoming increasingly important. This paper presents visual computer models of light refraction in inhomogeneous media.

Абрамук Варвара Владимировна, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, Abramuk_VV_22@student.grsu.by.

Научный руководитель – *Крупская Татьяна Константиновна,* магистр педагогических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, krupskay_tk@grsu.by.

УДК 004.94

Г. Н. АГАФОНОВ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Была разработана и реализована визуальная компьютерная модель, иллюстрирующая протекание нейтронно-физических процессов в активной зоне ядерного реактора. Модель позволяет наглядно наблюдать изменение плотности нейтронного потока, влияние управляющих и предохранительных стержней, замедлителя, а также работу системы аварийной защиты. Принципиальным отличием разработанной модели является одновременный учёт физических параметров реактора и их динамическая визуализация во времени, что повышает наглядность и образовательную ценность программного продукта.

Постановка задачи.

1. Необходимо описать изменение плотности нейтронного потока во времени с учётом: наличия или отсутствия источника нейтронов; влияния замедлителя; положения управляющих и предохранительных стержней.

2. Дискретизация времени и пространства. Процесс моделируется дискретно по времени с заданным шагом. Активная зона реактора представляется в виде упрощённой двумерной области, в пределах которой визуализируется движение нейтронов.

3. Выбор метода моделирования. Для расчёта используется упрощённая кинетическая модель, в которой изменение числа нейтронов определяется текущим состоянием реактора. Пространственное распределение нейтронов реализуется визуально с помощью частиц, движущихся по заданным правилам.

4. Разработка алгоритма работы модели.

Алгоритм включает: обновление физического состояния реактора на каждом временном шаге; генерацию и движение визуальных нейтронов; учёт влияния замедлителя на скорость нейтронов; проверку условий аварийного режима (SCRAM).

5. Программная реализация.

Модель реализуется на языке C# с использованием технологии Windows Forms. Программа предоставляет графический интерфейс, позволяющий управлять параметрами реактора, наблюдать визуализацию нейтронного потока, а также строить графики распределения нейтронов и сохранять результаты работы.

Моделирование процессов в активной зоне ядерного реактора.

Разрабатываемая модель реализована в виде приложения с графическим интерфейсом на базе Windows Forms. Основной целью визуализации является наглядное представление протекания нейтронно-физических процессов в активной зоне реактора и их зависимости от управляющих параметров.

Визуальное представление модели:

Активная зона реактора. Активная зона представлена в виде набора вертикальных каналов, в которых чередуются топливные элементы и замедлитель. Топливные элементы отображаются зелёным цветом, а замедлитель – жёлтым.

Управляющие и предохранительные стержни. Стержни визуализируются в виде вертикальных полос синего цвета. Предохранительные стержни могут находиться в двух состояниях: полностью введены или полностью выведены. Управляющие стержни вводятся в активную зону плавно, что позволяет регулировать интенсивность реакции.

Источник нейтронов. Источник нейтронов отображается в центральной части активной зоны в виде маркера. При его включении начинается генерация первичных нейтронов.

Нейтроны. Нейтроны представлены в виде движущихся частиц. Их движение происходит в двумерной области и используется для качественной визуализации нейтронного потока. В зависимости от состояния реактора нейтроны могут изменять скорость и время жизни, что позволяет наглядно показать влияние замедлителя и интенсивность реакции.

Логика моделирования.

Модель основана на дискретном временном шаге. На каждом шаге выполняются следующие операции: расчёт изменения относительной плотности нейтронов в активной зоне; генерация новых нейтронов при наличии источника; обновление положения визуальных нейтронов с учётом масштаба времени; уменьшение скорости нейтронов при наличии замедлителя; проверка условий аварийного режима и автоматического ввода предохранительных стержней.

Отображение результатов.

В процессе работы программы пользователь может наблюдать: изменение интенсивности нейтронного потока; влияние управляющих параметров на скорость развития реакции; переход реактора в аварийный режим при превышении допустимых значений.

Результаты визуального моделирования работы активной зоны и распределения нейтронов представлены на рисунках 1–3.

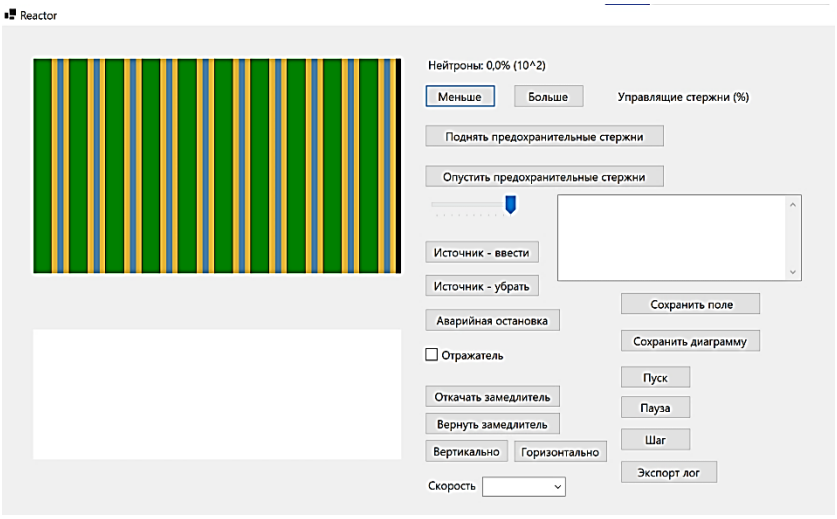


Рисунок 1 – Основной интерфейс программы

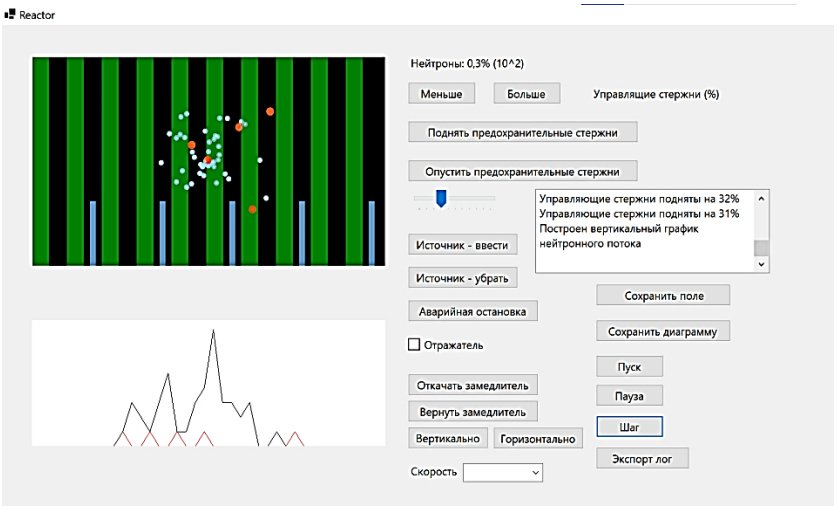


Рисунок 2 – Протекание реакции без замедлителя

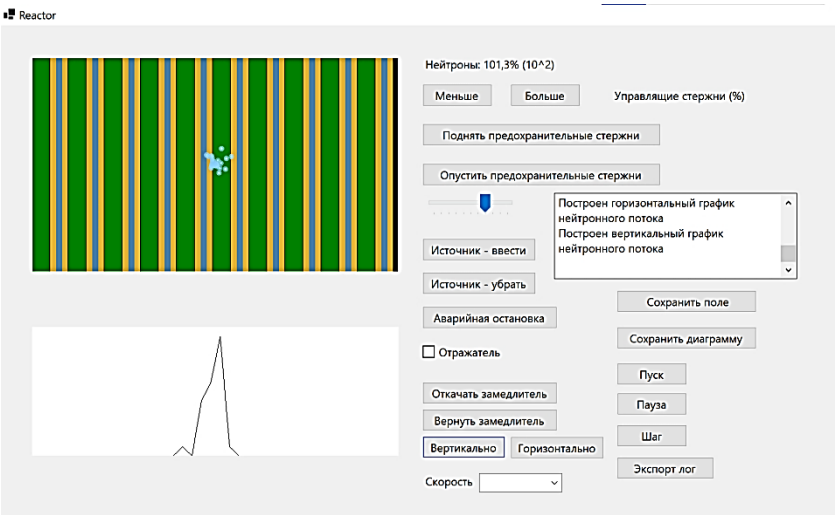


Рисунок 3 – Срабатывание аварийной остановки

На рисунке 4 представлен фрагмент программной реализации разработанной модели работы активной зоны ядерного реактора на языке программирования C#.

```
private void trackBarRods_Scroll(object sender, EventArgs e)
{
    model.ControlRodsLevel = trackBarRods.Value;
    Log($"Управляющие стержни подняты на {model.ControlRodsLevel}%");
    UpdateUI();
}
Ссылок: 1
private void btnSafetyUp_Click(object sender, EventArgs e)
{
    model.SafetyRodsUp = true;
    Log("Предохранительные стержни подняты (0%)");
    UpdateUI();
}

Ссылок: 1
private void btnSafetyDown_Click(object sender, EventArgs e)
{
    model.SafetyRodsUp = false;
    Log("Предохранительные стержни полностью опущены (100%)");
    UpdateUI();
}
```

Рисунок 4 – Фрагмент программного кода на языке программирования C#

В ходе выполнения работы были проанализированы основные подходы к компьютерному моделированию физических процессов, применяемые в учебной и научной практике. Особое внимание было уделено моделированию нейтронно-физических процессов, протекающих в активной зоне ядерного реактора, которые трудно представить и исследовать с помощью традиционных лабораторных методов.

Был выполнен анализ существующих программных средств, используемых для моделирования физических систем, а также обоснован выбор языка программирования C# как инструмента для разработки визуальной модели. Использование C# позволило реализовать удобный графический интерфейс, обеспечить наглядную визуализацию процессов и организовать интерактивное управление параметрами модели.

В результате была разработана компьютерная модель, позволяющая наглядно демонстрировать влияние управляющих и предохранительных стержней, замедлителя и источника нейтронов на развитие цепной реакции. Модель отображает изменение плотности нейтронного потока во времени и работу системы аварийной защиты, что способствует более глубокому пониманию принципов функционирования ядерного реактора.

Полученные результаты подтверждают, что компьютерное моделирование является эффективным средством обучения, позволяющим повысить наглядность и доступность сложных физических процессов. Разработанная модель может быть использована в учебных целях при изучении основ ядерной физики и физики реакторов, а также может служить основой для дальнейшего расширения и усложнения модели с учётом дополнительных физических факторов.

Список литературы

1. Майер, Р. В. Компьютерное моделирование : учеб.-метод. пособие для студентов пед. вузов [Электронное учебное издание на компакт-диске] / Р. В. Майер. – Глазов : Глазов. гос. пед. ин-т, 2015. – 24,3 Мб.

2. Рихтер, Д. CLR via C#. Программирование на платформе Microsoft .NET Framework / Д. Рихтер. – СПб. : Питер, 2014.

3. Троелсен, Э. Ф. C# 7.0 и .NET Core / Э. Троелсен, Ф. Джапиксе. – СПб. : Питер, 2018.

A visual computer model illustrating neutronic processes in a nuclear reactor core was developed and implemented. The model allows for visual observation of changes in neutron flux density, the influence of control and safety rods, the moderator, and the operation of the emergency protection system. A key feature of the developed model is its simultaneous consideration of the reactor's physical parameters and their dynamic visualization over time, enhancing the clarity and educational value of the software.

Агафонов Герман Николаевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь Agafonov_GN_23@student.grsu.by.

Научный руководитель – *Крупская Татьяна Константиновна,* магистр педагогических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, krupskay_tk@grsu.by.

УДК 533.9; 621.793.18

П. А. АЛЕКСАНДРОВИЧ, Д. А. ГОЛОСОВ, С. Н. МЕЛЬНИКОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНЕСЕНИЯ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ СЛОЁВ КОАКСИАЛЬНЫМ МАГНЕТРОНОМ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МИШЕНЬЮ НА КРУПНОФОРМАТНЫЕ ПОДЛОЖКИ

Разработана математическая модель для расчета толщины наносимых слоев при реактивном магнетронном распылении коаксиальными магнетронами с цилиндрической мишенью. Данная модель базируется на интегрировании плотности распыленного потока с каждой точки зоны распыления и позволяет рассчитать скорость нанесения слоев и толщину покрытия в любой точке подложки.

Одним из сравнительно простых методов увеличения равномерности по толщине наносимых слоев является использование вращения подложек при смещении оси магнетрона относительно оси подложки [1]. Данный метод позволяет при небольших размерах зоны распыления магнетрона получать сравнительно высокую равномерность по толщине даже на подложках, превышающих в несколько раз размер мишени. Однако при нанесении пленок на крупноформатные подложки и если они многослойные, то вращение подложки может пагубно сказаться на результирующей пленке. Чаще всего при разработке таких систем не уделяется должного внимания конфигурации процесса, и взаимное расположение магнетрона и подложки выбирают эмпирически, путем проведения ряда экспериментов. При этом не учитываются особенности распыления различных материалов. Поэтому наиболее целесообразно применить коаксиальную магнетронную распылительную систему (МРС) большого диаметра, в которой подложка располагается на некотором удалении от центральной оси (рисунок 1). До настоящего времени для такого варианта магнетрона не предпринималось попыток разработать математические модели, которые позволяли бы рассчитываться скорость, толщину и равномерность наносимых слоев.

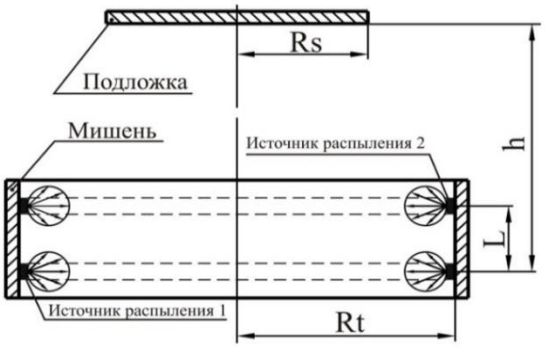


Рисунок 1 – Геометрическая схема модели системы МРС для нанесения на крупноформатные подложки методом реактивного магнетронного распыления (*Rs* – радиус подложки, *Rt* – радиус мишени, *L* – расстояние между кольцами распыления, *h* – расстояние между нижним колцом распыления и подложкой)

Рассмотрев особенности геометрической схемы модели системы коаксиальной МРС (рисунок 1), можно увидеть, что мишень располагается под углом к плоскости мишени, поэтому модель процесса напыления разработана для случая, когда диаметр мишени значительно больше диаметра подложки, а углы распыления и конденсации не равны друг другу. Для увеличения равномерности покрытия на мишени будут две кольцевых зоны распыления. Так как рассматривается реактивное нанесение пленок, то в модели к необходимым свойствам материала добавлен стехиометрический индекс материала.

Для разработки математической модели были определены необходимые входные параметры, от которых зависят длина свободного пробега и термализация: давление газа, температура газа, атомная масса газа, радиус атома газа, энергия распыленных атомов, радиус распыленных атомов. Математическая модель для получения искомых значений базируется на последовательном вычислении: концентрации молекул газа, скорости молекул газа, энергии молекул газа, скорости распыленных атомов, коэффициента аккомодации, количества соударений до термализации, эффективного газокинетического сечения столкновения, что позволяет рассчитать длину свободного пробега распыленного атома [2].

Для определения скорости нанесения тонкопленочных слоев на подложке будет использоваться метод интегрирования распыленного потока с каждой точки зоны распыления. Скорость нанесения и толщина в каждой точке подложки, расположенной на определенном расстоянии от распыляемых мишеней, рассчитывается как сумма скоростей из кольцевых зон распыления. При этом для группы материалов, у которых максимум эмиссии при распылении не совпадает с направлением нормали к поверхности, применялась функция пространственно-

го распределения распыленных частиц. При этом скорость нанесения в точке подложки с координатами, расположенной на расстоянии l от точки на кольце источника распыления 1 МРС, может быть рассчитана по формуле:

$$V_1(x_2, y_2) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\upsilon_t(r_1)\cos\varphi_1(r_1,\theta)\cos\phi_1(r_1,\theta)F(r_1,\theta)}{{l_1}^2(r_1,\theta)} d\theta \quad (1)$$

где l – расстояние от точки распыления до точки конденсации; φ – угол распыления и конденсации; θ – угол текущей точки распыления относительно длинной оси магнетрона, при α = 1 формула преобразуется в обычное косинусное распределение; F – функция пространственного распределения распыленных частиц, которая используется для группы материалов, у которых максимум эмиссии при распылении не совпадает с направлением нормали к поверхности [3]. Разработанная модель позволяет рассчитать скорость нанесения слоев и толщину покрытия в любой точке подложки, вычислить протяженность зоны термализации, неравномерность и относительную толщину пленки. Однако поскольку в модели не учитываются эффекты термализации распыленного потока, она может использоваться только для анализа процессов магнетронного нанесения слоев при рабочем давлении в зоне нанесения не более 0,5–1,0 Па.

Для верификации разработанной модели проведены исследования влияния параметров процесса магнетронного распыления на равномерность толщины наносимых пленок тантала магнетронной распылительной системой с цилиндрической мишенью и сравнения с результатами моделирования при аналогичных параметрах. Для исследования профилей распределения толщины и скорости нанесения пленок использовалась подложка из стекла длиной 40 см и шириной 4 см. Подложка протиралась изопропиловым спиртом и на поверхность подложки с шагом 5 мм наносилась сетка для взрывной фотолитографии. Далее подложка устанавливалась на подложкодержатель. Расстояние магнетрон – подложка (h) изменялось от 86 до 226 мм.

В ходе экспериментов камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления 10^{-3} Па и производилась ионная очистка поверхности подложки. Для этого в газораспределительную систему ионного источника подавался Ar. Поток аргона в ионный источник составлял Q_{Ar} = 25 мл/мин, напряжение и ток разряда соответственно U_d = 90 В, I_d = 4,5 А, ток соленоида I_c = 1,5 А, ток компенсатора I_k = 18 А. Время очистки 270 с. Затем производилось нанесение пленок *Ta*. Для этого в газораспределительную систему магнетронов подавался *Ar*. Поток Q_{Ar} = 70 мл/мин., p = 0,08 Па. При исследовании влияния повышенного давления на профили распределения толщины поток аргона в камеру увеличивался до 150 мл/мин. и использовался режим дросселирования при откачке камеры. При этом давление в камере составляло p = 0,5 Па.

Распыление Та мишеней осуществлялось в режиме стабилизации мощности разряда (P_t = 2,0 кВт). Для распыления использовался униполярный импульсный ток (F = 10 кГц, D = 80 %). Время распыления во всех экспериментах было одинаковое и составляло 12 мин. После нанесения пленки образцы извлекались из камеры и производилась взрывная фотолитография. Затем образцы оттенялись. Для этого на образцы методом ионно-лучевого распыления наносилась пленка Ni толщиной 50–70 нм. Толщина нанесенных пленок определялась с помощью оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08. Скорость нанесения пленки определялась исходя из толщины пленки и времени нанесения. Неравномерность толщины пленки Δv рассчитывалась по формуле

$$\Delta v = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{v_{\max}} 100\% \quad (2)$$

где v_{max} и v_{min} – максимальная и минимальная скорость нанесения на исследуемом участке подложки.

На рисунке 2 приведены результаты верификации модели при различном расстоянии мишень – подложка. Также проведено сравнение результатов моделирования с профилями распределения толщины, полученным при повышенном давлении (p = 0,5 Па) (рисунок 3). Установлено, что при уменьшении расстояния мишень–подложка увеличивается относительная скорость нанесения на краях подложки и уменьшается относительная скорость нанесения на оси подложки. Максимальная равномерность скорости нанесения пленки получена при расстоянии мишень–подложка 146 мм.

В результате верификации установлено, что при Y_{Ta} = 0,4, k_{Ta} = 0,6 максимальная скорость нанесения на оси подложки составила v = 0,327 нм/с, в реальности она ниже v = 0,284 нм/с. Поэтому коэффициент распыления был уменьшен до Y_{Ta} = 0,35. При данном коэффициенте распыления скорость нанесения на оси подложки снизилась до 0,286 нм/с. Необходимость уменьшения коэффициента распыления связана с более низким напряжением разряда при повышенном давлении, и как следствие уменьшением эффективного коэффициента распыления.

Таким образом, было установлено, что разработанная модель позволяет с погрешностью менее 5 % прогнозировать профиль распределения скорости нанесения пленок. Однако существует проблема точного подбора углового распределения и термализации распыленных атомов. При моделировании использовалось экспериментальные данные коэффициента распыления, углового распределения распыленных атомов и ионно-

электронной эмиссии, полученные для планарного магнетрона. Однако на эти параметры влияют режимы распыления.

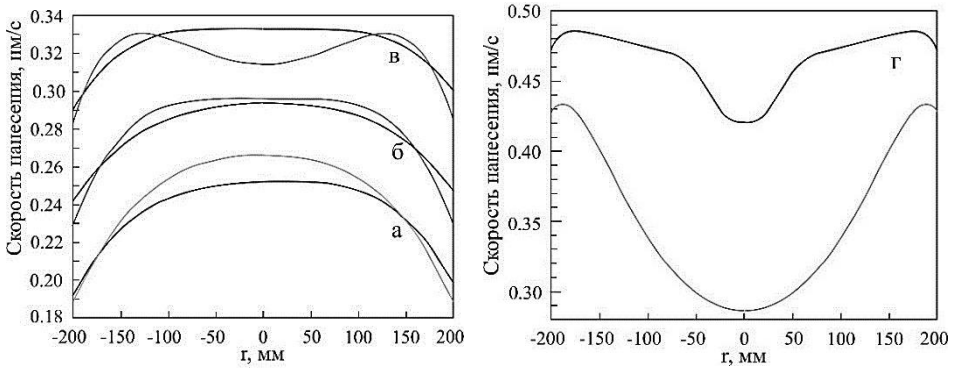


Рисунок 2 – Результаты верификации модели при различном расстоянии «мишень – подложка»: *а* – 226 мм, *б* – 186 мм, *в* – 146 мм, *г* – 86 мм (Y = 0,4, k = 0,6, I_{t2}/I_t = 40 %). Результаты моделирования показаны линиями серого цвета

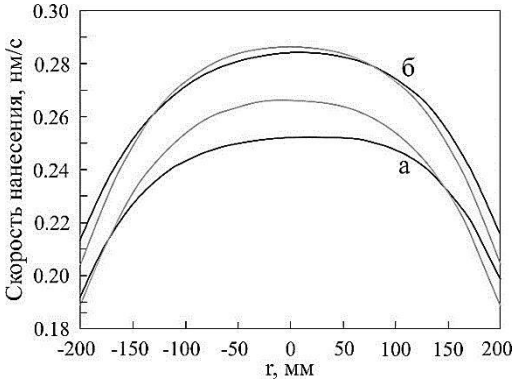


Рисунок 3 – Результаты верификации модели при расстоянии «мишень – подложка» 226 мм и различном давлении: *а* – 0,08 Па (Y_{Ta} = 0,4, k_{Ta} = 0,6), *б* – 0,5 Па (Y_{Ta} = 0,35, k_{Ta} = 0,6). Результаты моделирования показаны линиями серого цвета[1]

Список литературы

1. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А. П. Достанко [и др.] ; под общ. ред. акад. А. П. Достанко. – Минск : Беларуская навука, 2020. – 260 с.

2. Meyer, K. Thermalization of sputtered atoms / K. Meyer, I. K. Schuller, C. M. Falco // J. Appl. Phys. – 1981. – Vol. 52, № 9. – P. 5803–5805.

3. Ekpe, S. D. Theoretical and experimental determination of the energy flux during magnetron sputter deposition onto an unbiased substrate / S. D. Ekpe, S. K. Dew // Journal of Vacuum Science and Technology A. – 2003. – Vol. 21. – P. 476–483.

The article briefly describes the proposed mathematical model for calculating the thickness of deposited layers during reactive magnetron sputtering using coaxial magnetrons with a cylindrical target and the results of its verification.

Александрович Павел Александрович, студент 4 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, pavelaleksandrowitch@yandex.ru.

Научные руководители – *Голосов Дмитрий Анатольевич*, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Центра 2.1 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, dmgolosov@gmail.com.

Мельников Сергей Николаевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Центра 2.1 НИЧ Б Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, adminset@bsuir.by.

[1]Исследования выполнены в рамках научного проекта № Т25КИ-055 (№ W2421112) при финансовой поддержке БРФФИ и Национального фонда естественных наук Китая.

УДК 536.21

Д. А. БАЙРАМОВ

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ

Рассматривается задача математического моделирования теплопроводности в однородной среде. Представлена дискретная математическая модель теплообмена между элементами расчетной сетки, основанная на уравнении теплопроводности. Предложен алгоритм вычисления температуры для компьютерного моделирования процессов теплопереноса.

В современную эпоху развития цифровых устройств многие физические эксперименты возможно реализовать при помощи компьютерных технологий. Данная возможность позволяет снизить затраты по ресурсам и времени, а также моментально получить результаты для дальнейшего анализа. В данной статье в качестве объекта исследования будет рассматриваться модель пластины в эксперименте теплопроводности однородных сред. Для этого будет рассмотрена теория и математическая модель, которая позволяет реализовать данный эксперимент в компьютерной среде.

Процесс переноса тепловой энергии в исследуемой однородной пластине описывается общим дифференциальным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{q}{c \cdot \rho} = a\nabla^2 T + \frac{q}{c \cdot \rho}$$

где ρ [кг/м^3], c [Дж/(кг·°С)] и λ [Вт/(м·К)] – соответственно плотность среды, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала; q – плотность мощности источников тепла. В данном случае q равно нулю, так как температура в среде не меняется со временем, тем самым получая стационарное температурное поле.

Три подряд упомянутых коэффициентов можно заменить одной величиной:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \tag{1}$$

где a [м^2/с] – коэффициент температуропроводности, характеризующий скорость выравнивания температуры внутри пластины.

В двумерном случае общее дифференциальное уравнение примет вид:

$$\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \tag{2}$$

Для получения однозначного решения данной модели и последующей компьютерной реализации необходимо задать краевые условия. Первое краевое условие – начальное условие, определяющее распределение температуры в начальный момент времени τ = 0

$$T(x, y, \tau)\big|_{\tau=0} = f(x, y) = const \tag{3}$$

Второе – это граничные условия, описывающие тепловое взаимодействие поверхности. Пусть в некоторых точках край пластины имеет постоянную температуру, а в некоторых точках теплоизолирован.

Задав необходимые условия, легко рассмотреть варианты компьютерной реализации. Одним из подходящих для такой цели является метод конечных разностей, [с. 565–566], позволяющий перейти от непрерывного дифференциального уравнения к системе линейных алгебраических уравнений, которую легко подвергнуть дискретизации и в последующем программно описать.

Для простейшего случая рассматривается явная конечно-разностная схема расчётов. Пластина представляется в виде двумерной сетки с шагом по двум осям Δx и Δy. Каждый узел характеризуется индексами i и j соответственно по x и y. Время также дискретизируется с шагом Δτ. Текущее состояние системы принимается за индекс n, а последующая за n + 1. Составленное уравнение теплопроводности в конечных разностях:

$$\frac{T_{i,j}^{t+1} - T_{i,j}^{t}}{\Delta \tau} = a\left(\frac{T_{i-1,j}^{t} - 2T_{i,j}^{t} + T_{i+1,j}^{t}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j-1}^{t} - 2T_{i,j}^{t} + T_{i,j+1}^{t}}{\Delta y^2}\right) \tag{4}$$

Данный метод позволяет упрощенно рассчитать температуру во внутренних узлах. Однако для соблюдения устойчивость и предотвращения расходимости решения шаг по времени выбирается из условия устойчивости явной схемы

$$\Delta\tau \le \frac{1}{2a\left(\frac{1}{\Delta x^2}+\frac{1}{\Delta y^2}\right)} \tag{5}$$

или, в случае $\Delta x = \Delta y$

$$\Delta\tau \le \frac{h^2}{4a} \tag{6}$$

При несоблюдении критерия устойчивости наблюдается эффект численной неустойчивости, приводя к расходимости алгоритма и потере физической достоверности результатов.

Проведя численный эксперимент и визуализацию температурных полей (рис. 1) с соблюдением данного критерия, подтверждается работоспособность математической модели.

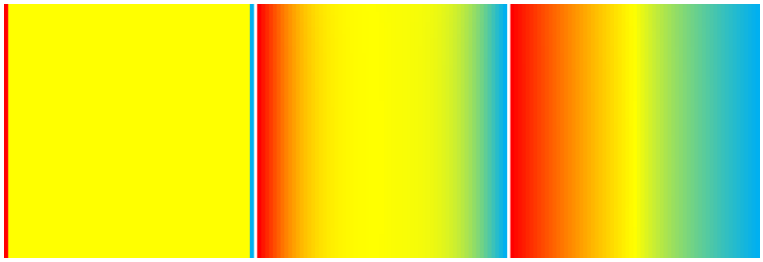


Рисунок 1 – Сетка температурного поля 65×65 клеток (слева направо соответственно Δτ = 0, Δτ = 100, Δτ = 1000)

В интересах достоверности проведем визуализацию при иных условиях, например, при наличии трёх точке: две с постоянной высокой температурой, третью с низкой (рисунок 2).

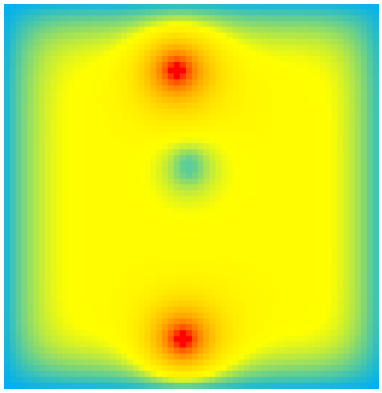


Рисунок 2 – Сетка температурного поля 65×65 клеток при наличии двух «горячих» и одной «холодной» точек

Успешность математической модели позволяет рекомендовать данный метод для его реализации в программном обеспечении.

Существует кроме того вариант неявной конечно-разностной схемы, отличающийся от явной тем, что нет необходимости соблюдать критерии устойчивости. Однако её сложность состоит в прямом решении системы линейных алгебраических уравнений на каждом шаге итерации, используя матрицы коэффициентов различными методами, например, методом Гаусса – Зейделя. Данный недостаток компенсируется точностью и надежностью полученных результатов вычислений в процессе, что на самом деле крайне важно при компьютерном моделировании физических процессов.

В ходе всего анализа была успешно разработана и проверена математическая модель процесса теплопроводности в однородной изотропной среде, в нашем случае, двумерной пластины. Можно сделать следующие выводы:

1. Была сформулирована дискретная математическая модель, основанная на конечно-разностной схеме решения двумерного уравнения теплопроводности параболического типа. Данная модель соблюдает все необходимые физические принципы, критерии и условия, подтверждающие функциональную пригодность в качестве программного обеспечения.

2. Проведена оценка графического представления математической модели в виде динамики тепловой карты с соблюдением краевых условий.

3. Рассмотрены два вида схем математического расчёта и выбран более доступный вариант, не сильно уступающий и сохраняющий требуемую точность[2].

Список литературы

1. Цветков, Ф. Ф. Тепломассообмен : пособие для ВУЗов / Ф. Ф. Цветков, Б. В. Григорьев. – 3-е изд., испр. – М. : Изд-во МЭИ, 2019. – 544 с

2. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики : учеб. пособие / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1999. – 798 с.

3. Майер, Р. В. Компьютерное моделирование физических процессов [Электронный ресурс] / Р. В. Майер. – Режим доступа: http://maier-rv.glazov.net/Komp_model.htm. – Дата доступа: 21.02.2026.

The article presents a mathematical model of thermal conductivity in a homogeneous medium based on a two-dimensional explicit finite-difference scheme. The developed computational algorithm using iterative methods effectively solves the heat equation with given boundary conditions for automated engineering analysis.

Байрамов Джошгун Абульфазович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, chezho4ek@gmail.com.

Научный руководитель – *Ситкевич Анастасия Леонидовна*, магистр физико-математических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, rotkevich_al@grsu.by.

УДК 004.94

Е. Д. БАСИНСКИЙ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТИЦЫ В ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЕ

В ходе выполнения работы были проанализированы основные подходы к компьютерному моделированию квантово-механических процессов. Особое внимание было уделено задаче движения частицы в одномерной потенциальной яме, которая является одной из базовых моделей квантовой механики. Отличительной особенностью разработанной модели является автоматический поиск энергетических уровней и их наглядная визуализация вместе с волновой функцией и плотностью вероятности.

Рассматривается движение частицы в одномерной потенциальной яме. Требуется определить:

- волновую функцию частицы $\psi(x)$;
- плотность вероятности $|\psi(x)|^2$;
- дискретные энергетические уровни E_n.

Дискретизация области. Пространственная область разбивается на одномерную равномерную сетку по координате x. В каждом узле сетки рассчитываются значения волновой функции и потенциала.

Выбор численного метода. Для решения стационарного уравнения Шрёдингера используется численный метод стрельбы в сочетании с пошаговым интегрированием дифференциального уравнения.

Разработка алгоритма. Алгоритм включает перебор значений энергии, численное решение уравнения Шрёдингера на заданной сетке и отбор допустимых значений энергии, при которых волновая функция удовлетворяет граничным условиям.

Программная реализация. Модель реализована на языке C# с использованием Windows Forms. Программа обеспечивает ввод параметров потенциальной ямы, выполнение численных расчётов и визуализацию графиков $U(x), \psi(x)$ и $|\psi(x)|^2$.

Модель реализована в виде приложения с графическим интерфейсом Windows Forms и предназначена для численного моделирования квантово-механического движения частицы в одномерной потенциальной яме.

В рамках модели выполняются следующие функции:

Потенциальная энергия частицы $U(x)$ отображается в виде графика; волновая функция $\psi(x)$ представляется графически; плотность вероятности $|\psi(x)|^2$ визуализируется на той же координатной оси; реализован поиск собственных значений энергии частицы.

Параметры модели: длина расчетной области L; ширина потенциальной ямы a; высота потенциальных барьеров U_1 и U_2; шаг дискретизации по координате Δx; диапазон и шаг изменения энергии.

В основе моделирования лежит стационарное уравнение Шрёдингера для одномерного случая [1–3].

[2]Разработанная математическая модель может служить основой для создания программного обеспечения, ориентированного на оперативный численный анализ теплофизических параметров сред и компьютерное проектирование систем обеспечения тепловых режимов.

Для численного решения уравнения Шрёдингера используется метод стрельбы, при котором волновая функция рассчитывается пошагово на дискретной сетке по координате x. Допустимые значения энергии определяются из условия конечности волновой функции на границах расчетной области.

На рисунке 1 представлено окно разработанной программы с результатами численного моделирования движения частицы в одномерной потенциальной яме.

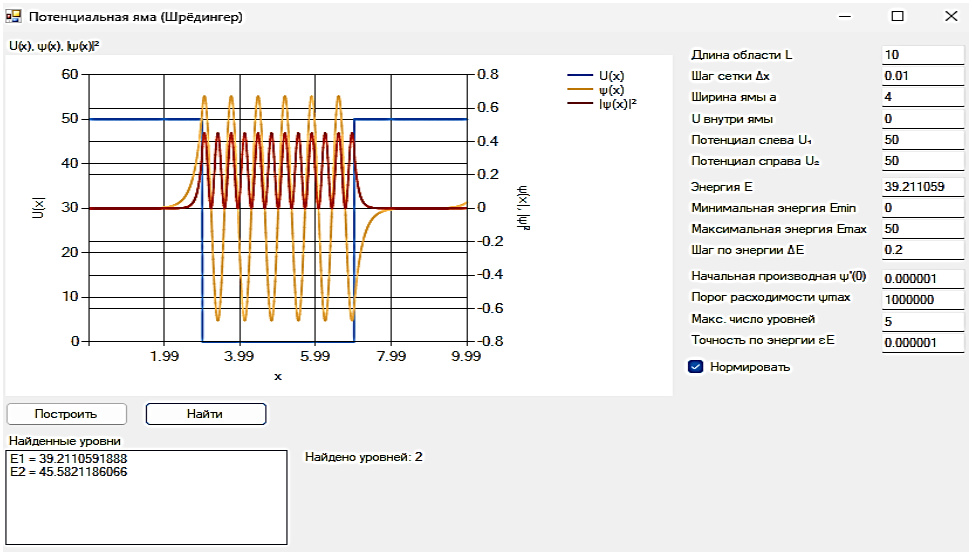


Рисунок 1 – Результат работы программы при поиске энергетических уровней частицы в потенциальной яме

На рисунке 2 показан пример обработки ошибочной ситуации в разработанной программе. Сообщение об ошибке появляется при задании слишком малого числа узлов расчётной сетки, что может возникнуть при выборе слишком большого шага дискретизации Δx или слишком малой длины расчётной области L.

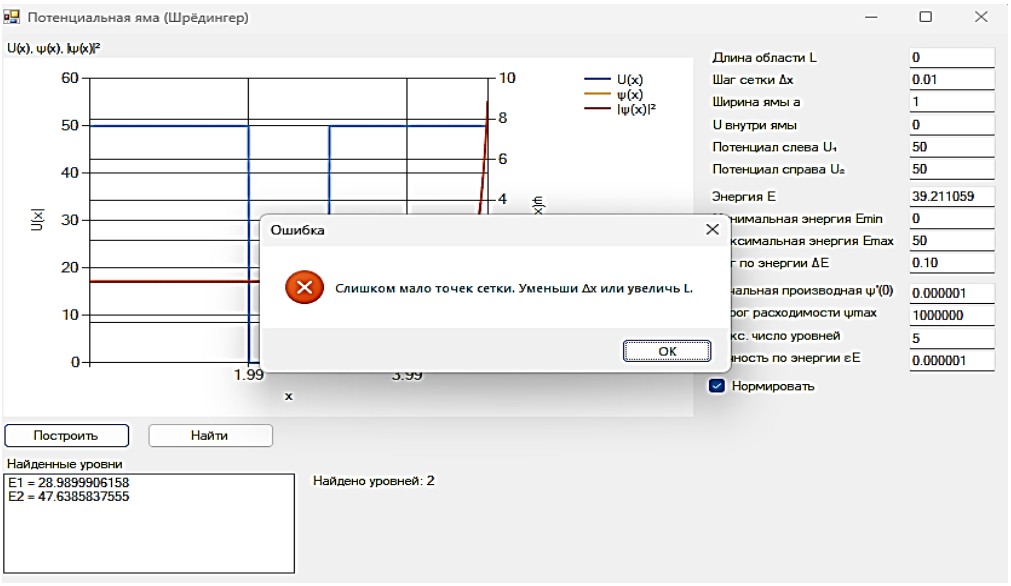


Рисунок 2 – Сообщение об ошибке при некорректных параметрах расчёта

На рисунке 3 представлено численное решение уравнения Шрёдингера (расчёт ψ). Что описывает: здесь реализовано уравнение Шрёдингера в дискретном виде и шаговый расчёт ψ и ψ'. На рисунке 4 представлено описание фрагмента кода поиска энергетических уровней. На рисунке 5 представлено построение графиков (после расчета).

```
double k = 2.0 * m / (hbar * hbar);

x[0] = 0.0;
psi[0] = psi0;
psiprime[0] = psiprime0;
U[0] = PotentialU(x[0], xLeft, xRight, Uinside, U1, U2);

for (int i = 1; i < n; i++)
{
    x[i] = i * dx;
    U[i] = PotentialU(x[i], xLeft, xRight, Uinside, U1, U2);

    psiprime[i] = psiprime[i - 1] + k * (U[i - 1] - E) * psi[i - 1] * dx;
    psi[i] = psi[i - 1] + psiprime[i] * dx;

    if (Math.Abs(psi[i]) > blowUpAbs || Math.Abs(psiprime[i]) > blowUpAbs)
    {
        for (int j = i + 1; j < n; j++)
        {
            x[j] = j * dx;
            U[j] = PotentialU(x[j], xLeft, xRight, Uinside, U1, U2);
            psi[j] = double.NaN;
            psiprime[j] = double.NaN;
        }
        break;
    }
}
```

Рисунок 3 – Численное решение уравнения Шрёдингера

```
        if (IsBad(F))
        {
            prevE = E;
            prevF = null;
            continue;
        }

        if (prevE.HasValue && prevF.HasValue)
        {
            if (prevF.Value == 0.0 || (prevF.Value * F < 0.0))
            {
                double a = prevE.Value, b = E;
                double fa = prevF.Value;

                for (int iter = 0; iter < 200 && Math.Abs(b - a) > tolE; iter++
                {
                    double mid = 0.5 * (a + b);
                    var rm = ShootEulerCromer(mid, L, dx, xLeft, xRight, Uinsid
                    double fm = rm.psiEnd;
```

Рисунок 4 – Поиск энергетических уровней

```
    Ссылок: 1
    private void PlotAll(double[] x, double[] U, double[] psi, bool normalize)
    {
        chart1.Series["U(x)"].Points.Clear();
        chart1.Series["psi(x)"].Points.Clear();
        chart1.Series["|psi|^2"].Points.Clear();

        double dx = (x.Length > 1) ? (x[1] - x[0]) : 1.0;
        var p = normalize ? NormalizePsi(psi, dx) : psi;

        for (int i = 0; i < x.Length; i++)
        {
            chart1.Series["U(x)"].Points.AddXY(x[i], U[i]);

            if (double.IsNaN(p[i])) break;

            chart1.Series["psi(x)"].Points.AddXY(x[i], p[i]);
            chart1.Series["|psi|^2"].Points.AddXY(x[i], p[i] * p[i]);
        }
    }
```

Рисунок 5 – Построение графиков

В рамках работы была разработана компьютерная программа, реализующая численное решение стационарного уравнения Шрёдингера. Программа позволяет визуализировать потенциальную энергию, волновую функцию и плотность вероятности, а также автоматически определять дискретные энергетические уровни частицы. Реализованный метод стрельбы обеспечивает наглядную демонстрацию квантования энергии и зависимости формы волновой функции от параметров потенциальной ямы.

Для реализации модели был выбран язык программирования C# с использованием графического интерфейса Windows Forms. Данный выбор обусловлен удобством создания пользовательского интерфейса, возможностью наглядного отображения графиков и простотой изменения параметров моделирования. Разработанная программа ориентирована на образовательные цели и позволяет пользователю активно взаимодействовать с моделью, изменяя физические параметры и анализируя получаемые результаты.

Таким образом, выполненная работа демонстрирует эффективность компьютерного моделирования при изучении квантово-механических систем. Разработанная модель может быть использована в учебном процессе для наглядного объяснения основных понятий квантовой механики, а также может служить основой для дальнейшего расширения и исследования более сложных квантовых систем.

Список литературы

1. Майер, Р. В. Компьютерное моделирование : учеб.-метод. пособие для студентов пед. вузов [Электронное учебное издание на компакт-диске] / Р. В. Майер. – Глазов : Глазов. гос. пед. ин-т, 2015. – 24,3 Мб.

2. Ландау, Л. Д. Квантовая механика: нерелятивистская теория / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Физматлит, 2019.

3. Грибов, А. Н. Основы квантовой механики / А. Н. Грибов. – М. : Высшая школа, 2018.

During the course of this work, the main approaches to computer modeling of quantum mechanical processes were analyzed. Particular attention was paid to the problem of particle motion in a one-dimensional potential well, which is one of the fundamental models of quantum mechanics. A distinctive feature of the developed model is the automatic search for energy levels and their visualization, along with the wave function and probability density.

Басинский Егор Денисович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, Basinskij_ED_23@student.grsu.by.

Научный руководитель – *Крупская Татьяна Константиновна*, магистр педагогических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, krupskay_tk@grsu.by.

УДК 537.528+533.9.07

А. А. БЛИЗНЯК

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА НАНОЧАСТИЦ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОДНИКОВ В ЖИДКОСТИ

Предложена обобщенная аналитическая модель электрического взрыва цилиндрических проводников под действием больших импульсных токов. Модель объединяет электротепловой подход с условиями оптимального взрыва в жидкой среде и учитывает последующее формирование наноразмерных частиц. Получены соотношения для критических параметров взрыва, оптимальных размеров проводников и их размерных характеристик.

Введение. В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост интереса к наноразмерным материалам, обладающим уникальными физико-химическими свойствами, не характерными для макроскопических аналогов [1; 2]. Среди многочисленных методов получения наночастиц особое место занимает электрический взрыв проводников (ЭВП), в частности, в жидкости [3; 4]. Этот метод отличается высокой производительностью, экологической безопасностью и возможностью синтезировать частицы различного состава (металлы, оксиды, нитриды) непосредственно в форме стабильных суспензий. При пропускании через тонкий металлический проводник импульса тока большой плотности ($j \geq 10^{11}$ А/м^2) происходит интенсивное выделение джоулева тепла, нагрев, плавление и взрывное испарение материала с последующим формированием плазменного канала. Окружающая жидкость (вода, этанол и др.) играет роль охлаждающей среды, способствуя конденсации наночастиц. Конечным продуктом данного процесса выступает наносуспензия – многофункиональный материал с большим числом применений в медицине, промышленности и других областях [5].

Несмотря на многочисленные экспериментальные работы, вопросы адекватного математического моделирования процесса ЭВП в жидкости остаются открытыми. Существующие модели [6; 7] требуют адаптации к конкретным условиям эксперимента и учёта большого числа факторов (скин-эффект, магнитогидродинамические неустойчивости, изменение теплофизических свойств материала).

Цель настоящей работы – разработать методику расчёта основных параметров ЭВП в воде для имеющщейся лабораторной установки с фиксированными характеристиками (ёмкость конденсатора, напряжение, геометрия проводника) и сопоставить полученные оценки с экспериментальными данными по дисперсности синтезированных частиц алюминия, меди и никеля.

Синтез наночастиц в плазме. Как уже было сказано, в данной работе рассматривается метод получения наночастиц путем ЭВП. Технологию получения наночастиц в плазме электрического взрыва кратко можно описать следующим образом. На первой стадии производится диспергирование материалов на составляющие их

частицы – превращение их в плазму. Тонкие проводники располагаются между двумя электродами и погружаются в жидкость или полтный газ (как правило инертный газ, находящийся под давлением в десятки атмосфер). На электроды подается импульс высокого напряжения, под действием которого по проводнику протекает импульс электрического тока большой величины. Проводник нагревается, плавится, испаряется [3-5]. Синтез наночастиц происходит на второй стадии, на стадии рекомбинации электровзрывной плазмы. После прекращения электрического тока паро-плазменный канал остывает и в нем начинаются рекомбинация электровзрывной плазмы и конденсация вещества. Конденсация вещества начиналась на неиспарившихся кластерах и нанокаплях исходного вещества. В процессах столкновений к ним присоединяются атомы, ионы, кластеры, другие нанокапли и они превращаются в наночастицы.

Установка для синтеза наночастиц в плазме электрического взрыва.

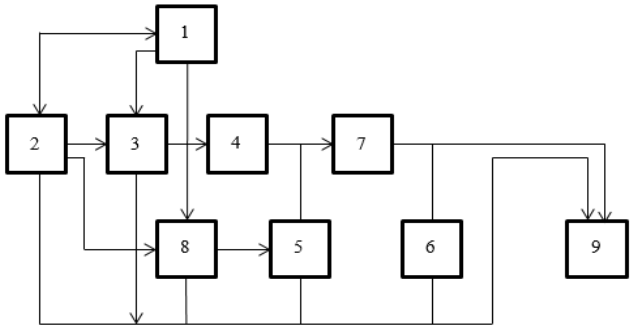


Рисунок 1 – Структурная схема устройства для реализации ЭВП

Особенностью использования электрического взрыва для получения наночастиц является необходимость формирования импульса высокого напряжения на взрываемом материале. Импульс напряжения должен иметь крутой передний фронт, а после взрыва проводника величина импульса напряжения должна снизиться и оставаться стабильной. Электрические импульсы для взрыва материалов формируются посредством высоковольтного генератора с емкостным накоплением энергии и индукционными развязками после его коммутации на нагрузку, которой является взрываемый материал.

На рисунке 1 приведена струтурная схема установки для синтеза наночастиц в водной среде. Генератор высоковольтных импульсов выполнен на концептуальной основе генераторов питания эксимепных ламп [9; 10]. Для определения параметров электрических цепей высоковольтного генератора, условий его согласования с нагрузкой использовалась методика подобная методике моделирования эксимерных лазеров и ламп [11–13]. Установка работает следующим образом. Электропитание установки осуществляется от однофазной сети 220 В, 50 Гц. Регулируемый источник питания *2* вырабатывает постоянное высокое напряжение (до 20 кВ), необходимое для зарядки емкостного накопителя *7* и питания блока включения коммутатора *8*. Зарядка емкостного накопителя производится через блоки зарядных резисторов *4* и *6*, которые обеспечивают заданное значение зарядного тока и скорость зарядки конденсаторной батареи. Емкостный накопитель *7* состоит из одного – четырёх параллельно включённых конденсаторов типа ИК25-12У4, что позволяет изменять общую ёмкость от 3 до 12 мкФ.

Для управления моментом включения служит блок включения коммутатора *8*. Коммутатор *5* предназначен для импульсного разряда емкостного накопителя на образец и представляет собой игнитрон ИРТ-6 (20 кВ, 5000 А), работающий в режиме одиночных импульсов с частотой один раз в две минуты. Высоковольтный импульс формируется LC-контуром и по коаксиальному кабелю транспортируется к разрядной камере. Устройство поджига, выполненное по тиристорной схеме, служит для точной синхронизации момента включения игнитрона. Управление установкой осуществляется со встроенного пульта *1*.

Теоретические основы для моделирования процесса электрического взрыва проводников в жидкости. Для целенаправленного синтеза наночастиц с заданными размерными характеристиками необходимо установить количественную связь между параметрами разрядного контура, свойствами материала проводника и конечным продуктом – наносуспензией. Анализ литературы показывает, что размер образующихся частиц определяется, прежде всего, удельной энергией, введённой в проводник, отнесённой к энергии сублимации материала [4; 8]. Однако реализация требуемого энерговклада возможна лишь при определённых условиях согласования геометрии проводника с электрическими параметрами установки. В связи с этим теоретическое описание процесса целесообразно строить как последовательность взаимосвязанных моделей, каждая из которых отвечает за определённый этап: формирование частиц, нагрев проводника и оптимальный режим взрыва.

Модель формирования наночастиц. Размерный состав наночастиц определяет область практического применения нанопорошков. Согласно экспериментальным данным, обобщённым в работе [4], распределение частиц по размерам может быть, как унимодальным, так и бимодальным в зависимости от энерговклада. При малых значениях введённой энергии ($e/e_c < 0{,}7$) преобладает диспергирование жидкого металла с образованием относительно крупных частиц (микронный диапазон). С ростом энерговклада увеличивается доля паровой фазы, и при $e/e_c > 2$ основным механизмом становится конденсация из пара, что приводит к формированию наноразмерных частиц. Для инженерных расчётов используются эмпирические зависимости среднечисленного диаметра частиц α_0 от отношения e/e_c $\alpha_0 = 0{,}3 * 10^{-6} * \left(\frac{e}{e_c}\right)^{-3}$ м, $0{,}7 \leq \frac{e}{e_c} \leq 2{,}1$; или $\alpha_0 = 0{,}5 * 10^{-6} *$

$\left(\frac{e}{e_c}\right)^{-0,5}$ м, $\frac{e}{e_c} > 2$. Здесь e – фактическая удельная энергия, введённая в проводник (на единицу массы), e_c – удельная энергия сублимации материала. Формулы позволяют по желаемому размеру частиц определить необходимое значение e/e_c и, следовательно, требуемую энергию, которую необходимо закачать в проводник. Таким образом, задача сводится к обеспечению заданного энерговклада при электрическом взрыве.

Электротепловая модель нагрева проводника.

Процесс преобразования электрической энергии в тепловую на начальной стадии взрыва описывается законом Джоуля–Ленца [6]. В предположении равномерного распределения тока по сечению проводника и пренебрежении теплообменом с окружающей средой количество выделившейся энергии к моменту времени t равно: $W(t) = \frac{l}{s}\int_0^t \frac{i^2(\tau)}{\gamma(\tau)}d\tau$, где l – длинна проводника, $S = \pi d^2/4$ – площадь поперечного сечения, $\gamma(\tau)$ – удельная электропроводность материала, зависящая от температуры. Также удобной характеристикой процесса является интеграл действия тока: $J(t) = \int_0^t \delta^2(\tau)d\tau$. Эта величина не зависит от геометрических параметров проводника, а зависит только от условий протекания заряда и свойств материала. Однако, наибольший интерес для нас вызывает, так называемое, критическое значение интеграла тока J_e, при котором происходит взрывное разрушение проводника. Это значение соответствует моменту, когда материал достигает температуры кипения и начинается интенсивное парообразование. Для меди $J_e = 1.95 * 10^{-17} A^2 * c * м^{-4}$, для алюминия $J_e = 1.09 * 10^{-17} A^2 * c * м^{-4}$. Также для определения энергии, необходимой для взрыва, нужно знать удельную электропроводность материала в критический момент γ_e. Её можно оценить, используя линейную аппроксимацию зависимости сопротивления от температуры: $\gamma_e = \frac{\gamma_0}{1+\theta_e c_0 \beta_0}$ где γ_0 – проводимость при комнатной температуре, θ_e – разность начальной температуры и температуры кипения проводника, β_0 – температуурный коэффициент сопротивления, c_0 – удельная теплоемкость проводника. В результате критическая удельная энергия (энергия, необходимая для взрыва единицы объёма проводника) составит: $\omega_e = \frac{J_e}{\gamma_e}$. Эта величина имеет смысл объёмной плотности энергии, при которой материал переходит в состояние, предшествующее взрыву.

Условия оптимального режима взрыва в жидкости.

Электротепловая модель, рассмотренная выше, описывает нагрев проводника, но не отвечает на вопрос: при каких геометрических размерах проводника вся запасённая в конденсаторе энергия действительно выделится в проводнике, а не рассеется в дуговом разряде после его разрушения? Ответ даёт модель оптимального («одиночного») режима взрыва, разработанная в [7]. Под оптимальным режимом понимается такой режим, при котором вся энергия, запасённая в конденсаторной батарее, вводится в проводник в течение первого полупериода разряда. В этом случае пауза тока отсутствует, а продукты взрыва имеют максимальную дисперсность. Экспериментально установлено, что для реализации такого режима диаметр и длина проводника должны удовлетворять соотношениям: $d_{opt} = 2\left(\frac{W_0}{z\rho\sigma_0(\lambda+r)}\right)^{-\frac{1}{4}} l_{opt} = 2 * 10^{-3} U_0 \sqrt[4]{LC}$, где d_{opt} и l_{opt} – диаметр и радиус проводника в оптимальном режиме W_0 – запасенная энергия конденсаторной батареи, ρ – плотность, σ_0 – удельная электропроводность, λ – удельная теплота плавления, r – удельная теплота парообразования металла проводника; z – волновое сопротивление цепи.

Расчёт оптимальных параметров и прогнозирование размерностей наночастиц.

С учетом характеристик имеющейся в распоряжении лабораторной установки, можно расчитать оптимальные параметры проводника, для алюминия – 0,35 мм, для меди – 0,28 мм, а для никеля – 0,18 мм. Из этого видно, что для нашей установки невозможно установить образец никеля оптимального диаметра. Используя эти параметры, можно теоретически высчитать введеную в проводник энергию, а вследствии и оценить предполагаемые размеры полученных частиц. Для алюминия $e/e_c = 3.64 > 2$, $a_0 = 0.5 * 10^{-6} * 3.64^{-0.5} = 262$ нм, для меди $e/e_c = 3.47 > 2$, $a_0 = 0.5 * 10^{-6} * 3.47^{-0.5} = 268$. Однако для никеля $e/e_c = 1{,}88 < 2$, $a_0 = 0.3 * 10^{-6} * 3.64^{-3} = 45$ нм, что свидетельствует о том что преобладающая часть частиц будет относится к большей фракции.

Вывод. Предложенная последовательность моделей позволяет замкнуть задачу прогнозирования размеров частиц: от желаемого размера через необходимый энерговклад к конкретным параметрам проводника и разрядного контура.

Список литературы

1. Витязь, А. П. Наноматериаловедение : учеб. пособие / П. А. Витязь, Н. А. Свидунович, Д. В. Куис. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 511 с.

2. Наноматериалы и нанотехнологии в машиностроении : учеб. пособие для студентов высших учебных заведений / В. А. Струк [и др.] ; под ред. В. А. Струка, В. А. Гольдаде. – Минск : РИВШ 2021. – 512 с.

3. Орлов, А. М. Электроплазменный метод получения металлических наночастиц заданного размера / А. М. Орлов, И. О. Явтушенко, Д. С. Боднарский // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, № 5. – С. 81–87.

4. Назаренко, О. Б. Электровзрывные нанопорошки: получение, свойства, применение / О. Б. Назаренко ; под ред. А. П. Ильина. – Томск : Изд-во ПТУ, 2005. – 148 с.

5. Майер, Г. Г. Объемные наноструктурные материалы: современные методы создания и исследования / Г. Г. Майер. – Томск : ИФПМ СО РАН, 2013. – 32 с.

6. Баранов, М. И. Упрощенная математическая модель электрического взрыва проводников под воздействием больших импульсных токов / М. И. Баранов // Електротехніка і Електромеханіка. – 2003. – № 3. – С. 59–64.

7. Хайнацкий, С. А. Условия реализации оптимального режима электрического взрыва проводников в жидкости / С. А. Хайнацкий // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35, вып. 7. – С. 12–17.

8. Зноско, К. Ф. Размерные характеристики наночастиц, синтезированных в плазме электровзрывного разряда / К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2024. – Т. 14, № 1. – С. 81–92.

9. Зноско, К. Ф. Системы высокочастотного возбуждения XeCl-эксиламп барьерного и емкостного разрядов / К. Ф. Зноско, В. Ч. Белаш // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 28–39.

10. Зноско, К. Ф. Коаксиальные XeCl-эксилампы барьерного и емкостного разрядов / К. Ф. Зноско, В. Ч. Белаш // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2019. – Т. 9, № 3. – С. 74–85.

11. Anufrik, S. S. Kinetic model for XeCl-lasers / S. S. Anufrik, A. P. Volodenkov, K. F. Znosko // Proc. 8th Internat. Conf. on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, LFNM 2006. – Kharkiv, Ukraine, June 2006. – P. 80–83, 4018200.

12. Anufrik, Slavomir. Simulation of active medium of XeCl lasers / Slavomir Anufrik, Alexander Volodenkov, Kazimir Znosko // Proceedings of SPIE 6731, International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2007: Advanced Lasers and Systems. – Minsk, Belarus. 2007. – 673106.

13. Anufrik, S. Modeling of emission characteristics of XeCl excilamps in pulse-periodic mode of work / S. Anufrik, A. Volodenkov, K. Znosko // High Temp. Mater. Process. – 2014. – Vol. 18, No 3. – P. 181–196.

This paper proposes a generalized analytical model for the electrical explosion of cylindrical conductors exposed to high pulsed currents. The model combines an electrothermal approach with the conditions for optimal explosion in a liquid medium and takes into account the subsequent formation of nanoscale particles. Relationships for critical explosion parameters, optimal conductor sizes, and their dimensional characteristics are obtained.

Близняк Андрей Александрович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненскиого государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, Andrey.bliznyak2004@gmail.com.

Научный руководитель – *Зноско Казимир Францевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, znosko@grsu.by.

УДК 535.391: 621.376

А. А. БОЙКО

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ОБРАЗЦОМ В ВОДЕ ПРИ НАНОСЕКУНДНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Описывается процесс моделирования парогазового образования, образующегося при действии лазерного излучения наносекундной длительности на образцы металлов, находящиеся в жидкости. При лазерном облучении поверхностей металлов происходит их послойное испарение, из-за чего выносится вещество, из которого формируются наночастицы, и образуется кратер на образце. В ходе работы была создана компьютерная модель, которая производит численное решение уравнений гидродинамики. При лазерной абляции, помимо испарения образца, также происходит испарение жидкости. По данной причине уравнения должны быть определены как для газа, так и для пара. Далее необходимо преобразовать уравнения в конечноразностный вид, так как вычислительная техника не работает с бесконечно малыми величинами. Определяются шаги по пространственной и временной координатах. Для каждой кольцевой зоны рассчитываются значения величин, которые затем, посредством цветовой шкалы, отображаются на плоскости. Таким образом, данная компьютерная модель позволяет выявить скачки скорости течения газа и пара, плотности, давления и температур. Также, меняя параметры модели, можно изучать зависимости рассматриваемых величин от количественных параметров окружающей среды.

В настоящее время лазерные технологии имеют широкое распространение в промышленности: лазеры используются, в первую очередь, для резки, сверления и сварки различных материалов [1; 2]. С помощью испарения металлов импульсным лазерным излучением также получают наночастицы с размерными параметрами, зависящими от материала и условий лазерной абляции [3–6]. Лазерная обработка может вестись как в газовой среде, так в жидкости. На сегодняшний день процессы, происходяшие при действии лазерного излучения на материалы, находящиеся в газе, достаточно хорошо изучены. Однако исследований лазерного воздействия на образцы материалов, находящиеся в жидкости недостаточно. Ещё менее изучены механизмы действия лазерного излученя на цветные металлы в жидкой среде. Одним из эффективных методов исследования явления развития парогазового облака является компьютерное моделирование.

Целью данной работы являлось моделирование процессов, протекающих на поверхности мишени (титан), находящейся в воде при воздействии лазерного излучения с плотностью мощности 10^8 Вт/см^2 и исследование радиальных распределений скорости течения газа и пара, плотности, температуры и давления в момент времени 10 мкс от начала воздействия.

Экспериментальное изучение данного явления не отражает его полной картины, так как помимо видимых изменений, таких как возникновение парогазового образования и формирование кратера на поверхности образца, происходит изменение параметров системы: скорости течения, плотности, температуры и давления [7]. Одним из решений данной проблемы является компьютерное моделирование, так как оно позволяет визуализировать процесс и учитывать влияние дополнительных параметров. У данного решения есть свои достоинства и недостатки. К преимуществам данного метода можно отнести, с одной стороны, отсутствие необходимости многократного проведения опыта на экспериментальной установке, возможность изучать явление в любые промежутки времени. С другой стороны, моделирование процесса образования и развития пароплазменного пузыря предполагает решение дифференциальных уравнений в частных производных. Вычислительные машины не работают с бесконечно малыми величинами, поэтому возникает необходимость перевести данные уравнения в конечноразностные. В ходе решения, по данной причине, возникают погрешности вычислений. Также без проведения эксперимента неизвестно, справедлива ли данная модель для процесса.

Компьютерное моделирование может вестись с помощью как специальных программных пакетов, так и языков программирования. Оно делится на следующие этапы: постановка задачи, построение математической модели, разработка алгоритма создания модели, разработка компьютерной модели, проведение эксперимента [8].

В ходе постановки задачи выясняем, с какой целью создается модель. В нашем случае это изучение развития парогазового пузыря на начальных стадиях.

При построении математической модели определяется взаимосвязь между параметрами. В случае явления лазерной абляции они связаны:

Уравнениями Эйлера для каждой из компонент

$$\rho_1 \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho_1 \left(\vec{V} \cdot \nabla\right)\vec{V} = -\nabla\, p$$

$$\rho_2 \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \rho_2 \left(\vec{U} \cdot \nabla\right)\vec{U} = -\nabla\, p$$

Уравнениями непрерывности для каждой из компонент

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + div\left(\rho_1\, \vec{V}\right) = A(t)\,\delta\left(r - r_0\right)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + div\left(\rho_2\, \vec{U}\right) = B(t)\,\delta\left(r - r_b\right)$$

Уравнениями тепломассопереноса для каждой из компонент

$$\rho_1 c_{p1} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_1 c_{p1} \vec{V} \cdot \nabla T = div\left(\alpha_1 \nabla T\right)$$

$$\rho_2 c_{p2} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_2 c_{p2} \vec{U} \cdot \nabla T = div\left(\alpha_2 \nabla T\right)$$

Уравнениями состояния для каждой из компонент

$$p_1 = \rho_1 \frac{R_u T}{\mu_1}$$

$$p_2 = \rho_2 \frac{R_u T}{\mu_2}$$

Так как изучаемый нами процесс развивается радиально и обладает радиальной симметрией, то данные уравнения наиболее целесообразно решать в сферических координатах, поскольку они будут содержать только производные по радиусу.

Алгоритм данной программы состоит из следующих пунктов:

1. Задать начальные параметры.
2. Создать массивы для искомых величин.
3. Задать начальные и граничные условия.
4. Задать условия для разрывов.
5. Разделить область на кольцевые зоны.

6. Решить систему уравнений с помощью разностной схемы.
7. Создать цветовую шкалу для графического отображения значений физических величин.
8. Отобразить результаты на графической плоскости.

Рассмотрим полученную диаграмму скорости течения газа продуктов абляции при воздействии лазерного излучения на образец титана, расположенный в воде, в момент времени 10 мкс (диаметр области – 2 см)

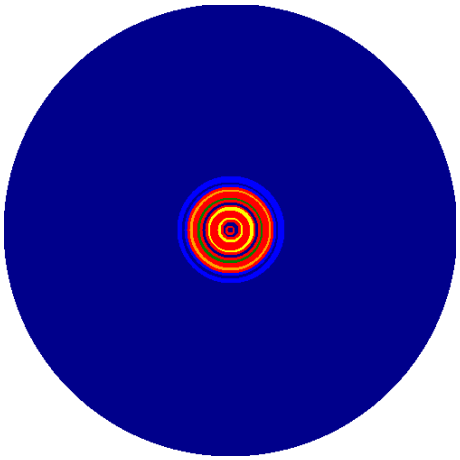


Рисунок 1 – Радиальное распределение скорости течения газа продуктов абляции при воздействии на титановый образец в момент времени 10 мкс от начала воздействия

На данной диаграмме отчетливо видно парогазовое образование, ограниченное от невовлеченной в процесс части области (синий цвет, течения газа нет). Также заметно интенсивное образование многочисленных чередующихся волн сжатия и разрежения (зоны зеленого, желтого и красного цветов, скорость от 240 м/с до 360 м/с и выше). В пятне фокусировки лазерного луча скорость течения газа максимальна (зоны, окрашенные в красный и желтый цвета, скорость от 240 м/с и выше). На границе парогазового образования скорость течения газа самая низкая, порядка 60 м/с.

Таким образом, компьютерное моделирование позволяет более подробно изучить процессы, протекающие при лазерной абляции металлов, находящихся в воде. Созданная модель может использоваться для изучения свойств ударных волн.

Список литературы

1. Гладуш, Г. Г. Особенности сварки металлов излучением импульсно-периодического Nd: YAG-лазера малой мощности / Г. Г. Гладуш, А. Ф. Глова, С. В. Дробязко // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36, № 11. – С. 1080–1082.

2. Лазерная прошивка сверхглубоких микронных отверстий в различных материалах при программируемом управлении параметрами лазерной генерации / Т. Т. Басиев [и др.] // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37, № 1. – С. 99–102.

3. Ануфрик, С. С. Размерные параметры наночастиц серебра и золота полученных при лазерной абляции в воде / С. С. Ануфрик, С. Н. Анучин // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности : сб. ст. / редкол.: А. А. Борисов, О. В. Соловьева, М. И. Яхкинд. – Казань, 2020. – С. 17–21.

4. Анучин, С.Н. Особенности лазерной абляции никеля / С. Н. Анучин, Е. А. Козлов // Физика конденсированного состояния : материалы XXIX Междунар. науч.-практ. конф. аспир., магистр. и студ. (Гродно, 22–23 апр. 2021 г.) / ГрГУ им. Янки Купалы ; гл. ред. Г. А. Гачко ; редкол.: Н. Г. Валько [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2021. – С. 10–12.

5. Ануфрик, С. С. Морфология поверхностных наноструктур цветных металлов, осажденных из растворов аблированных наночастиц / С. С. Ануфрик, С. Н. Анучин, И. Г. Сергиенко // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка. – 2021. – Т. 11, № 1. – С. 59–65.

6. Ануфрик, С. С. Морфология и структура покрытия, полученных при лазерной абляции цветных металлов / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, С. Д. Лещик, И. Г. Сергиенко, С. Н. Анучин // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Фізіка. – 2022. – Т. 12, № 3. – С. 59–65.

7. Босак, Н. А. Особенности формирования кратера на поверхности металла, облучаемого повторяющимися лазерными импульсами / Н. А.Босак, С. В. Васильев, А. Ю. Иванов, Л. Я. Минько, В. И. Недолугов, А. Н. Чумаков // Квантовая электроника. – 1999. – Т. 27, № 1. – С. 69 – 72.

8. Основные этапы компьютерного моделирования – URL: https://spravochnick.ru/informacionnye_tehnologii/informacionnye_modeli_i_modelirovanie/osnovnye_etapy_kompyuternogo_modelirovaniya.

The paper describes a model of vapor-gas formation formed under the action of laser irradiation on metal samples in liquid. At laser irradiation of metal surfaces their layer-by-layer vaporization occurs, due to which the substance from which nanoparticles are formed is taken out and a crater is formed on the sample. In the course of the work, a computer model was created, which produces a

numerical solution of the equations of hydrodynamics. During laser ablation, in addition to vaporization of the sample, there is also vaporization of the liquid. For this reason, the equations must be determined for both the ablation product gas and the vapor. Next, it is necessary to transform the equations into a finite-difference form, since computing does not work with infinitesimal quantities. Steps in spatial and time coordinates are determined. For each annular zone, the values of the quantities are calculated, which are then, by means of a color scale, displayed on the graphical area. Thus, this computer model makes it possible to detect jumps in flow velocity, density, pressure and temperatures – shock waves.

Бойко Александр Андреевич, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, alexanderboyko02@outlook.com.

Научные руководители – *Ануфрик Славамир Степанович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, anufrick@grsu.by.

Ходор Василий Григорьевич, магистр физико-математических наук, руководитель СПКБ, ведущий инженер-электроник физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, xodor_vg@grsu.by.

УДК 004.942

А. И. БОЙКОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ: ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЙ И РЕАЛИЗАЦИЯ

Описана разработка алгоритма для численного решения уравнения Рэлея-Плессе. Делается упор на выбор стека технологий (язык программирования, библиотеки для численного анализа, инструменты визуализации). Разработан программный комплекс для визуализации численного моделирования роста парогазового образования.

Введение. Изучение динамики паровых и газовых пузырей является фундаментальной задачей в ряде областей науки и техники, таких как гидродинамика, теплофизика, медицинская ультрасонография и промышленные процессы (например, кавитация в гидротурбинах, двигателях и теплообменниках) [1; 2]. Поведение одиночного пузыря подчиняется сложным нелинейным законам, а его эволюция во времени оказывает значительное влияние на окружающую среду, включая генерацию ударных волн, микроструй и локальных полей высоких температур и давлений [3].

Постановка задачи уравнения Рэлея-Плессе, упрощения и параметры. Первый анализ проблемы кавитации и динамики пузырьков провёл Рэлей. Пренебрегая поверхностным натяжением, вязкостью жидкости и предполагая несжимаемость жидкости, Рэлей показал из уравнения импульса математическую формулировку схлопывания пузырька на границе пузырька $R(t)$ [4, с. 145]:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}(\dot{R})^2 = \frac{p(R)-p(\infty)}{\rho}, \tag{1}$$

где R – радиус пузырька,

ρ – плотность жидкости,

p – давление жидкости,

$p(R)$ на границе раздела и $p(\infty)$ на удалении от пузырька.

Точка означает дифференциацию по времени. Несжимаемость жидкости означает, что скорость жидкости на расстоянии r от центра пузырька равна [4, с. 145]:

$$u(r,t) = \frac{R^2}{r^2}\dot{R}. \tag{2}$$

Давление в жидкости легко определяется из общего уравнения Бернулли следующим образом [4, с. 146]:

$$p(r,t) = p(\infty) + \frac{R}{r}[p(r) - p(\infty)] + \frac{1}{2}\rho\frac{R}{r}\dot{R}^2\left[1 - \left(\frac{R}{r}\right)^3\right]. \tag{3}$$

Рэлей пренебрегал поверхностным натяжением, вязкостью жидкости и поддерживал давление $p(\infty)$ постоянным. Динамика уравнения (1) изменяется при добавлении граничных условий для сферического пузырька. Также стоит учитывать, что только вязкость влияет только на граничные условия [4, с. 146]:

$$p(r) = p_i - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R}\dot{R}, \tag{4}$$

где p_i – давление внутри пузырька,

$p(r)$ – давление в жидкости на границе пузырька,

σ и μ – константа поверхностного натяжения и коэффициент вязкости жидкости соответственно.

Слагаемые, отражающие их влияние на сжатие, равны $2\sigma/R$ и $4\mu\ddot{R}/R$ соответственно. Допуская, что $p(\infty)$ является функцией времени [5], можно использовать уравнение (1) для описания экспериментальных наблюдений за ростом и схлопыванием кавитационных пузырьков в потоке жидкости.

Теперь можем записать обобщенное уравнение Рэлея-Плессе для динамики пузырьков, учитывая уравнение (4), получим [4, с. 146]:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\left(\dot{R}\right)^2 = \frac{1}{\rho}\left\{p_i - p(\infty) - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R}\dot{R}\right\}, \quad (5)$$

где давление газа на стенке пузырька p_i может быть функцией времени [5], а давление на бесконечности $p(\infty)$ тоже может быть функцией времени [5].

После преобразований мы можно определить равновесный радиус газового ядра для заданных значений p_i и $p(\infty)$:

$$R_0 = \frac{2\sigma}{p_i - p_\infty} \quad (6)$$

Очевидно, что пузырь такого радиуса будет оставаться в состоянии покоя, если он изначально находится в состоянии покоя, хотя следует отметить, что это равновесие является неустойчивым [4, с. 146].

После вывода уравнение (5) Рэлея-Плессе для динамики пузырьков рассмотрим каждый член этого уравнения:

$R\ddot{R}$ – обусловлен ускорением границы пузырька [1, с. 213; 6], $\frac{3}{2}\left(\dot{R}\right)^2$ – результат перераспределения давления из-за движения жидкости вокруг пузыря [1, с. 213].

$\frac{4\mu}{R}\dot{R}$ – описывает сопротивление движению пузыря, обусловленное вязкостью окружающей жидкости [6].

$\frac{2\sigma}{R}$ – показывает силу, действующую на границу пузыря вследствие поверхностной энергии [1, с. 212].

$p_i - p(\infty)$ – движущая сила колебаний, которая может быть как положительной (расширение пузыря), так и отрицательной (сжатие) [2, с. 147; 3].

При выводе и применении уравнения Рэлея-Плессе принимаются следующие допущения:

Сферическая симметрия: форма пузырька остаётся идеально сферической. Это возможно при равномерных внешних условиях и малых масштабах [2, с. 147].

Несжимаемость жидкости: плотность жидкости считается постоянной, что позволяет избежать учёта акустических эффектов [6; 7].

Отсутствие теплопередачи: температура жидкости и газа в пузыре считается одинаковой, и не учитывается теплообмен между ними [1, с. 219].

Идеальная граница пузырька: не рассматриваются процессы растворения, испарения или обмена массой между газом и жидкостью [2, с. 150].

Выбор стека технологий. Для моделирования динамики парового пузыря требовался выбор такого стека технологий, который с одной стороны обеспечил бы высокую производительность для ресурсоемких численных расчетов, а с другой – позволил создать интуитивно понятный и интерактивный инструмент визуализации. Учитывая двухкомпонентную архитектуру проекта, выбор технологий проводился раздельно для каждой из этих частей.

Язык C# был выбран для реализации core-модуля. Его ключевыми преимуществами для данной задачи являются строгая типизация, высокая производительность, сравнимая с C++, простая возможность интеграции с другими промышленными системами и фреймворками .NET. Это особенно важно для итерационных расчетов, выполняемых в цикле с большим количеством шагов по времени.

Хотя основной расчет был реализован на C#, Python с библиотекой SciPy был использован для быстрого прототипирования и верификации упрощенных моделей, таких как уравнение Рэлея-Плессе. Это позволило быстро проверить корректность основных физических предположений перед реализацией полной модели на C#.

В итоге для расчётного ядра C# как основной язык для высокопроизводительных вычислений и Python (SciPy) как вспомогательный инструмент для прототипирования.

Следующим этапом был выбор технологий для визуализации. Основным требованием была возможность интерактивного отображения трехмерной сцены с динамически изменяющимся объектом. Выбор стоял за связкой Python и PyOpenGL. Данный выбор обусловлен следующими факторами:

Гибкость и контроль: OpenGL позволяет напрямую работать с видеокартой, эффективно рендерить 3D-геометрию и управлять шейдерами, что критично для плавной анимации.

Производительность: Несмотря на то, что Python является интерпретируемым языком, все тяжелые операции (рендеринг) делегируются через PyOpenGL высокооптимизированным драйверам GPU, что обеспечивает высокий FPS.

Библиотеки: Использование библиотек NumPy существенно упрощает и ускоряет работу с массивами вершин и матрицами преобразований, которые являются основой 3D-графики.

GLFW: Библиотека GLFW была выбрана для создания окна, управления контекстом OpenGL и обработки пользовательского ввода (клавиатура, мышь). Она является легковесной, кроссплатформенной и идеально подходит для задач, не требующих сложного GUI.

Для обеспечения связи между расчетным модулем на C# и модулем визуализации на Python был применен простой и эффективный механизм межпроцессного взаимодействия (IPC) через стандартные потоки ввода-вывода (stdin/stdout). Данные о радиусе пузыря на каждом временном шаге сериализуются в формате JSON на стороне C# и передаются в Python-скрипт. Этот подход обеспечивает слабую связанность компонентов: расчетный модуль может быть легко заменен или модифицирован без изменения кода визуализации и наоборот.

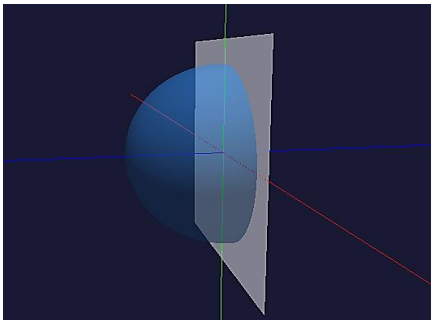


Рисунок 1 – Визуализация динамики роста пузыря

Заключение. Представленное решение в данной статье образует готовый инструментарий для численного анализа нелинейной динамики пузыря, который может быть использован в научных и инженерных расчетах, связанных с кавитацией, ультраакустикой и гидродинамикой. Ключевой задачей был выбор и обоснованный стек технологий, оптимально подходящего для решения двуединой проблемы: выполнения ресурсоемких вычислений и интерактивной визуализации результатов.

Список литературы

1. Кузнецов, В. И. Гидродинамика и акустика / В. И. Кузнецов. – М. : Энергоатомиздат, 1980. – 320 с.

2. Шмидт, Д. В. Основы акустики / Д. В. Шмидт ; пер. с англ. – М. : Наука, 1972. – 380 с.

3. Franc, J.-P. Numerical features of cavitation models based on the Rayleigh-Plesset equation / J.-P. Franc // Journal of Computation Physics. – 2020. – Vol. 418. – P. 109637.

4. Plesset, M. S. Bubble dynamics and cavitation / M. S. Plesset, A. Prosperetti // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1977. – Vol. 9. – P. 145–185.

5. Ghahramani, E. Numerical simulation and analysis of multi-scale cavitation flows using a hybrid mixture-bubble model / E. Ghahramani // Chalmers University of Technology. – 2020. – P. 76.

6. Klotz, T. Dynamics of the Rayleigh-Plesset equation modeling a gas-filled spherical bubble / T. Klotz // SIAM Journal on Applied Dynamical Systems. – 2022. – Vol. 21, iss. 2. – P. 1025–1055.

7. Zeidi, S. A. R. Numerical simulation and analysis of multi-scale cavitating flows / S. A. R. Zeidi // Journal of Fluid Mechanics. – 2021. – Vol. 922. – Art. A19.

This article is devoted to the development of an algorithm for the numerical solution of the Rayleigh-Plesset equation. The emphasis is on choosing a technology stack (programming language, libraries for numerical analysis, visualization tools). A software package has been developed for visualizing numerical modeling of the growth of combined-cycle gas generation.

Бойков Артур Игоревич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, keksik.work@gmail.com.

Научный руководитель – *Ситкевич Анастасия Леонидовна*, магистр физико-математических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, girl-physicist@mail.ru.

УДК 004.932

М. А. БОЧКО

СИСТЕМА МАШИННОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЛИПКИХ ЗАСТЁЖЕК ПОДГУЗНИКОВ ДЛЯ ВЗРОСЛЫХ

Рассматриваются разработка и результаты внедрения системы автоматизированного контроля качества застёжек-липучек подгузников для взрослых на базе технологий машинного зрения.

Целью настоящей работы является разработка и внедрение системы автоматизированного контроля качества застёжек-липучек подгузников для взрослых с использованием технологий машинного зрения, обеспечивающей повышение точности и скорости выявления дефектов в процессе производства и последующей отбраковки некачественной продукции.

Выходной контроль качества выпускаемой продукции играет ключевую роль в производственном процессе, поскольку уровень качества изделий напрямую определяет их потребительские свойства, безопасность, а также формирует имидж компании-производителя. Классические подходы к контролю качества обычно весьма ресурсоемки и сильно зависят от роли человека в организации процессов контроля. В связи с этим внедрение автоматизированных систем контроля, в частности основанных на технологиях машинного зрения, является эффективным и экономически целесообразным решением.

Анализ проблемы. Производственная линия GDM IP-AD (Италия) предназначена для автоматизированного изготовления подгузников и эксплуатируется на одном из промышленных предприятий г. Гродно. Данная линия имеет полуавтоматическую модульную архитектуру, что обеспечивает возможность оперативного изменения конфигурации отдельных производственных участков, а также интеграции дополнительных модулей для оптимизации технологического процесса и расширения ассортимента выпускаемой продукции.

В качестве основного управляющего элемента применяется программируемый логический контроллер производства компании Siemens (Германия), что обеспечивает эффективное управление технологическим процессом и позволяет поддерживать высокий уровень надежности и производительности оборудования.

Одним из важных конструктивных элементов подгузников является липкая застёжка (липучка), от которой во многом зависит удобство использования и надежность фиксации изделия на теле человека.

Установка липучек осуществляется в автоматическом режиме на участке сгибания изделия и контроля наличия застёжек производственной линии.

Контроль непосредственно самого наличия липучек осуществляется с помощью оптических датчиков, работающих на отражение. Сигналы с оптических датчиков поступают на программируемый логический контроллер(ПЛК) линии, где синхронизируется с сигналом индуктивного датчика, контролирующего кулачок двигателя, в случае, если сигналы не совпадают - система фиксирует брак установки.

Данная система контроля отличается простотой и позволяет выявлять отсутствие липучки, однако не обеспечивает обнаружение ошибок её позиционирования. Основной контроль качества выполняется оператором производственной линии. При высокой производительности оборудования (около 80 подгузников в минуту) оператор не способен достаточно качественно анализировать каждое изделие, что приводит к быстрому утомлению и увеличению доли не выявленного брака. Таким образом, применяемый метод контроля является недостаточно эффективным и существенно зависит от человеческого фактора. В связи с этим было принято решение о разработке автоматизированной системы контроля установки липучек на основе технологий машинного зрения.

Выбор конфигурации разрабатываемой системы машинного зрения. Для решения обсуждаемой задачи можно использовать одну или две видеокамеры. Использование одной камеры с экономической точки зрения более выгодно, однако для перекрытия необходимого поля зрения при этом требуется разместить камеру на достаточно большом расстоянии от объекта, а также использовать дорогостоящий широкоугольный объектив, вносящий собственные искажения в анализируемое изображение.

Произведём расчёт минимально необходимого расстояния от контролируемого объекта до видеокамеры:

$$S = F \cdot (1 + M),$$

где S – расстояние до объекта; F – фокусное расстояние объектива камеры; M – масштаб, представляющий собой отношение линейного размера объекта L_0 к линейному изображению его в кадре L_k (в данном случае этот параметр определен шириной сенсора камеры). Тогда получим:

$$S = F \cdot (1 + \frac{L_0}{L_K})$$

Принято решение использовать видеокамеру на основе популярного сенсора Omnivision OV2710 (США) [1], ширина и высота которого составляют 5,856 мм и 3,276 мм соответственно.

В качестве линейного размера объекта примем максимальную ширину используемого на линии конвейерного полотна $L_0 = 900$ мм. Исходим из необходимости попадания в поле зрения камеры всей ширины конвейерной линии, на которой перемещаются контролируемые объекты.

Для определения расстояния от конвейерной линии до камеры примем фокусное расстояние объектива камеры F = 2,8 мм (как самое популярное среди недорогих широкоугольных объективов), тогда получим, что расстояние от объектива камеры до анализируемого объекта должно составлять минимум 435 мм.

При таком расстоянии камера будет значительно выступать за габариты линии, что неудобно и потребует дополнительных мероприятий по защите камеры от повреждения и для обеспечения требований техники безопасности. Кроме этого, применение широкоугольного объектива приведёт к значительным геометрическим искажениям, таким как искажение перспективы или дисторсия. Такие искажения затрудняют анализ изображений и усложняют алгоритмы последующей обработки данных.

При использовании двух видеокамер нет необходимости видеть весь анализируемый объект (подгузник) целиком, поскольку анализируемые участки (липучки) расположены только по его краям. Таким образом можно уменьшить расстояние от видеокамер до объекта и применить объективы с большим фокусным расстоянием, одновременно существенно уменьшив геометрические искажения.

Нами принято решение использовать объективы с фокусным расстоянием F = 50 мм. При данном фокусном расстоянии влияние дисторсии на измерения будет незначительным. При этом согласно выражению (2) минимальное расстояние от видеокамеры до объекта будет около 210 мм при условии, что в кадре будет только одна липучка и небольшое количество основного материала по краям, что компенсирует возможное смещение полотна на конвейерной ленте в процессе производства. Такое расстояние приемлемо для системы, интегрируемой в модернизируемую производственную линию. На основании этого нами была выбрана конфигурация системы с двумя видеокамерами.

Описание конструкции системы машинного зрения для отбраковки подгузников с дефектными липучками. Блок-схема разработанного программно-аппаратного комплекса для контроля установки липучек подгузников представлена на рисунке 1.

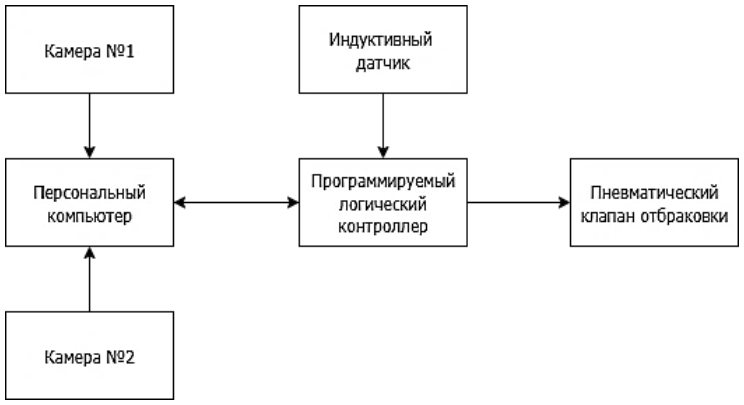


Рисунок 1 – Блок-схема программно-аппаратного комплекса для контроля качества установки липучек подгузников

ПЛК после получения сигнала от индуктивного датчика контроля положения ножа проверяет наличие липучек по алгоритмам, предусмотренным производителем линии, и отправляет сигнал наличия липучки на компьютер. После этого происходит захват кадра с каждой из камер и их обработка. В случае обнаружения липучки, которая не соответствует заданным критериям ее положения относительно заготовки подгузника, персональный компьютер отправляет информацию в ПЛК о необходимости отбраковки. После этого бракованная продукция сдувается с конвейерной ленты при помощи пневматической системы, управляемой сигналами ПЛК. Взаимодействие ПЛК и компьютера осуществляется через сетевой интерфейс Ethernet и специализированный протокол связи.

Описание программного обеспечения системы машинного зрения для отбраковки подгузников с дефектными липучками. В качестве языка программирования для реализации программной части разрабатываемой системы машинного зрения выбран язык программирования Python [2].

Для реализации алгоритмов машинного зрения использована библиотека OpenCV с открытым исходным кодом, которая предоставляет набор функций и алгоритмов для обработки изображений и видео [3].

Среди классических методов машинного зрения можно выделить следующие: обнаружение краев (edge detection), пороговая обработка изображений, каскад Хаара и другие [4].

Обнаружение краёв является наиболее важной и широко применяемой операцией обработки изображений, так как описание форм объектов по их краям и внутренним контурам значительно уменьшает объем данных, необходимых для хранения информации об объекте, тем самым значительно повышая эффективность алгоритмов обработки данных [5].

Для выделения краёв используют специальные фильтры, которые усиливают места резких изменений яркости на изображении. Эти изменения можно описать с помощью производных: если рассматривать изображение, как функцию интенсивности, то в областях с плавным изменением яркости производные малы, а в областях резких скачков (границ объектов) значения производных становятся большими.

Графический интерфейс пользователя (рисунок 2) создан с использованием инструментов для создания пользовательских интерфейсов QT Designer и библиотеки PyQT5 [6].

Описанная система была установлена на производственную линию, где успешно прошла производственные испытания в течение года эксплуатации и показала существенный экономический эффект, достигнутый за счёт уменьшения количества брака и увеличения производительности. За счёт исключения оператора из процесса контроля качества установки липучек удалось сократить одно рабочее место (в три смены), что привело к существенной экономии фонда оплаты труда и позволило окупить внедренную систему менее чем за два месяца эксплуатации[3].

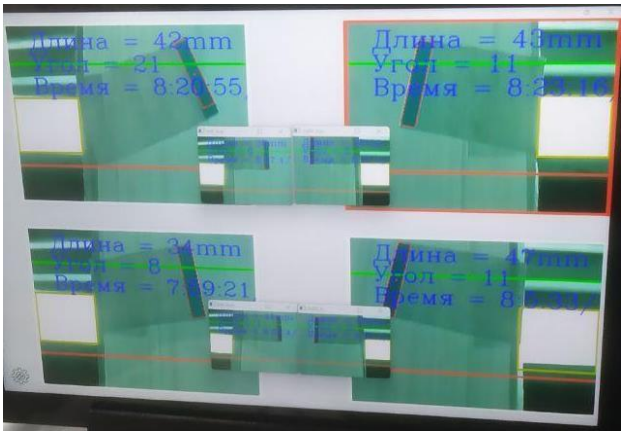


Рисунок 2 – Внешний вид графического интерфейса пользователя системы

Список литературы

1. Цветной CMOS-датчик изображения HD 1080p/720p с технологией OmniPixel. – Режим доступа: https://images.chipyun.com /pdf/C114923_15169630817691310805.pdf. – Дата доступа: 12.03.2026

2. Язык программирования Python. – Режим доступа :https://www.python.org. – Дата доступа: 12.03.2026.

3. Библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения с общим кодом. – Режим доступа: https://opencv.org. – Дата доступа: 12.03.2026.

4. A Practical Introduction to computer vision with OPENCV. – Режим доступа: https://opac.atmaluhur.ac.id/ uploaded_files/temporary/DigitalCollection/ZTlmZjkwZTAxYWFhZTE3N2RjNWU0ZGVlMTA4OWQ3NzA0MjM1ZjI4Ng=.pdf. – Дата доступа: 12.03.2026.

5. Кэвин П. Мэрфи. Компьютерное зрение. Современные методы и перспективы развития / Кэвин П. Мэрфи ; ред. Р. Дэвис, М. Терк ; пер. с англ. В. С. Яценкова. – М. : ДМК Пресс, 2022.

6. Клетте, Рейнхард. Компьютерное зрение. Теория и алгоритмы / Рейнхард Клетте ; пер. с англ. А. А. Слинкин. – М. : ДМКПресс, 2019. – 506 с.

7. PyQt – библиотека, которая позволяет использовать фреймворк QtGUI. – Режим доступа: https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt5. – Дата доступа: 12.03.2026.

Бочко Матвей Андреевич, магистрант 2 курса факультета математики и информатики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, matvey.bochko.2003@mail.ru.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, german@grsu.by.

[3]Описанная в настоящей статье система разработана в рамках выполнения дипломного проекта «Модернизация системы автоматизированного контроля качества выпускаемой продукции при помощи технологий машинного зрения на линии по изготовлению подгузников для взрослых» студентом специальности «Промышленные роботы и робототехнические комплексы (в машиностроении)» М. А. Бочко.

Работа удостоена диплома победителя конкурса «Лучшая дипломная и научно-исследовательская работа студентов в области контроля качества» Госстандарта Республики Беларусь в 2024 году.

УДК 004.932

М. А. БОЧКО

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫЯВЛЕНИЯ БРАКОВАННЫХ СИГАРЕТНЫХ БЛОКОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

Рассматриваются разработка и результаты внедрения программно-аппаратного комплекса автоматизированного выявления бракованных сигаретных блоков на основе технологий машинного зрения.

Целью настоящей работы является изучение и анализ существующей проблемы, разработка, тестирование и внедрение программно-аппаратного комплекса автоматизированного контроля качества сигаретных блоков на предприятии, способного обнаруживать дефекты упаковки пачек, такие как: вывернутый наружу этикеточный картон, отсутствие пачки в блоке, перевёрнутая пачка и другие, возникающие в процессе производства.

Анализ проблемы. После детального анализа участков контроля пачек в блоке были выделены некоторые участки, требующие введения дополнительного итогового контроля для повышения надёжности системы отбраковки в целом.

Контроль вывернутого наружу этикеточного картона. На линии по упаковке сигарет FOCKE №4 производится на машине F550 с помощью лазерного датчика в узле подачи этикеточного картона, принцип действия которого основан на распознавании матовой и глянцевой поверхности посредством определения интенсивности отражённого от картона лазерного излучения.

Стоит отметить, что в последнее время были случаи, когда несмотря на наличие глянцевой поверхности на картоне отсутствовали изображения, также имеют место быть случаи, когда картон покрыт глянцевой краской с обеих сторон, что значительно снижает вероятность правильной работы данного метода контроля.

Контроль наличия пачек в блоке. На линии по упаковке сигарет FOCKE №4 производится на машине F411 с помощью одного вакуумного датчика, контролирующего сразу 10 «присосок», по одной на каждую пачку, а также пяти оптических датчиков, определяющих целостность стопок в блоках.

Также стоит обратить внимание, что имеют место случаи, когда одна развернутая на 90º пачка одновременно перекрывает сразу две «присоски», таким же образом перекрываются оптические датчики, что приводит к пропуску неполного блока в готовую продукцию.

Контроль однообразного расположения пачек в блоке. Данный вид контроля не предусмотрен на линии по упаковке сигарет FOCKE №4, однако имеют место быть случаи, когда в процессе доукладки хороших пачек в «магазин», оператор ошибется и заряжает в «магазин» пачку обратной стороной, что приводит к неоднообразному расположению пачек в сигаретном блоке.

Описание конфигурации разрабатываемой системы на основе технологий машинного зрения.

Программно-аппаратный комплекс предназначен для обеспечения итогового контроля качества сигаретных блоков на производственной линии, в условиях повышенного содержания пыли, высокой вариативности используемого этикеточного картона и иных параметров, требующих обеспечения надежности системы, что в конечном счёте позволит исключить все вышеописанные проблемы существующей на линии системы контроля качества сигаретных пачек и блоков.

Разработанная система использует камеру высокого разрешения на базе популярного сенсора Omnivision OV2710 (США) [1] и алгоритмы обработки изображений для определения дефектов, таких как «перевёрнутый этикет», «перевёрнутая пачка», «отсутствие пачки в блоке» и другие.

Описание программного обеспечения системы машинного зрения для отбраковки сигаретных блоков с отклонениями качества. В качестве языка программирования для реализации программной части разрабатываемой системы машинного зрения выбран язык программирования Python [2].

Для реализации алгоритмов машинного зрения использована библиотека OpenCV с открытым исходным кодом, которая предоставляет набор функций и алгоритмов для обработки изображений и видео [3].

Принцип работы системы автоматизированного выявления отклонений качества сигаретных блоков основан на сравнении девяти пачек блока с одной «эталонной». Такой подход обеспечивает высокую устойчивость системы к вариациям производственного процесса, включая изменения дизайна упаковки, вариации освещенности на рабочем месте и мелкие технологические отклонения, без необходимости частой перенастройки оборудования.

При обнаружении вышеописанных дефектов программно-аппаратный комплекс формирует управляющий сигнал, который передаётся на программируемый логический контроллер (ПЛК) производственной линии. Получение такого сигнала инициирует сигнал на пневматический клапан, с помощью которого происходит выдув

сигаретного блока с подъёмника в короб брака, короб брака дополнительно оборудован датчиком на переполнение, в случае переполнения также происходит остановка линии, что предотвращает попадание брака на последующие этапы производственного цикла, включая упаковку блоков в коробки и их дальнейшую транспортировку. В случае трёх последовательных отбраковок также происходит остановка линии.

Применение данного подхода позволяет существенно повысить оперативность выявления брака и его отбраковки, сократить зависимость от человеческого фактора и минимизировать производственные потери.

Блок-схема разработанного программно-аппаратного комплекса для контроля сигаретных блоков представлена на рисунке 1.

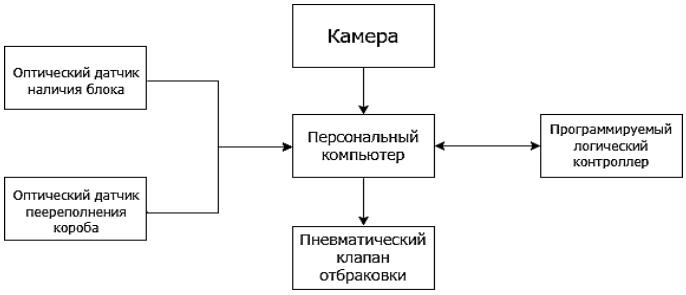


Рисунок 1 – Блок-схема программно-аппаратного комплекса для контроля качества сигаретных блоков

Для удобства настройки системы операторами линии и визуального отображения анализируемых изображений был сделан интерфейс оператора. Графический интерфейс пользователя (рисунок 2) создан с использованием инструментов для создания пользовательских интерфейсов QT Designer и библиотеки PyQT5 [4].

Вышеописанная система прошла внутренние проверки и введена в эксплуатацию в качестве рационализаторского предложения на предприятии, что обеспечивает дополнительный выходной контроль и сводит к нулю возможность попадания бракованной продукции потребителю.

Рисунок 2 – Внешний вид графического интерфейса оператора

Список литературы

1. Цветной CMOS-датчик изображения HD 1080p/720p с технологией OmniPixel. – Режим доступа: https://images.chipyun.com /pdf/C114923_15169630817691310805.pdf. – Дата доступа: 12.03.2026.

2. Язык программирования Python. – Режим доступа: https://www.python.org. – Дата доступа: 12.03.2026.

3. Библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения с общим кодом. – Режим доступа: https://opencv.org. – Дата доступа: 12.03.2026.

4. PyQt – библиотека, которая позволяет использовать фреймворк QtGUI. – Режим доступа: https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt5. – Дата доступа: 12.03.2026.

Бочко Матвей Андреевич, магистрант 2 курса факультета математики и информатики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, matvey.bochko.2003@mail.ru.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь german@grsu.by.

УДК 004.94

О. С. ГОЛОВАЧ

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДЕМПФИРОВАННОГО ОСЦИЛЛЯТОРА МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Разработан программный комплекс на языке Python для идентификации коэффициента демпфирования и жёсткости линейного осциллятора по зашумлённому сигналу. Описаны этапы обработки: генерация данных, извлечение признаков, обучение регрессионных моделей (Random Forest, Gradient Boosting, SVR, KNN) и визуализация результатов. Графический интерфейс позволяет загружать сигналы, выбирать модель и сравнивать алгоритмы. Эксперименты показывают точность ансамблевых методов выше 96 %.

Идентификация параметров демпфирования c и жесткости k по наблюдаемому сигналу – классическая обратная задача динамики, важная для вибродиагностики, механики и теории управления. Параметры демпфирования c и жесткости k для линейного демпфированного осциллятора обычно определяют с помощью логарифмического декремента, спектрального анализа или метода наименьших квадратов. Однако эти подходы чувствительны к шуму, требуют ручной обработки и дают смещенные оценки в особых режимах, например, при критическом демпфировании.

В последние годы методы машинного обучения (МО) демонстрируют высокую эффективность при решении обратных задач, позволяя автоматически восстанавливать параметры системы по форме колебательного сигнала даже в условиях сильного зашумления. В отличие от аналитических подходов, алгоритмы МО обучаются извлекать скрытые закономерности из формы сигнала даже при наличии значительных искажений. Цель данной работы – разработка программного комплекса с графическим интерфейсом для идентификации параметров демпфированного осциллятора по зашумлённому сигналу с использованием методов машинного обучения.

Рассматривается линейный демпфированный осциллятор, движение которого описывается однородным дифференциальным уравнением второго порядка [1]:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0$$

где $x(t)$ – отклонение от положения равновесия (м), m – масса (кг), c – коэффициент вязкого демпфирования (Н·с/м), k – коэффициент жёсткости пружины (Н/м), $\dot{x}(t) = v(t)$ – скорость (м/с), $\ddot{x}(t) = a(t)$ – ускорение (м/с²). Для удобства анализа и приведения к стандартному виду, уравнение делят на m и вводят два ключевых параметра:

$$\ddot{x} + 2\varsigma\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = 0$$

где $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – собственная частота, $\varsigma = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$ – безразмерный коэффициент демпфирования.

В зависимости от значения величины ζ система может находиться в одном из трёх режимов: слабое демпфирование (ζ < 1), критическое демпфирование (ζ = 1) и сильное демпфирование (ζ > 1). Таким образом, форма временной реализации сигнала $x(t)$ определяется параметрами демпфирования c и жёсткости k. Задача их восстановления по наблюдаемому сигналу представляет собой обратную задачу динамики.

Разработанный программный комплекс на языке Python реализует весь процесс обработки колебательных сигналов и идентификации параметров осциллятора по зашумлённому сигналу. Работа программы включает несколько этапов: подготовка данных, обучение моделей, загрузка пользовательского сигнала, его обработка и визуализация результата.

Для обучения моделей необходимо располагать набором примеров, каждый из которых представляет собой временной сигнал и соответствующие ему истинные значения параметров c и k. С этой целью используется синтетический датасет, генерируемый на основе аналитического решения. Генератор создаёт $N = 1000$ реализаций при случайном выборе параметров c и k в диапазонах [0.2; 2.0] и [5.0; 40.0], что охватывает все три режима демпфирования. К каждому чистому сигналу добавляется гауссов шум с уровнем 3 % от амплитуды, имитирующий реальные условия измерений. Полученные сигналы и параметры сохраняются в файл (поддерживаются форматы .csv, .xlsx) и в дальнейшем используются для обучения регрессионных моделей [2].

Ключевым этапом решения обратной задачи является выбор информативных признаков, которые позволяют по временной реализации колебательного сигнала $x(t)$ восстановить параметры демпфирования c и жёсткости k. Непосредственная подача временного ряда в модель машинного обучения неэффективна из-за высокой размерности и наличия шума. Поэтому каждый сигнал преобразуется в компактный вектор информативных признаков, отражающих физические характеристики колебательного процесса. Для повышения устойчивости к

шуму перед анализом применяется сглаживание Савицкого – Голея. Программа вычисляет 14 признаков, объединённых в четыре группы:

1) Статистические и амплитудные признаки: среднеквадратичное значение (RMS), стандартное отклонение, максимальная амплитуда, значения сигнала в начальный, промежуточный и конечный моменты времени.

2) Признаки затухания: начальный наклон сигнала и наклон логарифмической огибающей.

3) Спектральный признак: доминирующая частота (FFT).

4) Признаки пересечения нуля: средний период между пересечениями нуля, стандартное отклонение периода, частота, оценённая по пересечениям нуля, начальная фаза и общее количество пересечений.

Полученные векторы признаков использовались для обучения моделей регрессии, задачей которых являлось восстановление параметров системы c и k. Для объективной оценки, обобщающей способности моделей и предотвращения оптимистичной оценки качества, исходная выборка была случайным образом разделена на две непересекающиеся части: обучающая выборка (80 %) и тестовая выборка (20 %).

Ввиду того, что извлеченные признаки имеют разный физический смысл и, соответственно, разные порядки величин, была проведена стандартизация данных с использованием метода StandardScaler. Аналогичная процедура стандартизации была применена к целевым переменным c и k. Модели обучались предсказывать стандартизованные значения параметров, а для оценки качества и вычисления итоговых метрик полученные предсказания затем были преобразованы обратно в исходные физические единицы с помощью обратного преобразования. Поскольку задача представляет собой многомерную регрессию, для алгоритмов, не поддерживающих ее нативно (SVR, KNN, Gradient Boosting), использовалась обертка MultiOutputRegressor, позволяющая обучать отдельный регрессор для каждого целевого параметра [2].

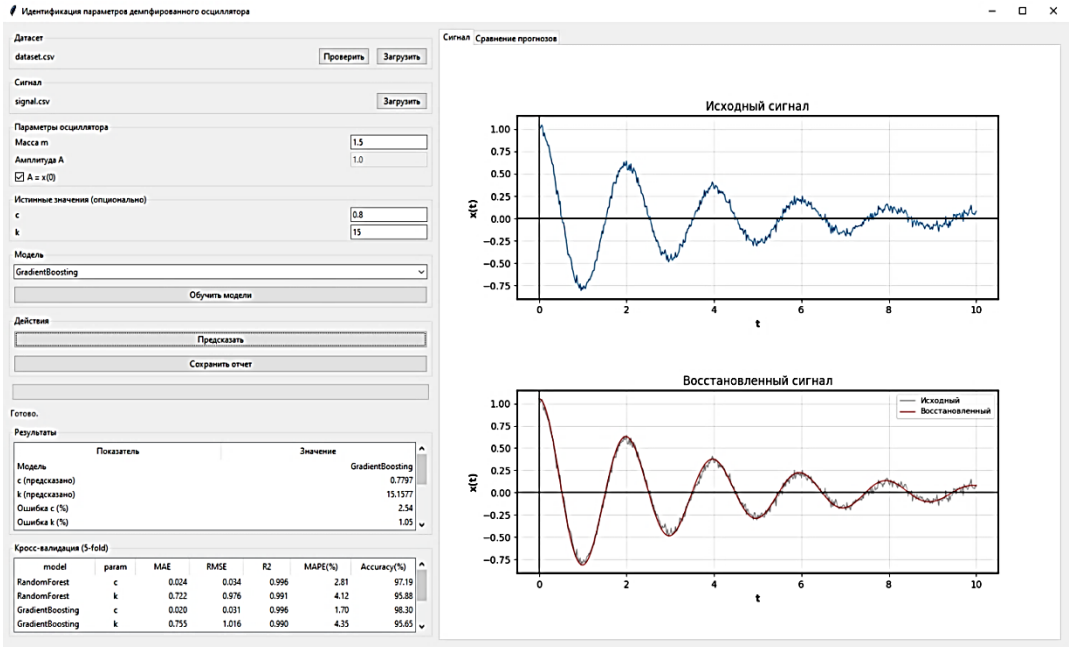


Рисунок 1 – Графический интерфейс

Для решения задачи регрессии были выбраны четыре алгоритма, представляющие различные подходы к обучению: случайный лес (Random Forest), метод опорных векторов (SVR), метод k-ближайших соседей (KNN), градиентный бустинг (Gradient Boosting) [3]. После обучения качество оценивается на тестовой выборке по метрикам: средняя абсолютная ошибка (MAE), корень из среднеквадратичной ошибки (RMSE), коэффициент детерминации (R^2), средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) и точность (Accuracy). Метод градиентного бустинга (Gradient Boosting) продемонстрировал наивысшую точность в восстановлении коэффициента демпфирования c. Модель достигла коэффициента детерминации $R^2 = 0.996$ при рекордно низкой средней процентной ошибке (MAPE) в 1.70 %, что соответствует точности 98.30 %. Для оценки жесткости пружины k наиболее эффективным оказался Случайный лес (Random Forest). Он достиг наименьшей средней абсолютной ошибки (MAE = 0.722) при точности 95.88 %, незначительно превзойдя результат Градиентного бустинга (95.65 %). Алгоритм метода опорных векторов (SVR), в свою очередь, показал сбалансированную, но умеренную производительность для обоих целевых параметров: достигнута точность 96.84 % для демпфирования c и 94.41 % для жесткости k. Наименее эффективным оказался алгоритм KNN, показавший точность 90.91 % для параметра c и 89.95 % для параметра k.

Для определения параметров произвольного сигнала пользователь загружает файл с данными (форматы .csv, .xlsx), содержащий два столбца: время t и смещение x. При необходимости можно задать вручную истинные значения c и k для последующей оценки точности. После нажатия кнопки «Предсказать» выполняются следующие шаги: извлечение признаков из загруженного сигнала с помощью функции extract_features; стандартизация полученного вектора признаков с использованием сохранённого scaler_X [4]; предсказание выбранной моделью – получаются нормализованные значения c и k; обратное преобразование масштабированных предсказаний в физические единицы с помощью scaler_y.inverse_transform; генерация восстановленного сигнала, используя предсказанные c и k, программа строит аналитическое решение $x(t)$ (функция simulate_damped_oscillator). Начальная амплитуда A берётся равной первому отсчёту загруженного сигнала (либо задаётся пользователем). Результат отображается в интерфейсе: численные значения c и k, а также график, на котором показаны исходный зашумлённый сигнал и восстановленный. Если были введены истинные параметры, дополнительно выводятся относительные ошибки и точность в процентах.

Графический интерфейс реализован с использованием библиотеки Tkinter и организован в виде главного окна (рис. 1), условно разделённого на две части.

Левая панель: здесь расположены блоки для загрузки датасета и сигнала, настройки параметров осциллятора (масса, флажок начальной амплитуды), ввода истинных значений c и k (опционально), выбора модели (Все / RandomForest / GradientBoosting / SVR / KNN), а также кнопки управления обучением и предсказанием. В нижней части панели находятся прогресс-бар и строка состояния, а также текстовое поле для вывода результатов предсказания и метрик.

Правая панель: содержит вкладки «Сигнал» и «Сравнение моделей». Вкладка «Сигнал» содержит два графика: исходный сигнал и совмещённое отображение исходного и восстановленного сигналов. Это позволяет визуально оценить качество восстановления. Вкладка «Сравнение моделей» отображает графики зависимости предсказанных значений от истинных (True vs Predicted) для параметров c и k по тестовой выборке для выбранной модели. Рядом выводится сводка метрик для всех четырёх алгоритмов, что даёт возможность сравнить их эффективность.

В ходе работы разработан программный комплекс на языке Python, предназначенный для идентификации параметров демпфированного осциллятора (коэффициента демпфирования c и жёсткости k) по зашумлённому сигналу смещения. Программа позволяет загружать как готовые датасеты для обучения, так и одиночные сигналы в распространённых текстовых форматах, выбирать модель (или полагаться на автоматический выбор лучшей), визуализировать исходный и восстановленный сигналы, а также сравнивать качество различных алгоритмов на тестовой выборке. Реализована многопоточность, благодаря чему длительные операции не блокируют интерфейс.

Эксперименты на синтетических данных, сгенерированных с уровнем шума 3 %, показали, что ансамблевые методы (Gradient Boosting и Random Forest) обеспечивают наилучшую точность. В качестве примера на тестовом сигнале с истинными значениями $c = 0.8$, $k = 15.0$ предсказания градиентного бустинга дали ошибку 2.54 % и 1.05 % соответственно, что подтверждает пригодность подхода для практического использования.

По сравнению с классическими методами идентификации (логарифмический декремент, спектральный анализ) разработанная программа не требует ручной сегментации сигнала, подбора аппроксимирующих функций и устойчиво работает при высоком уровне шума. Это делает его полезным инструментом для задач вибродиагностики, мониторинга механических конструкций, а также в учебных целях.

Дальнейшее развитие комплекса может включать поддержку нелинейных моделей колебаний, интеграцию с нейросетевыми архитектурами (например, Physics-Informed Neural Networks) и адаптацию к реальным экспериментальным данным.

Список литературы

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: механика : учеб. пособие / Д. В. Сивухин. – 2-е изд. – М. : Наука, 1979. – 519 с.

2. Мюллер, А. Введение в машинное обучение с помощью Python. Руководство для специалистов по работе с данными / А. Мюллер, С. Гвидо. – СПб. : ООО «Альфа книга», 2017. – 480 с.

3. Бурков, А. Машинное обучение без лишних слов / А. Бурков. – СПб. : Питер, 2020. – 192 с.

4. Рашка, С. Python и машинное обучение / С. Рашка ; пер. с англ. А. В. Логунова. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 418 с.

A software package has been developed in Python to identify the damping coefficient and stiffness of a linear oscillator from a noisy signal. The processing stages include data generation, feature extraction, training of regression models (Random Forest, Gradient Boosting, SVR, KNN), and visualization of results. The graphical interface allows loading signals, selecting a model, and comparing algorithms. Experiments show that the accuracy of ensemble methods exceeds 96 %.

Головач Олег Сергеевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, crazidan98@mail.ru.

Научный руководитель – *Ситкевич Анастасия Леонидовна*, магистр физико-математических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, girl-physicist@mail.ru.

УДК 530.182.1

Д. А. ГРОМАК, И. Д. АГЕЕНКОВ, В. Д. ГУЛЯЙ

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН НА ВОДЕ

Рассматривается уравнение Иоганна Кортевега и Густава де Фриза. Также рассматривается определение солитона, его свойства и вид. Особое внимание уделено численному решению уравнения Кортвега де Фриза: представлены две трехслойные конечно-разностные схемы с разными порядками аппроксимации и условиями устойчивости. На основе предложенных алгоритмов разработана компьютерная модель на языке C# с использованием графической библиотеки ImGui.NET, позволяющая визуализировать профиль солитона. Описан листинг программы с реализацией периодических граничных условий.

Стоит уточнить, что такое солитон. Солитон – это устойчивая уединенная волна, распространяющаяся в нелинейной среде, которая ведет себя подобно частице: сохраняет свою форму и структуру, не затухая, при движении и взаимодействии. Солитоны могут встречаться в гидродинамике, волоконной оптике, плазме, биологии, физике высоких энергий, квантовой механике [1].

Свойства солитона включают частицеподобное поведение (солитоны взаимодействуют друг с другом, не разрушаясь, а продолжая движение, часто с сохранением своей структуры), устойчивость к возмущениям (даже если начальный импульс не соответствует точному решению, он автоматически находит форму солитона, теряя излишки энергии в виде слабого фона), баланс нелинейности и дисперсии (нелинейность среды, стремящаяся укрутить фронт волны, компенсируется дисперсионным расплыванием, что позволяет сохранять форму на большие расстояния), локализованность (солитон представляет собой уединенный импульс, энергия которого сконцентрирована в ограниченной области пространства), способность к переносу энергии (солитоны способны переносить энергию, заряд или сигналы, например, в волоконной оптике или нелинейных цепях) и упругое взаимодействие (при столкновении солитоны могут проходить друг сквозь друга, меняя только фазу или амплитуду, но не структуру). На рисунке 1 представлен внешний вид солитонов:

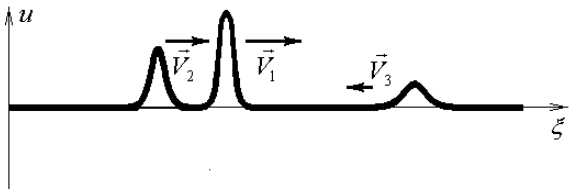


Рисунок 1 – Внешний вид солитона

Распространение волн в среде описывается следующим нелинейным уравнением [1]:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + c_0\left(\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{3}{2d}y\frac{dy}{dx} + \frac{d^2}{6}\frac{\partial^3 y}{\partial x^3}\right) = 0, \quad (1)$$

где x – расстояние по горизонтали от начала координат;

t – время;

y – смещение поверхности жидкости от равновесного уровня;

d – глубина жидкости;

$C_0 = gd$ – скорость волн с малой амплитудой.

Уравнение в частных производных (1) называется уравнением Кортевега де Вриза. Это уравнение имеет множество решений. И чтоб выбрать одно из них, нужно знать, какой была функция в начальный момент, т. е. $y(x, 0)$. Эту функцию называют начальными условиями.

Уравнение (1) заменой переменных можно привести к виду:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + \beta\frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = 0. \quad (1)$$

Это уравнение с начальными условиями

$$u(x,t)|_{t=0} = u(x)$$

описывает распространение волны в среде. Это уравнение используется для описания множества процессов, в которых приходится одновременно учитывать простейшие нелинейные и дисперсионные эффекты. В качестве примеров можно назвать:

1) магнито-звуковые волны в плазме;

2) волны в ангармонической решетке;

3) продольные колебания в упругих стержнях;
4) термовозбуждение фонноных пакетов в нелинейных кристаллах при низкой температуре.

Вид уеденённой волны можно выбрать в виде следующей функции

$$u(x) = u_0 ch^{-2}(x / \Delta), \tag{2}$$

где $ch(z) = \frac{e^z + e^{-z}}{2}$ – гиперболический косинус, $\Delta = (12/u_0)^{1/2}$.

Вид уединённой волны можно выбрать также в виде:

$$u = \pi - 4arctg(e^{-x}).$$

Ниже приведёны два алгоритм для решения ауравнения Кортевега де Фриза:

1) Трёхслойная явная схема с порядком аппроксимации $O(t^2, h^2)$

$$U_j^{i+1} = U_j^{i-1} - \frac{\tau}{h} U_j^i \left(U_{j+1}^i - U_{j-1}^i\right) \beta \frac{\tau}{h^3} \left(U_{j+2}^i - 2U_{j+1}^i + 2U_{j-1}^i - U_{j-2}^i\right).$$

Эта схема устойчива при достаточно малых шагах h

$$\tau \leq 0.384 \frac{h^3}{\beta}.$$

При $\beta = 4.10^{-4}$, $h = 0.01$ и $\tau < 0.0019$ счет по этому алгоритму устойчив.

2) Трёхслойная явная схема с порядком аппроксимации $O(t^2, h^4)$

$$U_j^{i+1} = U_j^{i-1} + \frac{\tau}{6h} U_j^i \left(U_{j+2}^i - 8U_{j+1}^i + 8U_{j-1}^i - U_{j-2}^i\right) + \beta \frac{\tau}{4h^3} \left(U_{j+3}^i - 8U_{j+2}^i + 13U_{j+1}^i - 13U_{j-1}^i + 8U_{j-2}^i - U_{j-3}^i\right).$$

Эта схема устойчива при достаточно малых шагах h

$$\tau \leq 0.216 \frac{h^3}{\beta}.$$

Следуя описанному алгоритму разработана модель, описывающая солитон (рисунок 2). Ниже представлен листинг программного кода, отвечающего за расчет волны солитона. Здесь учтены периодические граничные условия и сдвиг временных слоев.

Листинг 1:

```
public static void GraphWave(Params param1)
    {
      int numSteps = 90;
      int N = 200;
      float h = param1.h;
      float tau = param1.tau;
      float beta = param1.beta;
      float[] U = param1.U;
      float[] U_prev = param1.U_prev;
      float[] U_next = new float[N];
      for (int step = 0; step < numSteps; step++)
      {
        float coeff1 = (float)(tau * 0.0001 / h);
        float coeff2 = (float)(beta * 0.0001 * tau * 0.0001 / (h * h * h));
        for (int j = 2; j < N - 2; j++)
        {
          float term1 = U[j] * (U[j + 1] - U[j - 1]);
          float term2 = U[j + 2] - 2 * U[j + 1] + 2 * U[j - 1] - U[j - 2];
          U_next[j] = U_prev[j] - coeff1 * term1 - coeff2 * term2;
        }
        U_next[0] = U_next[N - 4];
        U_next[1] = U_next[N - 3];
```

```
            U_next[N - 2] = U_next[2];
            U_next[N - 1] = U_next[3];
            Array.Copy(U, U_prev, N);
            Array.Copy(U_next, U, N);
        }
        param1.U = U;
        param1.N = N;
    }
```

Программа написана с ипользованием платформы .Net, язык C#. Для облегчения процесса построения графической части использована библиотека ImGui.NET. Выбор пал именно на эту библиотеку, так как она является облегченной альтернативой распространенным UI-фреймворкам. Кроме того, указанная библиотека позволяет достаточно быстро работать в режиме немедленного выполнения. ImGui.NET позволяет сделать полноценные приложения, которые весят всего несколько МБ, и, поскольку ImGui не зависит от рендеринга, они могут быть по-настоящему кроссплатформенными.

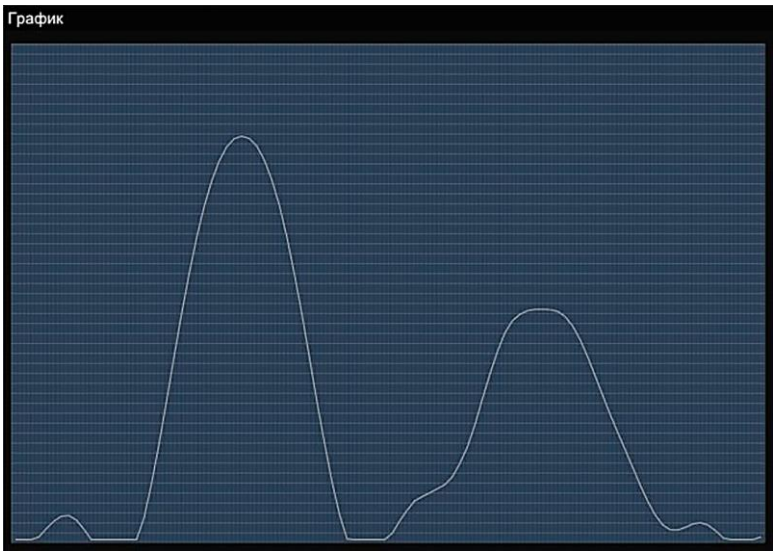


Рисунок 2 – Окно вывода графика

В ходе выполнения работы было проведено комплексное исследование солитонов как особого класса волн, сочетающих свойства классических волн и частиц. Рассмотрены их фундаментальные характеристики, позволяющие сохранять устойчивость при распространении и взаимодействии благодаря точному балансу нелинейных и дисперсионных эффектов. Ключевым результатом работы является численная реализация решения уравнения Кортевега-де Вриза, которое служит базовой математической моделью для описания уединенных волн в различных физических контекстах.

Разработанное программное обеспечение на платформе .NET с применением легковесной библиотеки ImGui.NET подтвердило работоспособность предложенного алгоритма. Использование двух трехслойных явных схем с различными порядками аппроксимации позволило оценить влияние шагов дискретизации на устойчивость вычислений. Периодические граничные условия, реализованные в коде, обеспечивают корректное поведение модели на границах расчетной области.

Таким образом, представленная компьютерная модель может служить основой для дальнейших исследований: изучения взаимодействия нескольких солитонов, анализа влияния параметров среды на характер распространения волн, а также адаптации алгоритма для решения прикладных задач в гидродинамике, акустике и других областях физики нелинейных явлений. Подход, использованный в работе, демонстрирует эффективность комбинации теоретического анализа и численного эксперимента при изучении сложных волновых процессов.

Список литературы

1. Маликов, Р. Ф. Практикум по компьютерному моделированию физических явлений и объектов : учеб. пособие / Р. Ф. Маликов. – Уфа : Изд-во БашГПУ, 2005. – 291 с.

2. Никитин, А. В. Компьютерное моделирование физических процессов / А. В. Никитин, А. И. Слободянюк, М. Л. Шишаков. – М. : Бином, 2013. – 679 с.

The paper examines the equation of Johannes Korteweg and Gustav de Vries. It also discusses the definition of a soliton, its properties, and its form. Special attention is paid to the numerical solution of the Korteweg-de Vries equation: two three-layer finite-difference schemes with different orders of approximation and stability conditions are presented. Based on the proposed algorithms, a computer model has been developed in C# using the ImGui.NET graphics library, which allows visualizing the soliton profile. The program listing with the implementation of periodic boundary conditions is described.

Громак Дмитрий Андреевич, студент 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, gromak_da_25@student.grsu.by.

Агеенков Иван Денисович, студент 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, ageenkov_id_25@student.grsu.by.

Гуляй Виталий Дмитриевич, студент 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, gulyj_vd_25@student.grsu.by.

Научный руководитель – *Ситкевич Анастасия Леонидовна,* магистр физико-математических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, girl-physicist@mail.ru.

УДК 543.275.1:53.088

А. В. ГРУШЕВСКАЯ, В. Д. КАРПИЦКИЙ

ЭТАЛОНЫ ВЛАЖНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Разработаны подходы к оцениванию неопределенности эталонов влажности сыпучих материалов при их метрологической оценке для совершенствования системы обеспечения единства измерений.

Влажность сыпучих материалов – важнейший параметр, влияющий на их характеристики, транспортировку, хранение и использование в различных производствах. Контроль влажности позволяет избежать потерь качества, предотвратить склеивание и образование комков, а также обеспечивать технологические процессы. Эта характеристика критически важна в самых разных отраслях – от производства строительных материалов и пищевой промышленности до сельского хозяйства и энергетики. Неверно определённая влажность может привести к браку продукции, нарушению технологических процессов, финансовым потерям и даже к проблемам с безопасностью, например, при хранении зерна или угля.

Измерения влажности различных материалов и средств во многих отраслях народного хозяйства и целом ряде областей научных исследований заняли важное место в современной аналитической измерительной технике [1–4]. Информация о влажности используется в многочисленных автоматических системах.

При этом необходимо повышать правильность результатов точность и правильность результатаов измерений влажности материалов. Этой цели может служить применение эталонов – стандартных образцов влажности сыпучих материалов Это весьма актуально для совершенствования системы обеспечения единства измерений.

В настоящей работе разработаны подходы к оцениванию неопределенности эталонов влажности сыпучих материалов при их метрологической оценке для совершенствования системы обеспечения единства измерений

Методы и средства измерения влажности сыпучих материалов можно разделить на прямые и косвенные. Прямые (абсолютные) методы основаны на физическом удалении влаги и считаются наиболее достоверными. Термо-гравиметрический метод (сушка в сушильном шкафу). Классический лабораторный способ. Проба взвешивается, сушится при температуре 105–110 °C до постоянной массы и взвешивается снова. Разница – масса испарившейся воды. Недостаток – длительность (несколько часов). Экспресс-методы на основе интенсивного нагрева. Используются инфракрасные или галогенные сушильные анализаторы. Они быстро (за 5–20 минут) высушивают пробу концентрированным нагревом, непрерывно фиксируя потерю массы. Это ускоренная, но иногда менее точная альтернатива сушильному шкафу. Область применения и ограничения. Все прямые методы являются разрушающими, требуют отбора пробы и лабораторных условий. Они служат прежде всего для периодического контроля, арбитражных проверок и, что важно, для аттестации эталонных образцов.

Косвенные (оперативные) методы. Позволяют оценивать влажность быстро, часто без разрушения пробы и непосредственно в производственном процессе. Кондуктометрический (резистивный) метод. Измеряет электрическое сопротивление между щупами, погруженными в материал. Влажность вычисляется, так как электропроводность растёт с увеличением содержания воды. Метод сильно зависит от плотности набивки материала, температуры и химического состава (наличия солей). Диэлькометрический (ёмкостный) метод. Наиболее распространён в промышленности. Измеряет диэлектрическую проницаемость материала между обкладками конденсатора. Поскольку у воды этот параметр в десятки раз выше, чем у сухого вещества, прибор фиксирует изменение ёмкости и пересчитывает его в проценты влажности. Бесконтактные (микроволновые и радиочастотные) методы. Продвинутая версия диэлькометрического метода. Датчик излучает СВЧ- или РЧ-волны, которые проникают в слой материала. Степень их поглощения и изменение фазы сигнала напрямую коррелируют с влажностью. Это позволяет измерять параметр в потоке на конвейере или в закрытом трубопроводе.

Определение относительной погрешности влагомеров проводят с применением стандартных образцов (ГСО) [5-9] или измерительных эталонных установок 1-го разряда массовой доли влаги в твердых веществах и материалах (далее – эталонные установки) в соответствии с поверочной схемой по ГОСТ Р.8.630. В соответствии с типом и назначением влагомера выбирают стандартные образцы для каждой разновидности зерновых культур или продуктов их переработки с аттестованными значениями массовой доли влаги, соответствующими началу, середине и концу диапазона измерений влагомера. Проводят не менее пяти измерений (число измерений $n \geq 5$) влажности каждого выбранного ГСО с помощью поверяемого влагомера согласно его руководству по эксплуатации. Проводят обработку результатов измерений.

В обработке результатов измерений при определении погрешности лабораторных влагомеров находят среднее арифметическое значение $\bar{W}$ и среднее квадратическое отклонение S результатов измерений влажности каждой пробы сыпучих материалов или продуктов их переработки или ГСО вычисляют по формулам:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_i}{n} \; W = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_i}{n}, \tag{1}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (W_i - \overline{W})^2}{n(n-1)}}, \tag{2}$$

где W_i – результат i-го измерения влажности каждой пробы или ГСО с помощью влагомера, % ; n – число измерений ($n \geq 5$).

За результат измерений принимают среднее арифметическое значение $\bar{W}$ результатов измерений влажности каждой пробы сыпучих материалов, продуктов их переработки или ГСО, которое вычисляют по формуле (1). Абсолютную погрешность влагомера в поверяемой точке определяют по формуле

$$\Delta = W - W_a, \tag{3}$$

где W_a – значение массовой доли влаги, приведенное в паспорте на ГСО или полученное с применением эталонной установки, %.

В настоящей работе в соответствии с действующими международными подходами разработан отчет о неопределенности измеряемой величины, следующих разделов.

1. Измерительная задача: дать краткое описание того, как определяется измеряемая величина *Y*.

2. Модель измерения: Выразить математически зависимость между выходной величиной У и входными величинами *Xi* от которых она зависит: $Y = f(X_1, X_2, \ldots, X_N)$.

3. Анализ входных величин.

4. Результаты наблюдений: список результатов наблюдений, непосредственно считанных с прибора и определение их статистических характеристик:

• среднее арифметическое значение,

• среднее квадратическое отклонение (стандартное отклонение),

• стандартная неопределенность.

5. Корреляции: проанализировать входные величины на предмет их корреляции и рассчитать коэффициенты корреляции для всех коррелированных входных величин с указанием методов их расчета.

6. Коэффициенты чувствительности: получить коэффициенты чувствительности для каждой входной величины или на основании расчета частных производных $\partial f/\partial x_i$ или экспериментально с указанием метода получения.

7. Бюджет неопределенности.

8. Расширенная неопределенность: определить коэффициент охвата на основе выбранного уровня доверия и рассчитать расширенную неопределенность.

9. Полный результат измерений: представить полный результат измерений, состоящий из оценки y измеряемой величины Y и расширенной неопределенности U в форме $Y = y \pm Uc$ указанием единиц измерений для Y и y.

Список литературы

1. Берлинер, М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.

2. Петров, А. Н. Контроль влажности материалов / А. Н. Петров. – СПб. : Химиздат, 2015. – 200 с.

3. Иванов, А. В. Методы измерения влажности материалов / А. В. Иванов. – М. : Наука, 2010. – 256 с.

4. Григорьев, Л. М. Контроль влажности строительных материалов / Л. М. Григорьев. – Киев : Будівельник, 2020. – 134 с.

5. ГОСТ 8.532-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Стандартные образцы состава веществ и материалов. Основные положения.

6. ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений.

7. РМГ 93-2016. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Стандартные образцы. Порядок разработки, аттестации, утверждения, регистрации и применения.

8. Докучаев, В. И. Методы и приборы для измерения влажности сыпучих материалов: принципы и практика / В. И. Докучаев. – М. : Издательство стандартов. – 2020.

9. Методические указания по аттестации стандартных образцов. – М. : ВНИИМС, 2018.

Approaches to assessing the uncertainty of bulk material moisture standards during their metrological assessment have been developed to improve the system for ensuring the uniformity of measurements.

Грушевская Анастасия Викторовна, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

Карпицкий Вадим Данилович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Василюк Геннадий Тимофеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, vasilyuk@grsu.by.

УДК 535.015

В. А. ДОСТА

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАВЕДЁННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В НАНОКОМПОЗИТЕ С КРАСИТЕЛЕМ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Выполнено численное моделирование наведенного поглощения в нанопористом стекле с полимером и красителем фталоцианином цинка при различных длительностях воздействующего излучения высокой интенсивности методом скоростных уравнений. Показано, что величина максимума коэффициента поглощения достигается сразу после окончания действия импульсов возбуждения. Увеличение длительности возбуждающих импульсов от 50 пс до 1,5 нс приводит к сильному уменьшению максимума коэффициента поглощения, в то время как дальнейший рост длительности возбуждения с 2 нс до 10 нс и более способствует незначительному уменьшению максимума коэффициента поглощения.

Нанопористое стекло с полимером и красителем (НПСП) является одним из перспективных материалов, оптические свойства которого могут модулироваться излучением короткой длительности. Изменение оптических свойств НПСП под действием излучения связано с процессом наведенного поглощения [1–3]. Так как на практике используются импульсы излучения как наносекундной, так и пикосекундной длительности, имеет смысл исследовать изменение наведенного поглощения в зависимости от длительности.

Исследовать процесс наведенного поглощения при различной длительности импульсов воздействующего излучения возможно исходя из упрощённой схемы энергетических уровней красителя [2; 4].

Система кинетических уровней молекул красителя позволяет описать процесс наведенного поглощения излучения в каналах синглетных и триплетных уровней энергии, учесть спонтанные, безызлучательные и интеркомбинационные переходы.

$$\frac{d}{dt}n_{S0}(t) = -P(t)\cdot\sigma_{S0}\cdot n_{S0}(t) + k_{S0}\cdot(1-n_{S0}(t)-n_{S2}(t)-n_{T1}(t)-n_{T2}(t)) + k_{TS}\cdot n_{T1}(t) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}n_{S2}(t) = P(t)\cdot\sigma_{S}\cdot(1-n_{S0}(t)-n_{S2}(t)-n_{T1}(t)-n_{T2}(t)) - k_{S}\cdot n_{S2}(t) \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}n_{T1}(t) = -P(t)\cdot\sigma_{T}\cdot n_{T1}(t) - k_{TS}\cdot n_{T1}(t) + k_{T}\cdot n_{T2}(t) + k_{ST}\cdot(1-n_{S0}(t)-n_{S2}(t)-n_{T1}(t)-n_{T2}(t)) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}n_{T2}(t) = P(t)\cdot\sigma_{T}\cdot n_{T1}(t) - k_{T}\cdot n_{T2}(t) \quad (4)$$

$$N = n_{S0} + n_{S1} + n_{S2} + n_{T1} + n_{T2}\ , \quad (5)$$

где $P(t)$ – плотность фотонов пучка накачки, N – концентрация частиц в образце, n_{Si} – населённость соответствующих возбужденных синглетных состояниях, n_{Ti} – населённость соответствующих возбужденных триплетных состояниях, σ_i – сечение перехода. Коэффициенты k_{ij} отвечают за безызлучательную релаксацию состояния i на переходе $i – j$.

При моделировании воздействия мощного излучения на образец с красителем использовались параметры красителя фталоцианин цинка: $N = 4{,}22\cdot10^{17}$ см$^{-3}$, $\sigma_{S0} = 5{,}165\cdot10^{-18}$ см^2, $\sigma_S = 1{,}55\cdot10^{-17}$ см^2, $k_{S0} = 10$ нс$^{-1}$, $k_S = 10^3$ нс$^{-1}$, $k_{ST} = 2$ нс$^{-1}$,. $k_{S1} = 10^3$ нс$^{-1}$, $k_T = 10^3$ нс$^{-1}$, $\sigma_T = \sigma_S$, $k_{TS} = 0.01\ k_{ST}$ [4; 5].

В результате выполненного численного моделирования были найдены зависимости населённостей синглетных и триплетных энергетических состояний от времени. Получив значения населённостей при соответствующей интенсивности возбуждающего излучения был определен коэффициент поглощения

$$\alpha(t) = (\sigma_{S0} \cdot n_{S0}(t) + \sigma_S \cdot n_{S1}(t) + \sigma_T \cdot n_{T1}(t)) \cdot N. \quad (6)$$

Исходя из полученных данных было вычислено изменение коэффициента поглощения излучения при различных длительностях излучения: от 50 пс до 12 нс, рисунок 1.

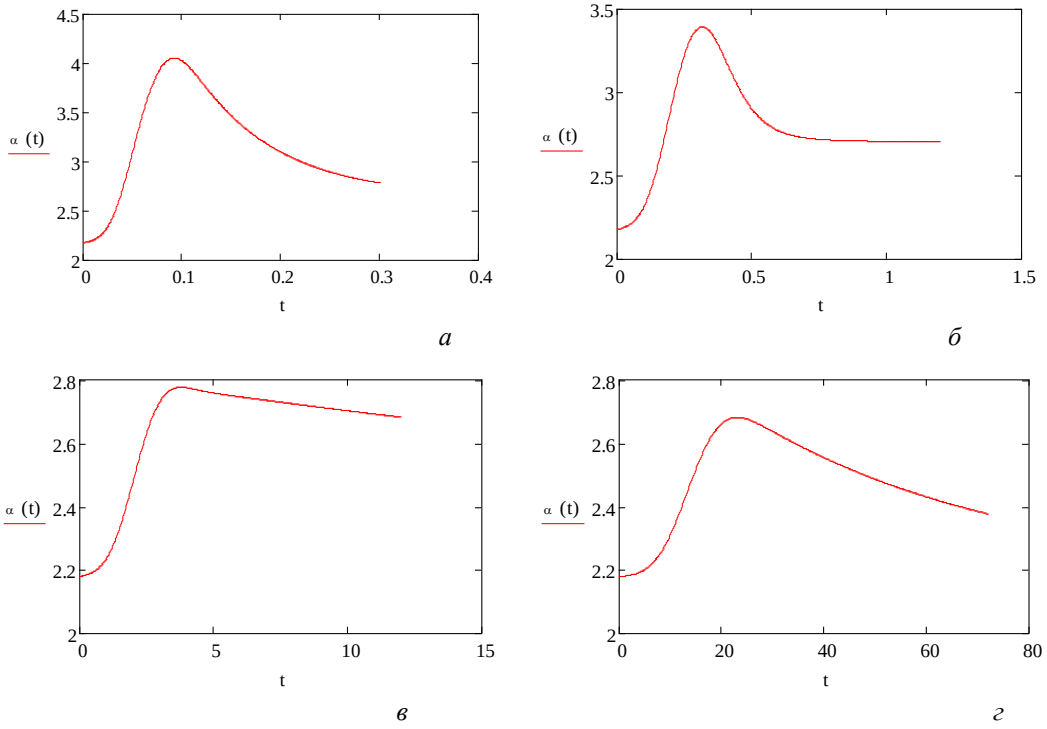


Рисунок 1 – Зависимости коэффициента поглощения от времени (нс) при различных длительностях импульсов возбуждения; а) τ_{nak} = 0.05 нс, б) τ_{nak} = 0.2 нс, в) τ_{nak} = 2 нс, г) τ_{nak} = 12 нс

Энергия возбуждающих импульсов при этом поддерживалась постоянной. Коэффициент поглощения значительно изменяется с течением времени. Пока действует возбуждающее излучение он значительно увеличивается, до максимального значения, а далее релаксирует до некоторого значения, оставаясь на уровне выше исходного. Указанная особенность характерна для коэффициент поглощения вне зависимости от длительности возбуждения.

Максимум коэффициента поглощения с увеличением длительности импульсов воздействующего излучения уменьшается в диапазоне длительностей от 50 пс до 1 нс достаточно резко, а начиная с 2 нс и далее – достаточно слабо (рисунок 2).

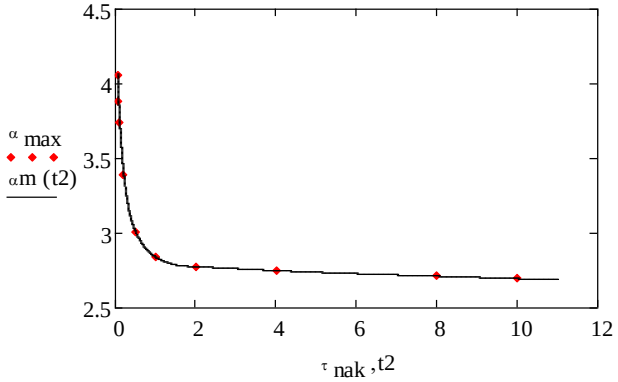


Рисунок 2 – Зависимость максимума коэффициента поглощения от длительности импульсов возбуждения (нс); а) τ_{nak} = 0.05 нс, б) τ_{nak} = 0.075 нс, в) τ_{nak} = 0.1 нс, г) τ_{nak} = 0.2 нс

Таким образом, приведённые зависимости позволяют сделать вывод, что величина максимума коэффициента поглощения, до которого увеличивается $\alpha(t)$, достигается сразу после окончания действия импульсов возбуждения. Увеличение длительности возбуждающих импульсов от 50 пс до 1,5 нс приводит к сильному уменьшению максимума коэффициента поглощения, в то время как увеличение длительности импульсов возбуждения с 2 нс до 10 нс и более способствует незначительному уменьшению максимума $\alpha(t)$.

Список литературы

1. Нелинейное поглощение лазерного излучения фталоцианинами цинка и свинца и порфирином цинка, находящимися в композитной матрице нанопористое стекло – полимер / С. М. Долотов [и др.] // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42, № 1. – С. 39–43.

2. Колдунов, М. Ф. Показатели качества наведенного поглощения оптического излучения в органических соединениях / М. Ф. Колдунов, Л. М. Колдунов // Прикладная физика, – 2015. – № 5. – С. 5–11.

3. Курстак, В. Ю. Наведенное поглощение в композите «нанопористое стекло – полимер» с красителем при пикосекундном возбуждении / В. Ю. Курстак, С. С. Ануфрик, // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2025. – Т. 15, № 1. – С. 105–113.

4. Курстак, В. Ю. Определение нелинейных составляющих показателя преломления композита PcPb при пикосекундном возбуждении / В. Ю. Курстак, С. С. Ануфрик, Л. М. Колдунов // Квантовая электроника : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–23 нояб. 2023 г. / БГУ ; редкол.: М. М. Кугейко (гл. ред.), А. А. Афоненко, А. В. Баркова. – Минск, 2023. – С. 79–83. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

5. Курстак, В. Ю. Модель наведенного поглощения излучения пикосекундной длительности в нанокомпозите с красителем с учетом двухфотонного поглощения / В. Ю. Курстак, С. С. Ануфрик, // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2026. – Т. 16, № 1. – С. 60–69.

Numerical simulation of induced absorption in nanoporous glass with polymer and zinc phthalocyanine dye was performed for various durations of high-intensity radiation using the rate equation method. It is shown that the maximum value of the absorption coefficient is reached immediately after the end of the excitation pulses. An increase in the excitation pulse duration from 50 ps to 1.5 ns leads to a strong decrease in the maximum absorption coefficient, while a further increase in excitation duration from 2 ns to 10 ns and more contributes to an insignificant decrease in the maximum absorption coefficient.

Доста Виктория Андреевна, студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, vikadosta0@gmail.com.

Научный руководитель – *Курстак Владислав Юзефович*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

УДК 004.02

С. В. ДЮРДЬ, М. В. ВОРОНОВИЧ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МАЯТНИКОВЫХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОЙ СЛОЖНОСТИ

Представлена разработка комплексной компьютерной модели для исследования динамики различных типов маятниковых систем. Рассмотрены пружинный, математический, параметрический, двойной, тройной маятники, а также маятник Фуко. Для численного интегрирования уравнений движений применяются как аналитические, так и численные методы.

Маятниковые системы представляют собой фундаментальные объекты в изучении классической механики. От простого пружинного маятника до сложных многозвенных систем – эти объекты демонстрируют переход от регулярных периодических колебаний к детерминированному хаосу.

Актуальность разработки компьютерных моделей колебательных систем обусловлена несколькими факторами. Во-первых, аналитическое решение уравнений движения возможно лишь для простейших систем; при увеличении степеней свободы возникает необходимость численных методов. Во-вторых, визуализация динамики и фазовых портретов позволяет глубже понять физику процессов, особенно в случае хаотического поведения. В-третьих, интерактивные модели служат эффективным образовательным инструментом для изучения теоретической механики, позволяя студентам экспериментировать с параметрами, которые трудно или невозможно изменить в реальных физических установках. Кроме того, в условиях цифровизации образования создание виртуальных лабораторий становится приоритетным направлением, обеспечивающим доступность физических экспериментов независимо от наличия дорогостоящего оборудования.

Целью настоящей работы является создание интегрированной программной среды для моделирования и анализа различных типов маятников, объединяющей точные физические модели, эффективные численные методы и наглядную визуализацию. Особое внимание уделяется созданию интуитивного пользовательского ин-

терфейса, позволяющего исследователям и студентам без специальной подготовки в программировании проводить компьютерные эксперименты с колебательными системами.

Архитектура программного комплекса состоит из трёх функциональных блоков: блок 3D-визуализации, блок аналитики и графиков, теоретический блок.

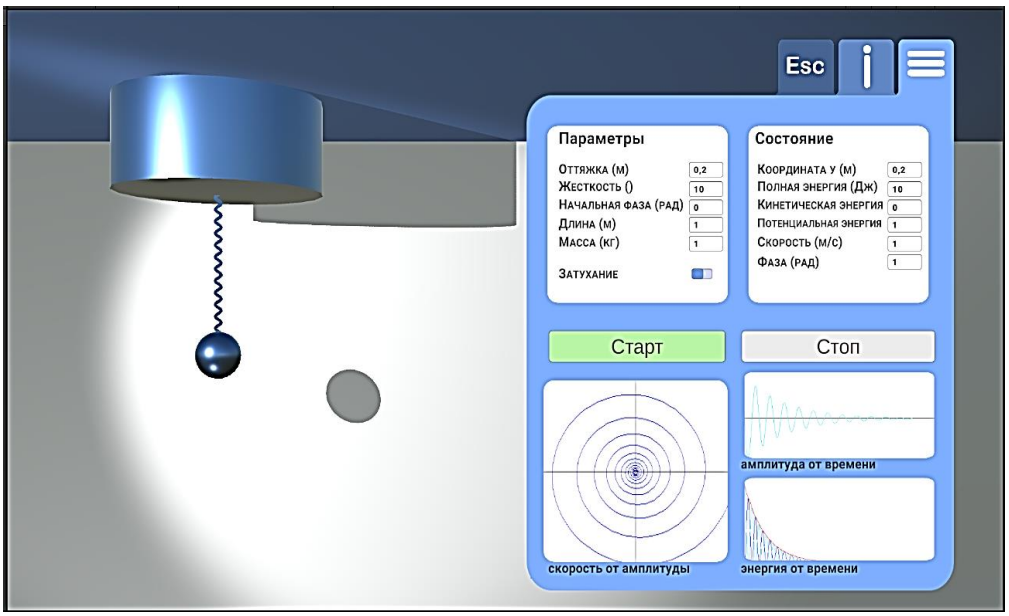


Рисунок 1 – Пример внешнего вида разработанного комплекса

Блок 3D-модели включает в себя кнопки управления, а также саму 3D-модель колебательной системы. С помощью кнопок управления можно запустить и остановить симуляцию, а также изменить начальные параметры, включить и выключить затухание системы. Визуализация движения маятников реализована через прямое позиционирование объектов в пространстве Unity: каждый кадр после физического обновления вычисляются мировые координаты [2, с. 344] шарниров и грузов, которые присваиваются свойствам Transform.position соответствующих игровых объектов. Между узлами маятника отрисовываются линии с помощью компонента LineRenderer, имитирующие нити или пружины. Такой подход обеспечивает плавную анимацию при сохранении физической корректности отображаемых траекторий.

В блоке аналитики и графиков программа представляет следующие графики: энергии по времени, координаты по времени, скорости по координате. Первый график демонстрирует сохранение энергии для консервативных систем и ее убывание для диссипативных, что позволяет верифицировать корректность численной схемы интегрирования. Второй – помогает анализировать периодичность и затухание. Фазовый портрет выявляет аттракторы и хаотические режимы, наглядно демонстрируя переход от регулярных эллиптических траекторий к сложным фрактальным структурам при увеличении энергии системы. Для построения графиков используется метод «белого холста»: текущие координаты маятника выводятся в пространство и аналитическим методом отрисовываются на текстуре Texture2D, присваиваемой объекту RawImage. Такая реализация обеспечивает высокую производительность при обновлении графиков в реальном времени.

Блок теории включает в себя краткую сводку касаемо определенного маятника и метод его моделирования. Теоретический материал охватывает классификацию колебательных систем на консервативные и диссипативные, свободные и вынужденные колебания, а также содержит вывод основных уравнений движения для каждого типа маятника. Особое внимание уделяется объяснению феномена чувствительности к начальным условиям как признака хаотического поведения, характерного для двойного и тройного маятников.

Симуляция осуществляется следующим путем. Каждый кадр, через фиксированный промежуток времени, с помощью встроенной функции FixedUpdate() [1, с. 26], программа высчитывает координату маятника через шаг Time.fixedDeltaTime, перемещает маятник в нужную точку и обновляет сцену. Графики так же отрисовываются каждый кадр в соответствии с вычисленными данными. Использование фиксированного временного шага, не зависящего от частоты кадров рендеринга, критически важно для физической корректности симуляции, поскольку гарантирует стабильность численного интегрирования и воспроизводимость результатов. При работе в режиме 60 кадров в секунду шаг FixedUpdate составляет приблизительно 0,0167 с, что обеспечивает достаточную временную дискретизацию для точного моделирования быстрых колебаний.

Для высчитывания координат используются разные методы. Так, например, для математического и пружинного маятника используются формулы, основанные на законах Ньютона, а для двойного и тройного маятников – метод Рунге-Кутты 4-го порядка [3, с. 27]. Для простых систем он является избыточным, однако для более сложных он оптимален, так как с увеличением сложности системы, возможность получения ее аналитического решения исчезает.

Метод Рунге-Кутты 4-го порядка выбран в связи с его точностью и устойчивостью для гамильтоновых систем. Несмотря на необходимость четырех вычислений на один кадр, благодаря его точности можно использовать меньший шаг, что позволяет выигрывать в производительности по сравнению с тем же методом Эйлера, точность которого требует минимального шага. Он заключается в нахождении матрицы коэффициентов:

$$k_1 = hf(t_n, y_n),$$
$$k_2 = hf(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}),$$
$$k_3 = hf(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}),$$
$$k_4 = hf(t_n + h, y_n + k_3)$$

и последующим нахождением функции:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

Благодаря интерактивным возможностям программы пользователь может изменять начальные условия (углы отклонения, начальную амплитуду, начальные скорости), варьировать параметры системы (массы, длинны звеньев, жесткость пружины, наличие затухания), проводить сравнительный анализ (запускать несколько маятников с близкими начальными условиями для демонстрации расхождения траекторий).

Разработанный программный комплекс обеспечивает комплексное моделирование различных типов маятниковых систем – от простых гармонических осцилляторов до сложных хаотических систем с несколькими степенями свободы. Использование метода Рунге-Кутты четвертого порядка гарантирует высокую точность численного интегрирование, интерактивная визуализация позволяет качественно исследовать динамику систем.

Программа может быть использована как в образовательных целях, для изучения теоретической механики, так и для научных исследований в области нелинейной динамики и хаоса. Перспективы развития включают добавление новых функций, как, например, приложение сил к колебательной системе, и других видов маятников (крутильный, баллистический и т. д.).

Список литературы

1. Ларкович, С. Н. C# для Unity-разработчиков. Практическое руководство по созданию игр / С. Н. Ларкович, П. В. Евдокимов. – СПб. : Наука и Техника, 2023. – 368 с.

2. Орлов, С. А. Технологии разработки программного обеспечения: разработка сложных программных систем / С. А. Орлов. – СПб. : Питер ; Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – С. 6–198.

3. Горелов, Ю. Н. Численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений (метод Рунге-Кутты) / Ю. Н. Горелов, Л. В. Кургаская. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2023. – С. 22–25.

The paper presents the development of a comprehensive computer model for studying the dynamics of various types of pendulum systems. Spring, mathematical, parametric, double, triple pendulums, and Foucault's pendulum are considered. Both analytical and numerical methods are used for numerical integration of the equations of motion. The software architecture consists of three functional blocks: 3D visualization, analytics and graphs, and theoretical block. The fourth-order Runge-Kutta method is employed for complex chaotic systems due to its accuracy and stability. The developed complex can be used for educational purposes in studying theoretical mechanics and for scientific research in nonlinear dynamics and chaos.

Дюрдь София Владимировна, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, sssofiadddurd.25@gmial.com.

Воронович Марк Валентинович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, markvoronovich060@gmail.com.

Научный руководитель – *Ситкевич Анастасия Леонидовна*, магистр физико-математических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, girl-physicist@mail.ru.

УДК 535.3

М. А. ЖУК

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ РОС-ЛАЗЕРОМ НА КРАСИТЕЛЯХ ПРИ МАЛОЙ ДЛИНЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

РОС-лазер на красителях – перспективный источник узкополосного, перестраиваемого по частоте излучения пикосекундной длительности. Он позволяет генерировать ультракороткие импульсы излучения (УКИ) как при пикосекундной, так и при наносекундной длительности импульсов возбуждения [1–4]. При наносекундной накачке РОС-лазер генерирует импульсное излучение с длительностью в 50–100 раз меньшей, чем длительность импульса накачки.

Простейший способ сокращения длительность УКИ – использование более коротких импульсов возбуждения. С использованием импульсов накачки пикосекундной длительности, обеспечивающих чрезвычайно высокую скорость возбуждения, РОС-лазер на красителях способен генерировать импульсы вплоть до 0,4 пс [5], однако такие источники являются уникальными и практически недоступны широкому кругу исследователей.

Генерационные характеристики УКИ РОС-лазера зависят от параметров активной среды, длины периодической структуры и длительности импульсов возбуждения. Управление длительностью и мощностью УКИ посредством изменения длины РОС-структуры может осуществляться оперативно, причём без нарушения юстировки РОС-лазера. В связи с этим исследование генерации пикосекундных импульсов при малых длинах периодической актуально.

Описание кинетики генерации РОС-лазера на красителях осуществлялось системой скоростных уравнений [3; 4].

$$\frac{dn(t)}{dt} = I_p(t)\sigma_p[N - n(t)] - \frac{\sigma_e c}{\eta} n(t)q(t) - \frac{n(t)}{\tau} \tag{1}$$

$$\frac{dq(t)}{dt} = \frac{\sigma_e c}{\eta} n(t)q(t) - \frac{q(t)}{\tau_c(t)} + \frac{\Omega}{\tau} n(t) \ , \tag{2}$$

$$\tau_c(t) = \frac{\eta L^3}{8c\pi^2}\left[n(t)\sigma_e\right]^2 V \tag{3}$$

где $n(t)$ – населенность верхнего лазерного уровня, $q(t)$ – объёмная плотность фотонов лазерного излучения, имеющих длину волны $\lambda_г$, N – концентрация молекул красителя, τ – время жизни возбуждённого состояния; $I_p(t)$ – плотность потока фотонов накачки, σ_p – сечение поглощения излучения накачки, σ_e – сечение вынужденного излучения молекул красителя на длине волны генерации, η – показатель преломления раствора красителя, Ω – коэффициент, определяющий часть спонтанного излучения молекул, которая соответствует угловому и спектральному диапазонам генерации РОС-лазера, L – длина периодической структуры, V – видимость интерференционного поля накачки.

Рассчитана кинетика генерации РОС-лазера, возбуждаемого импульсами Гауссовой формы длительностью по полувысоте, равной 50 пс.

При моделировании использовались параметры лазерного красителя кумарин 1, часто используемого в экспериментальных исследованиях в качестве активной среды: $\sigma_p = 2{,}8\cdot10^{-17}$ см^2, $\sigma_e = 2{,}4\cdot10^{-16}$ см^2, $\tau = 2{,}9$ нс, $\lambda_н = 3{,}37\cdot10^{-5}$ см, $\lambda_г = 4{,}6\cdot10^{-5}$ см, $n_p = 1{,}36$, $N = 3{,}1\cdot10^{18}$ см$^{-3}$.

Было рассчитано изменение населенности верхнего лазерного уровня $n(t)$ и плотности фотонов генерируемого излучения q(t) для РОС-лазера со светоиндуцированной периодической структурой, при трёх различных значениях её длины L: 0,75 0,5 и 0,25 мм и различных превышениях энергии импульсов накачки γ над её пороговым значением $E_{ПОР}$, т.е. $\gamma = E_Н / E_{ПОР}$.

Генерируемое в данных условиях лазерное излучение в общем случае представляло собой цуг ультракоротких импульсов (рисунок 1).

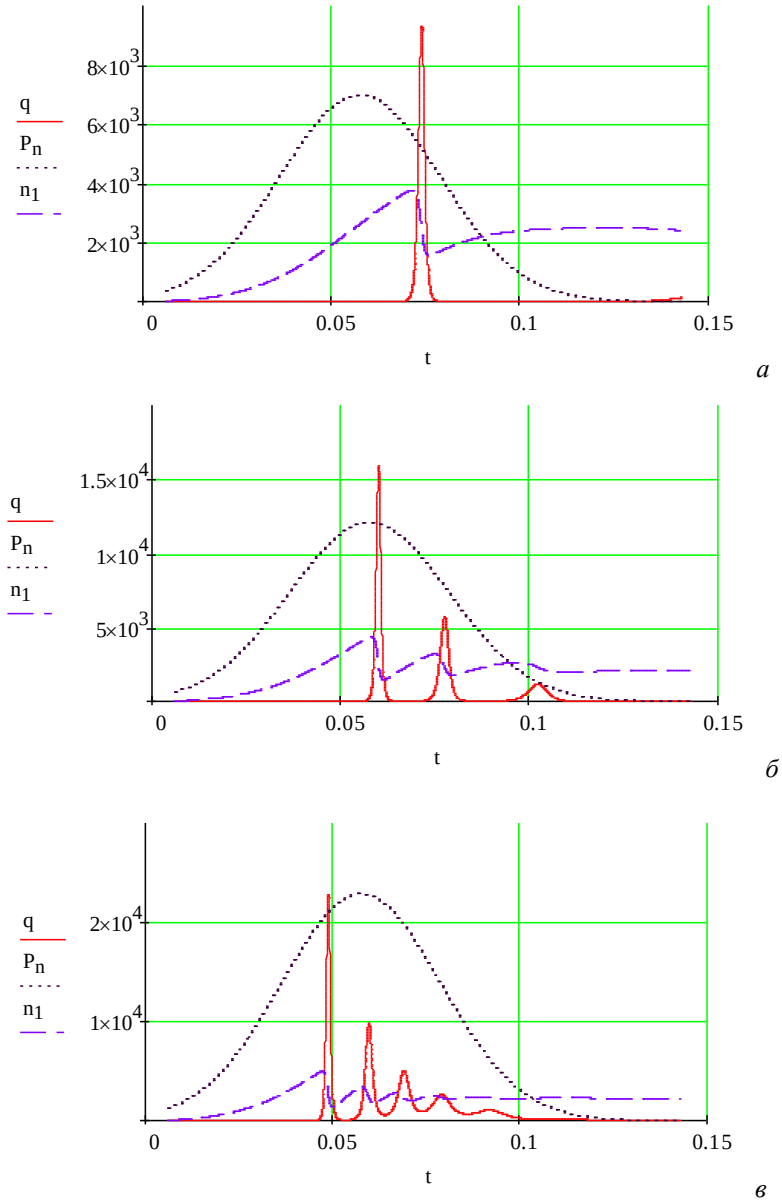


Рисунок 1 – Кинетика генерации РОС-лазера на красителях при длине РОС-структуры L = 0,75 мм и различных превышениях порога накачкой: а) γ = 2.2 (τ = 1,9 пс); б) γ = 3.8 (τ = 1,5 пс); в) γ = 7.2 (τ = 1.2 пс)

При величине γ, не превышающей некоторого значения (в нашем случае 2,2 при L = 0,75 мм), генерируется одиночный УКИ (в нашем случае длительностью 1,9 пс) (рисунок 1*а*). При больших γ генерируется цуг УКИ. Рост величины γ приводил к увеличению числа импульсов в цуге, при этом генерация развивалась на все более раннем этапе действия накачки. Населенность верхнего лазерного уровня $n(t)$ при генерации цуга импульсов испытывала релаксационные колебания около своего порогового значения.

Зависимость длительности одиночного УКИ при трёх различных значениях длины периодической структуры, равных 0,75 0,5 и 0,25 мм от превышения порога накачкой γ приведена на рисунке 2.

Длительность УКИ во всех трёх случаях нелинейно сокращается с ростом накачки. Характер сокращения одинаковый, однако, более резкое уменьшение длительности наблюдается при минимальной длине РОС-структуры. Минимальная длительность УКИ τ = 1,4 пс, как видно из рис. 2, достигалась при наименьшей длине РОС – структуры L = 0,25 мм.

Зависимость мощности Р одиночного УКИ РОС-лазера от превышения порога накачкой при различной длине периодической структуры представлена на рисунке 3. Рост накачки, как видно из рисунка 3, приводит к увеличению мощности одиночного УКИ при всех длинах РОС-структуры. Наибольшая мощность достигается при максимальной длине РОС-структуры.

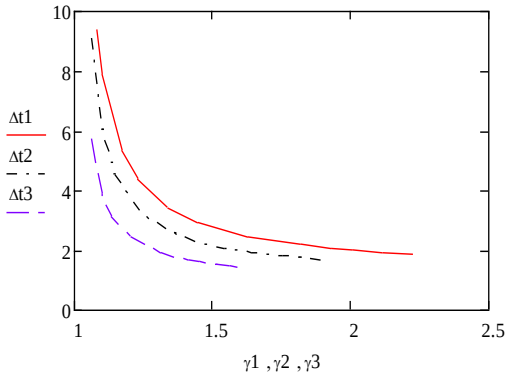


Рисунок 2 – Зависимость длительности Δ*t* одиночного УКИ от превышения порога γ при различной длине РОС- структуры *L*: Δ*t*1, Δ*t*2 и Δ*t*3 относятся к L **= 0,75 0,5 и 0,25 мм, соответственно**

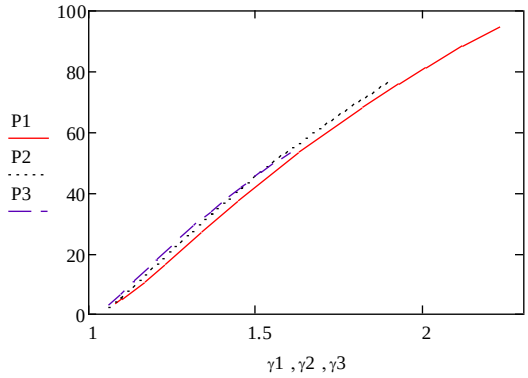


Рисунок 3 – Зависимость относительной мощности *P* одиночного УКИ от превышения порога γ при различной длине РОС- структуры *L*: Δ*t*1, Δ*t*2 и Δ*t*3 относятся к *L* = 0,75 0,5 и 0,25 мм, соответственно

Пиковая мощность одиночных УКИ для трёх использованных длин РОС-структуры описывается близко расположенными кривыми. При двукратном увеличении длины РОС-структуры (с 0,25 до 0,5мм) происходило увеличение максимальной мощности одиночного УКИ всего в 1,43 раза.

Одной из основных характеристик режима генерации импульсов РОС-лазером является превышение пороговой энергии накачки γ_0, при котором ещё генерируется одиночный УКИ. Данная величина при сокращении длины РОС – структуры существенно уменьшается: с 2,23 при L = 0,75 мм до 1,61 при L = 0,25 мм.

Минимальные длительности одиночных УКИ, которые способен генерировать РОС-лазер в рассмотренных условиях составляли от 1,4 до 1,9 пс (отличаются в 1,35 раза) при длинах РОС-структуры в 0,25 и 0,75 мм, соответственно. При переходе от меньшей длины РОС-структуры к большей относительная пиковая мощность импульсов увеличивалась в 1,8 раза.

Список литературы

1. Highly efficient solid-state distributed feedback dye laser based on polymer-filled nanoporous glass composite excited by a diode-pumped solid-state Nd:LSB microlaser / V. M. Katarkevich [et al] // Appl. Opt. – 2015. – Vol. 54, No. 26. – P. 7962–7972.

2. Курстак, В. Ю. Селекция ультракороткого импульса из цуга излучения РОС-лазера в усилителе на красителях / В. Ю. Курстак // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2010. – № 2. – С. 62–66.

3. Курстак, В. Ю. Моделирование кинетики генерации РОС-лазера, возбуждаемого цугом ультракоротких импульсов / В. Ю. Курстак // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2002. – № 2. – С. 46–51.

4. Курстак, В. Ю. Влияние глубины модуляции показателя преломления стационарной фазовой решетки на кинетику генерации РОС-лазера на красителях / В. Ю. Курстак, И. А. Курстак // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2016. – Т. 6, № 3. – С. 105–113.

5. Szatmari, S. Subpicosecond, widely tunable distributed feedback dye laser / S. Szatmari, F. P. Schafer // Appl. Phys. – 1988. – Vol. B46, No. 4. – P. 305–311.

Numerical simulation of the generation of radiation pulses by a dye-based ROS laser using the method of velocity equations with a short periodic structure length and coherent excitation has been performed. It was found that the minimum duration of single UST that the ROS laser is capable of generating under the conditions under consideration ranged from one and a half to two picoseconds with the lengths of the ROS structure of 0.25 and 0.75 mm, respectively. During the transition from a shorter wavelength to a longer pulse length, the pulse power increased by 1.8 times.

Жук Максим Андреевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, polmax928@gmail.com.

Научный руководитель – *Курстак Владислав Юзефович*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета им. Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, vkurstak@tut.by.

УДК 612.117.6

Е. М. ЖУКОВСКИЙ, А. Н. СУХОЦКИЙ, Ю. Н. КЕНДЫШ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ ЗА СЧЁТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Проведенное нами исследование ставило целью получить теоретически рассчитанное тепловыделение из такого участка человеческого тела, как голень, учитывая, что теплоотдача происходит только за счет теплопроводности с фактическими потерями тепла с поверхности этих участков, обусловленными температурным градиентом между кожей и окружающей средой. Моделирование тепловых процессов является значимым для получения температур в глубинных частях тела человека.

Ключевые слова: моделирование, голень, температурный градиент, подкожный слой, коэффициент теплопроводности.

Организм постоянно обменивается теплом с окружающей средой, что приводит к установлению стабильной температуры как внутри, так и на поверхности тела. Этот теплообмен происходит за счет теплопроводности, испарения, конвекции и излучения. Наше исследование было направлено на количественную оценку теплопотерь из голени тела человека, используя экспериментальные данные и моделирование только за счет теплопроводности. В качестве аналогов голени были выбраны цилиндрические тела длиной 40 см, Радиус ноги человека зависит от того, какая часть тела рассматривается, для моделирования часто используется радиус бедра около 7–9 см, и 4–6 для голени. Эти цилиндры, имитируют массу бедра и голени (по 4 кг каждый), также обладают определенной площадью поверхности, которая определяет интенсивность теплоотдачи в окружающую среду, и эта площадь принималась равной в среднем 1206,7 см^2 – для голени, и, сравнительно, 1406,7 см^2 – для бедра. Коэффициент теплопроводности тела человека варьируется, но в среднем принимается также как для воды, так как в теле человека высокое содержание воды, если рассматривать боле детально, то в теле человека есть много составляющих, например, жировая ткань, она обладает более низкой теплопроводностью. Значение теплопроводности, которое мы брали для расчетов, находилось в пределах от 0,58 до 0,6 Вт/(м·К).

В первом приближении можно считать, что для голени уходит тепло за счет радиационного механизма следующим образом:

$E_{рад} = \sigma \cdot S \cdot (T_ч^4 - T_0^4) \cdot k$, где $S = 1406{,}7$ см^2, для голени, T_o – температура окружающей среды принималась равной 296 К. Полагая что тело человека является серым, коэффициент поглощения $k = 0.8$, а $T_ч$ определяется экспериментально, можно оценить мощность тела человека от голени и бедра, при нашей оценке получилось что эта мощность составляет 23,8–30,2 Вт [1]. Все измерения были проведены дистанционным измерителем температуры (пирометр) UnionTEST IR1150, который позволяет бесконтактно, быстро и безопасно измерять температуру поверхности труднодоступных объектов.

В исследовании участвовали люди разного возраста, разделенные на две группы: те, у кого есть проблемы с опорно-двигательным аппаратом, и здоровые добровольцы. Измерялась температура задней поверхности тела во фронтальной плоскости, в области поясницы и икр. Все участники находились на расстоянии 1,5 метра от прибора, как предписано инструкцией. Для расчетов был принят коэффициент теплового излучения кожи 0,98. Термограммы снимались в помещении с влажностью 50 % и температурой 25±1 °С. Для обеспечения единообразия все измерения проводил один специалист. Для определения необходимого количества участников в каждой группе использовался t-критерий для независимых выборок в программе STATISTICA (StatSoft, Inc., США, 2014, версия 12). Перед этим было проверено, соответствуют ли данные нормальному распределению с помощью теста Шапиро-Уилка. Поскольку распределение оказалось нормальным, для сравнения средних температур в исследуемых зонах применялся параметрический t-критерий Стьюдента.

Для оценки взаимосвязи между значениями температуры поверхности выбранных участков тела был рассчитан коэффициент корреляции Пирсона. Уровень статистической значимости составлял $p < 0.05$.

Методы исследования. Измерения были выполнены бесконтактным инфракрасным термометром модели DT-8806S, предназначенным для измерения температуры тела человека. Диапазон рабочих температур от 10 до 400 ℃. Согласно инструкции было указано, что нужно соблюдать дистанцию измерения, равную 5–15 см, и перед использованием инфракрасный термометр необходимо оставить в помещении на 15–20 минут, эти пункты были соблюдены при проведении измерений. Перед измерением температуры у испытуемых убирали волосы с места измерения и был удален пот.

Устройство соответствует стандарту FCC в части 15 параграф B:2007, требованиям к радиочастотным устройствам ICEC-003:2004 требованиям к устройствам, являющимся источниками электромагнитных помех – цифровые устройства. Согласно инструкции для достоверности проведенных измерений было выполнено условие, если устройство не используется в течение длительного периода времени, то включение производится с задержкой в 1–2 секунды и предварительно измеряется комнатная температура. В качестве испытуемых для экспериментальной группы были выбраны студенты физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Критериями отбора являлись возраст (18–25 лет) и отсутствие каких-либо диагностированных патологий или дистрофических изменений. Для проведения эксперимента студенты не разбивались по половым категориям.

Было рассчитано количество теплоты выделяемое от голени и бедра, представленных в форме цилиндра за счет теплопроводности, полагая, что теплота отводится только через наружную поверхность (внутренняя поверхность теплоизолирована). Зная количество теплоты, можно было определить температуру в нижних слоях моделируемой части тела, используя для этого дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат при изменении температуры только от радиуса, которое имеет вид

$$\frac{d^2t}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dt}{dr} + \frac{q}{\lambda} = 0. \quad (1)$$

Данное уравнение описывает стационарную теплопроводность цилиндра с внутренним источником теплоты, при постоянной теплопроводности.

Интегрируя (1) получим,

$$-\frac{qr^2}{4\lambda} + \frac{q}{\lambda} + c_1 lnr + c_2. \quad (2)$$

Значения постоянных интегрирования, а соответственно, зависимость температуры от радиуса будут определяться граничными условиями конкретной задачи.

Использование граничного условия на поверхности

$$r = R \cdot t \qquad (R) = t_c = \frac{q}{4\lambda}R^2 + C_2. \quad (3)$$

Формула распределения температур

$$t(r) = t_c = \frac{q}{4\lambda}(R^2 - r^2). \quad (4)$$

Расчет максимальной температуры когда радиус r=0.

$$t_c = t_c + \frac{q}{4\lambda}R^2. \quad (5)$$

Зная коэффициент теплопроводности, размеры голени, температуру поверхности тела человека и количество теплоты, получили, что температура меняется незначительно, всего от 0,02 до 0,05 градусов.

Распределение температуры в ткани кожи от поверхности вглубь тела представлено ниже на рисунке 1, зависимость построена для теоретических данных и данных полученных в ходе моделирования голени тела человека в форме цилиндра.

Анализ графика, полученного с помощью эксперимента выявляет, что температура на уровне поверхности кожи фиксируется на отметке 34 ℃. В приповерхностном слое наблюдается выраженное изменение температуры, характеризующееся градиентом 0,032 ℃/см. Далее происходит резкое снижение темпа изменения температуры, при этом градиент уменьшается в 10 раз, стабилизируясь на уровне 0,0036 ℃/см.

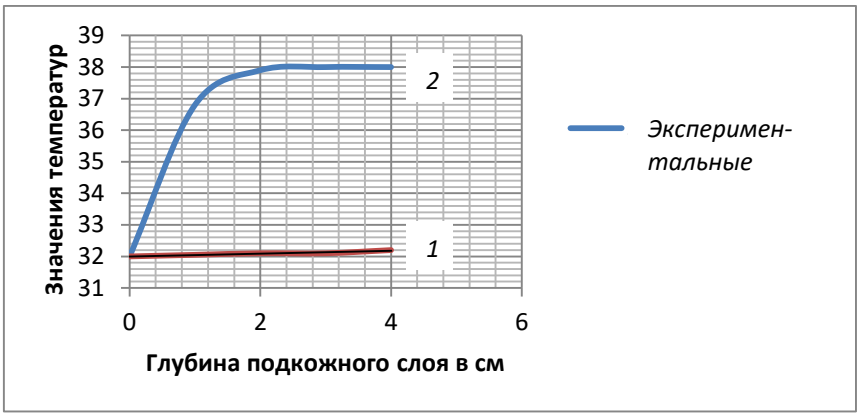


Рисунок 1 – Зависимость температуры от глубины подкожного слоя:
1 – теоретические данные и 2 – экспериментальные

Заключение: Незначительное изменение температуры объясняется тем, что мы приняли отдачу тепла только за счет теплопроводности, исключая излучение и конвекцию, коэффициент тела человека был при наших расчетах постоянный, не смотря на то, что у человека есть кровеносная система, лимфа, костная и жировая ткань. Данная модель может быть применима для оценочного расчета внутренних температур тела человека, так как данный метод является неинвазивным.

Список литературы

1. Жарнова, О. А. Моделирование теплообмена тела человека с окружающей средой / О. А. Жарнова, Э. А. Быковский, Т. К. Крупская // Культура движения, питания, тела и здоровья в современном обществе : сб. материалов Междунар. науч.-метод. конф., Гродно, 3–4 апр. 2025 г. – Гродно : ГрГМУ, 2025. – С. 30–33.

2. Ермакова, И. И. Математическое моделирование процессов терморегуляции у человека / И. И. Ермакова // Итоги науки и техники. Сер. «Физиология человека и животных». – 1987. – 133 с.

Сухоцкий Александр Николаевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, sashasukhozky@gmail.com.

Жуковский Евгений Михайлович, студент 3 курса физико-технического Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, billalvarez2006@gmail.com.

Кендыш Юлия Николаевна, студент 6 курса лечебного факультета Гродненского государственного медицинского университета, Гродно, Республика Беларусь, kendyshy03@mail.ru.

Научный руководитель – Жарнова Ольга Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, zharnova_oa@grsu.by.

Научный руководитель – Крупская Татьяна Константиновна, магистр педагогических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, krupskaya_oa@grsu.by.

УДК 004.65

А. Г. ЗАВАДСКАЯ, К. А. СЕМЧУК

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ С БАЗОЙ ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГАЗОВ

Рассматривается проблема систематизации и оперативного доступа к термодинамическим свойствам газов и жидкостей. Целью исследования является разработка программного приложения, объединяющего базу данных физико-химических параметров веществ и модули для расчета их ключевых характеристик. В статье описана структура базы данных, включающей параметры для более чем 600 веществ. Представлены реализованные алгоритмы расчета плотности на основе модифицированного уравнения Соаве-Грабоски-Дауберта, изобарной теплоемкости по методу Ли-Кеслера и давления насыщенных паров с использованием уравнения Питцера. Программная реализация выполнена на языке C# с применением СУБД Microsoft Access. Результатом работы является функциональное приложение, позволяющее выполнять навигацию по базе данных и получать расчетные значения свойств веществ.

Достоверные данные о физических свойствах газов и жидкостей являются основой для научных исследований и инженерных расчетов в химической, нефтегазовой и энергетической отраслях. В настоящее время существует значительное количество разрозненных справочных данных, что затрудняет их систематизированное

использование. В связи с этим создание единой структурированной электронной базы данных, интегрированной с программным обеспечением для автоматизированного расчета термодинамических характеристик, является актуальной задачей.

Разработанная база данных содержит информацию о более чем 600 веществах. В ее структуру входят как статические параметры (молекулярная масса, критическая температура Tc, критическое давление Pc, фактор ацентричности Питцера ω), так и эмпирические коэффициенты для расчета свойств, зависящих от температуры. Основные поля базы данных представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные поля базы данных физических свойств газов.

Поле	**Описание**
Title	Название вещества
Formula	Химическая формула
Tc	Критическая температура, К
Pc	Критическое давление, атм
Omega	Фактор ацентричности Питцера
CpVap-D	Коэффициент для расчета теплоемкости
PvpA-D	Коэффициент для расчета давления насыщенных паров

Для расчета плотности газов было выбрано модифицированное уравнение Соаве-Грабоски-Дауберта, являющееся развитием классического уравнения Редлиха-Квонга. Уравнение имеет вид:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T,\omega)}{V(V+b)},$$

где P – давление, R – универсальная газовая постоянная, T – температура, V – молярный объем, a и b – параметры уравнения, зависящие от вещества. Температурно-зависимый параметр $a(T,\omega)$ учитывает фактор ацентричности ω и рассчитывается по эмпирическим корреляциям. Плотность газа ρ при заданных давлении и температуре находится как $\rho = \frac{M}{V}$, где M – молярная масса, после численного решения уравнения состояния относительно объема V.

Изобарная теплоемкость реального газа C_p связана с теплоемкостью в идеально-газовом состоянии C_p^o соотношением: $C_p = C_p^o + \Delta C_p$. Поправка на давление $(C_p - C_p^o)$ рассчитывается по методу Ли-Кеслера с использованием принципа соответствия и табличных функций от приведенных температуры и давления. Идеально-газовая теплоемкость определяется по полуэмпирическому уравнению: $C_p^0 = A + BT + CT^2 + DT^3$, где коэффициенты *A, B, C, D* хранятся в базе данных.

Давление насыщенных паров рассчитывается с использованием разложения Питцера, которое в форме Ли-Кеслера представляется как $\ln P_{vp_r} = f^{(0)}(T_r) + \omega f^{(1)}(T_r)$. Функции f^0 и f^1 табулированы. В зависимости от номера уравнения, хранящегося в базе (NumberEqVp), может применяться метод Фроста-Калкварфа-Тодеса, требующий решения трансцендентного уравнения, что выполняется численным методом половинного деления.

Приложение разработано на языке C# в среде Microsoft Visual Studio. Для хранения данных используется СУБД Microsoft Access, что обусловлено простотой развертывания и интеграцией с .NET. Доступ к базе осуществляется через ADO.NET с использованием провайдера Microsoft.ACE.OLEDB. Данные загружаются в DataTable и через механизм BindingSource связываются с элементами графического интерфейса: ListBox для навигации по веществам и текстовыми полями для отображения параметров. Ниже представлены фрагменты кода, реализующие подключение к базе данных, загрузку списка веществ и отображение их параметров:

Листинг 1 – Загрузка списка веществ из базы данных

```
void LoadMatList() {
    ApplPathStart = System.Windows.Forms.Application.StartupPath + «\\»;//..\»
    string xxx = Environment.GetFolderPath(Environment.SpecialFolder.CommonApplicationData);
    TMPdir = xxx + «\\T_Physics_tmp\\»;
    Directory.CreateDirectory(TMPdir);
    //строка соединения с базой данных
    connstr = «Provider = Microsoft.ACE.OLEDB.16.0; Data Source = « + ApplPathStart + «prop.accdb»;//;DataBase Password=pole»;
    //создаем объект класса clsOleDBReadUpdateDB
    DB = new clsOleDBReadUpdateDB(connstr);
    //SQL запрос
    DB.stSelect = «SELECT * FROM TablePROP»;
    //читаем таблицу из базы
    TabDB = DB.GetTable(ref errcode);
    //читаем из таблицы порядковый номер,формулу и название
```

```
    dataGridView1.DataSource = TabDB;
    //список веществ читаем в bindingSource1
    for (int i = 0; i < TabDB.Rows.Count; i++) {
       bindingSource1.Add(TabDB.Rows[i][«Title»]);
    }
void ShowPar() {
   string st;
   if(ListIndex<0) ListIndex=1;
   //читаем параметры из базы
   listBox3.Items.Clear();
   for (int i = 4; i <=14; i++) {
     st=Convert.ToString(Math.Round((double)TabDB.Rows[ListIndex][i],8));
      //listBox3.Items.Add(TabDB.Rows[ListIndex][i]);
      listBox3.Items.Add(st);
   }
}
private void listBox1_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e) {
   ListIndex= listBox1.SelectedIndex;
   ShowPar();
}
```

Пользовательский интерфейс приложения (рисунки 1–2) позволяет выбрать вещество из списка, ввести температуру и давление, после чего рассчитать плотность, теплоемкость или давление насыщенных паров.

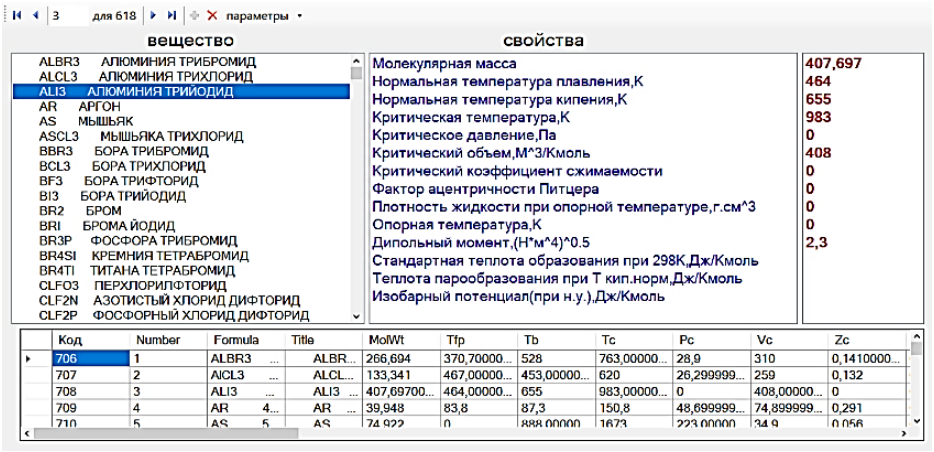


Рисунок 1 – Навигация по материалам базы данных

Окно выбора параметров для расчета (рисунок 2) позволяет задать необходимые термодинамические условия и выбрать тип рассчитываемого свойства.

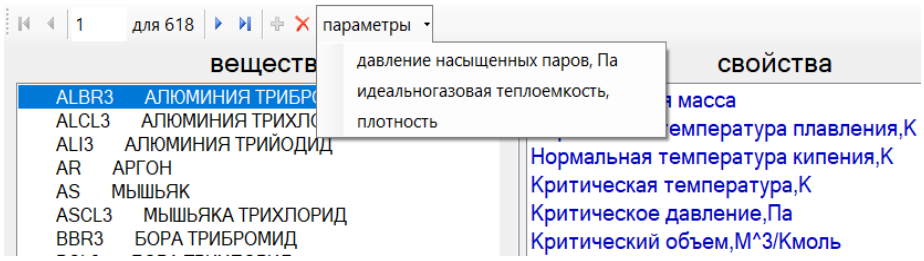


Рисунок 2 – Окно выбора параметров для расчета

В результате работы сформирована электронная база данных для более чем 600 веществ. Разработано программное приложение с графическим интерфейсом, объединяющее функции навигации и расчета плотности, изобарной теплоемкости и давления насыщенных паров. Реализованные алгоритмы основаны на современных термодинамических моделях (Соаве-Грабоски-Дауберта, Ли-Кеслера, Питцера), что обеспечивает точность, достаточную для инженерных расчетов. Приложение может быть полезно инженерам-химикам и технологам, а также в учебном процессе. Дальнейшее развитие работы видится в расширении базы данных за счет полярных веществ и реализации модулей для расчета свойств смесей.

Список литературы

1. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей : справочное издание : пер. с англ. / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд ; под ред. Б. И. Соколова. – Л. : Химия, 1982. – 592 с.

2. Уэйлес, С. Фазовые равновесия в химической технологии : в 2 ч. / С. Уэйлес ; пер. с англ. – М. : Мир, 1989. – Ч. 1. – 304 с.

3. Федоров, В. В. Методы расчетов теплофизических свойств газов и жидкостей / В. В. Федоров. – М. : Наука, 1974. – 248 с.

4. Бретшнайдер, С. Свойства жидкостей и газов / С. Бретшнайдер ; пер. с пол. ; под ред. П. Г. Романкова. – Л. : Химия, 1966. – 636 с.

The paper considers the problem of systematization and rapid access to the thermodynamic properties of gases and liquids. The aim of the study is to develop a software application that combines a database of physicochemical parameters of substances and modules for calculating their key characteristics. The article describes the structure of the developed database, which includes static parameters and coefficients for more than 600 substances. The implemented algorithms for calculating density based on the modified Soave-Graboski-Daubert equation, isobaric heat capacity using the Lee-Kesler method, and vapor pressure using the Pitzer equation are presented. The software implementation is done in C# using the Microsoft Access DBMS. The result is a functional application with a graphical interface that allows for database navigation and obtaining calculated values of substance properties under various thermodynamic conditions.

Завадская Алёна Геннадьевна, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, zavaal@bk.ru.

Семчук Карина Андреевна, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, semchuk-karina@mail.ru.

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nik@grsu.by.

УДК 538.911,536.212

И. А. ЗУР

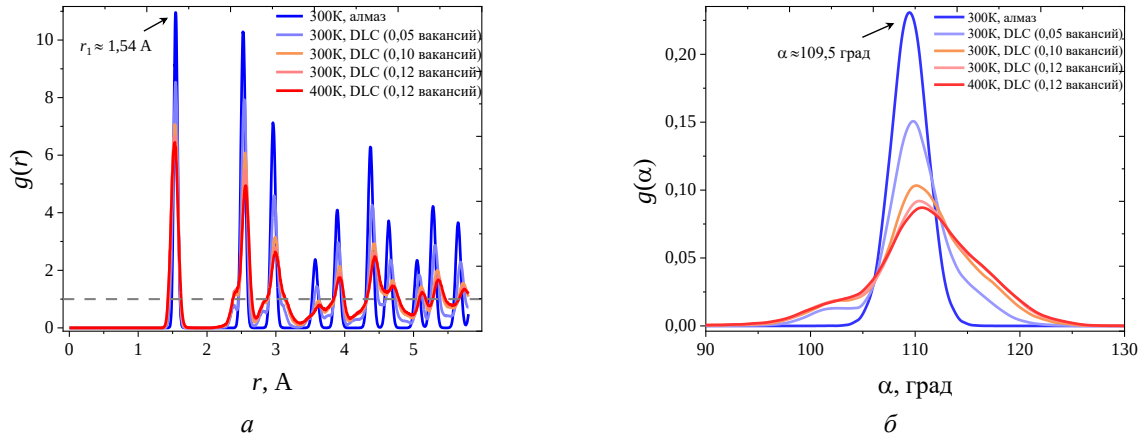
МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ DLC МЕТОДОМ РАВНОВЕСНОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Методом равновесной молекулярной динамики выполнен расчёт структуры и теплопроводности плёнки DLC при температурах 300 и 400 K. Моделирование разупорядоченной структуры DLC путем внедрения в структуру алмаза вакансий (до 12 %) приводит к нарушению дальнего порядка, возбуждению дополнительных колебательных мод, интенсификации фонон-фононного рассеяния, что в совокупности уменьшает теплопроводность DLC (относительно алмаза).

Тонкие плёнки алмазоподобного углерода (Diamond like carbon, DLC) широко применяются в микро- и наноэлектронных устройствах, благодаря их электрическим свойствам, химической стабильности и совместимости с кремниевыми технологиями. В частности, использование DLC в структурах типа диода Шоттки позволяет пассивировать ненасыщенные связи на поверхности кремния и улучшить быстродействие структуры. Миниатюризация электронных компонентов сопровождается ростом плотности тепловыделения, что делает исследование тепловых свойств функциональных слоёв особенно актуальным. Экспериментальное определение теплопроводности наноразмерных плёнок DLC затруднено их малой толщиной и влиянием подложки. В связи с этим численный эксперимент является эффективным подходом при исследовании тепловых свойств наноразмерных слоёв. Целью данной работы является моделирование фононной теплопроводности DLC в зависимости от концентрации вакансий и температуры методом молекулярной динамики.

Расчёт структуры и теплопроводности DLC при температурах T = 300 и 400 K реализован методом равновесной молекулярной динамики в программном пакете LAMMPS. Силовое взаимодействие атомов углерода описывалось модифицированным потенциалом Терсоффа, а их начальное пространственное положение определялось решёткой алмаза с параметром a = 3,57 Å. Расчётная область представляет собой куб $20a \times 20a \times 20a$ с периодическими граничными условиями из которого случайным образом удаляется 5–12 % атомов (вакансии). После генерации начальной конфигурации выполнялась минимизация полной энергии системы методом сопряжённых градиентов, инициализация начальных скоростей и релаксации системы в несколько этапов: в ансамбле NVT (10 пс), NPT (15 пс) и NVE (15 пс). После чего производился основной расчёт в ансамбле NVE (400 пс) с шагом интегрирования уравнений движения $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ пс. Для построения радиальной функции распределения (РФР) $g(r)$, функции распределения углов (ФРУ) $g(\alpha)$, координационного числа, тепловых потоков, автокорреляционной функции (АКФ) скорости и тепловых потоков использовались встроенные функции LAMMPS. Спектр плотности фононных состояний (PhDOS) алмаза и DLC вычислялся через быстрое преобразование Фурье от АКФ скорости. Теплопроводность вычислялась в формализме Грина-Кубо.

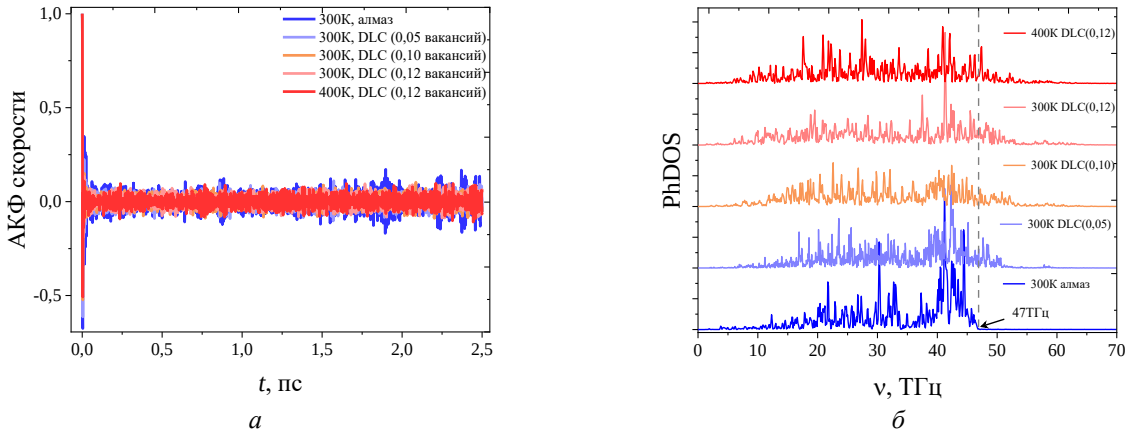
На рисунке 1 приведена радиальная функция распределения и функция распределения углов связи для алмаза и DLC при 300 и 400 К. Радиус первой координационной сферы r_1 составляет 1,54 А и угол 109,5°, что полностью коррелирует с параметрами алмаза. По мере увеличения концентрации вакансий нарушается дальний порядок: вид РФР от квазидискретного переходит к квазинепрерывному для атомов, принадлежащих второй координационной сфере (и сфер более высоких порядков); диапазон значений углов межатомных связей увеличивается от (105°–115°) до (95°–125°) и среднее координационное число уменьшается от 4,0 до 3,6, что в совокупности указывает на переход от кристаллического алмаза к аморфному DLC. РФР и ФРУ значительно более чувствительны к концентрации вакансий, чем к увеличению температуры от 300 до 400 К.



а *б*

Рисунок 1 – (а) РФР и (б) ФРУ связи для алмаза и DLC при 300 и 400 К

Нормированная на максимум АКФ скорости в DLC затухает быстрее, чем в алмазе (см. рис. 2*а*), вследствие увеличения интенсивности рассеяния фононов на неоднородностях структуры (результат внедрения вакансий). В спектре PhDOS алмаза наблюдаются две характерные частотные полосы с максимумами в окрестности 25 и 40 ТГц, соответствующие акустическим и оптическим фононам, и частота отсечки (максимальная частота фононов) ≈ 47 ТГц, что находится в соответствии с представленными в литературе данными [1]. По мере увеличения концентрации вакансий (от 5 до 12 %) уширяется распределение частот, что свидетельствует о разрушении трансляционной симметрии (аморфизации) и появлении локализованных колебательных мод. Вместе с тем, возбуждаются новые высокочастотные моды колебаний с $\nu \geq 47$ ТГц, связанные с колебаниями напряжённых C-C связей.



а *б*

Рисунок 2 – (а) Автокорреляционной функции скорости и (б) спектр плотности фононных состояний (PhDOS) для алмаза и DLC при 300 и 400 К

Рассчитанные значения фононной теплопроводности алмаза (см. табл. 1) меньше экспериментальных значений (2300 Вт/(м·К)), что является следствием конечного размера расчётной области, несовершенством потенциала межатомного взаимодействия, и соответствует наблюдениям других исследователей [2]. Уменьшение теплопроводности DLC с ростом концентрации вакансий объясняется перераспределением фононных состояний, которое также усиливает фонон-фононное рассеяние, уменьшая их длину свободного пробега. Величина

теплопроводности DLC (0,12 вакансий) при 300 К составляет ≈(7,6 ± 0,6) Вт/м·К и находится в хорошем соответствии с экспериментально измеренной величиной: (4,9 ± 0,6) Вт/м·К [3]. Тренд увеличения теплопроводности с температурой также коррелирует с экспериментально полученной зависимостью.

Таблица 1 – Теплопроводность λ идеального алмаза и DLC (0,05 – 0,12 вакансий) при T = 300 и 400 K.

Образец	алмаз_300K	0,05вак_300K	0,10вак_300K	0,12вак_300K	012вак_400K
λ, Вт/(м·К)	≈927,6 ± 40,6	≈12,6 ± 1,4	≈9,4 ± 1,3	≈7,6 ± 0,6	≈14,1± 1,4

Список литературы

1. Zhang, X.-X. Thermal conductive performance of deposited amorphous carbon materials by molecular dynamics simulation / X.-X. Zhang, L.-Q. Ai, M. Chen, D.-X. Xiong // Molecular Physics. – 2017. – doi: 10.1080/00268976.2017.1288940.

2. Matsubara, H. Evaluation of thermal conductivity and its structural dependence of a single nanodiamond using molecular dynamics simulation / H. Matsubara, G. Kikugawa, T. Bessho, T. Ohara // Diamond and Related Materials. – 2020. – doi: 10.1016/j.diamond.2019.107669.

3. Зур, И. А. Зависимость структуры, электропроводности на переменном токе и теплопроводности наноразмерных слоёв алмазоподобного углерода (DLC) от их толщины и температуры / И. А. Зур, Z. Zeng, K. Zhang, Е. Е. Шманай, P. Jiang, Ю. А. Федотова // Функциональные материалы: Синтез. Свойства. Применение (YOUNG ISC 2025) : сб. тр. Всерос. молодежной науч. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 1–4 дек. 2025 г. – СПб., 2025. – С. 225–226.

The structure and thermal conductivity of the DLC film at temperatures 300 and 400K in the NVE ensemble were calculated using the equilibrium molecular dynamics method. The introduction of vacancies (up to 12%) into the initial diamond structure has been shown to lead to a disruption of the long-range order, the excitation of additional vibrational modes, and the intensification of phonon-phonon scattering. Collectively, these effects result in a reduction of the thermal conductivity of DLC (relative to diamond).

Зур Илья Александрович, молодой ученый, Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, zur.ilya01@gmail.com.

Научный руководитель – *Федотова Юлия Александровна*, доктор физико-математических наук, профессор, Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, julia@hep.by.

537.539

Ж. У. ИСМОИЛОВ, У. О. КУТЛИЕВ, Ш. Р. САДУЛЛАЕВ, К. Р. ЯКУБОВ

РАСЧЁТ ХАРАКТЕРНЫХ ТРАЕКТОРИЙ РАССЕЯННЫХ ИОНОВ Ar^+ С ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОЛУКАНАЛОВ CdTe(001)<$\bar{1}$10>

Представлены результаты процесса рассеяния ионов Ar^+ из поверхностного полуканала, сформированного на CdTe(001)<$\bar{1}$10>, при малых углах падения с использованием метода компьютерного моделирования в приближении бинарных столкновений. Анализ траектории рассеянных ионов позволяет определить фокусирующие свойства полуканала. Увеличение угла падения и начальной энергии приводит к улучшению фокусирующих свойств полуканала.

Изучение процессов рассеяния ионов на кристаллических поверхностях представляет значительный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Механизмы взаимодействия заряженных частиц с атомными рядами и каналами на поверхности оказывают существенное влияние на такие явления, как ионная имплантация, распыление, ионная модификация в приповерхностном слое и образование дефектов. Особое внимание уделяется изучению взаимодействия ионов с локальными элементами микроструктуры – каналами и полуканалами, возникающими из кристаллографического порядка. Эти структуры определяют анизотропный характер рассеяния, перенос частиц вдоль определенных направлений и влияют на энергетическое и угловое распределение вторичных частиц [1–2].

Кристалл CdTe (теллурид кадмия) является важным полупроводниковым материалом с широким спектром применения в оптоэлектронике, солнечной энергетике и детекторах ионизирующего излучения. Его поверхность (001) имеет четко определенный атомный порядок, что делает ее удобной модельной системой для изучения направленного рассеяния. Кристаллографическое направление ⟨$\bar{1}$10⟩ на поверхности CdTe(001) образует полуканальные структуры, представляющие собой ряды атомов с чередующимися пустотами, способными направлять движение падающих частиц и создавать специфические условия для их взаимодействия с дном полуканала[3].

Особый интерес представляют условия малых углов падения и фиксированной начальной энергии иона, поскольку в этом режиме проявляются эффекты скользящего рассеяния и локализованного взаимодействия с атома-

ми дна полуканала. Для теоретического анализа таких процессов эффективно используется приближение бинарных столкновений (приближение бинарных столкновений, BCA), которое позволяет описывать последовательные взаимодействия иона с отдельными атомами кристаллической решетки и рассчитывать траектории, потери энергии и угловые распределения рассеянных частиц с приемлемыми вычислительными затратами. Метод приближения парных столкновений (BCA – Binary Collision Approximation) – это теоретический подход, применяемый для описания взаимодействия быстрых ионов с атомами твёрдого тела. Основное предположение метода заключается в том, что движение иона в веществе можно представить как последовательность независимых парных столкновений с отдельными атомами мишени. То есть вместо сложного многочастичного взаимодействия рассматривается упрощённая картина: ион сталкивается с одним атомом → изменяет направление и энергию, затем сталкивается со следующим атомом и так далее. Эта небольшая разница в значениях энергии рассеянных ионов связана с малым углом падения и начальной энергией падающих частиц. Метод приближения парных столкновений представляет собой эффективный и физически наглядный способ описания рассеяния быстрых ионов в твёрдом теле.

В данной работе представлены результаты компьютерного моделирования рассеяния ионов Ar^+ из поверхностного полуканала, образованного на поверхности CdTe(001) вдоль кристаллографического направления ⟨$\bar{1}$10⟩, при углах падения $\psi = 7^0$ и $\psi = 13^0$. Основная цель работы – изучение траектории рассеянных ионов при углах падения, первый из которых представляет собой эффект фокусировки ионов, а второй почти вдвое больше данного угла падения.

На рис. 1*а* показаны характерные траектории рассеянных ионов Ar^+ от дна полуканала, образованного на поверхности CdTe(001)<$\bar{1}$10>, при угле падения 7⁰ с начальной энергией E_0 = 1 кэВ. На рисунке видно, что параллельно падающие ионы Ar^+ рассеиваются в обе стороны от центра полуканала при рассеянии от атома, расположенного на дне полуканала. Это указывает на то, что дно полуканала отражает падающие частицы, т. е. блокирует их проникновение в кристалл. Траектории этих заблокированных ионов параллельны как для падающих, так и для отраженных частиц. Видно, что ионы проникли в кристалл на глубину -2,89 Å, а энергия рассеянных ионов находилась в диапазоне 929–934 эВ.

На рис. 2*а* показаны траектории рассеянных ионов Ar^+ из поверхностного полуканала, образованного CdTe(001)<$\bar{1}$10>, при угле падения $\psi = 7^0$ с начальной энергией E_0 = 3 кэВ. На рисунке видно, что увеличение начальной энергии приводит к блокировке ионов при большом угле рассеяния. Примечательно, что параллельность траектории сохранилась. Глубина проникновения иона находится в диапазоне -2,1–1,3 Å, а энергия рассеянного иона – в диапазоне 2768–2851 эВ. Увеличение угла падения ($\psi = 13^0$) ионов приводит к появлению траекторий, которые после блокировки отражаются от стенки полуканала и возвращаются внутрь монокристалла (рис. 2*б*). Глубина проникновения иона находилась в диапазоне от -2,5 до 0,063 Å, а энергия рассеянного иона – в диапазоне от 2484 до 2761 эВ. Можно заметить, что диапазон глубины проникновения и энергии рассеянных ионов значительно увеличивается.

Мы исследовали траектории и распределение энергии рассеянных ионов Ar^+ из поверхностного полуканала, образованного на CdTe(001)<$\bar{1}$10>, при углах падения $\psi = 7^0$ и $\psi = 13^0$ с начальными энергиями E_0 = 1 и 3кэВ, используя метод приближения бинарных столкновений. Анализ полученных траекторий рассеянных ионов показал, что фокусировка ионов наблюдается в поверхностном полуканале при угле падения $\psi = 7^0$. При $\psi = 13^0$ фокусировка бомбардирующих частиц не наблюдается. Траектории сфокусированных и несфокусированных ионов различаются. Некоторые траектории несфокусированных ионов показывают проникновение ионов в соседние поверхностные полуканалы и более глубокие слои.

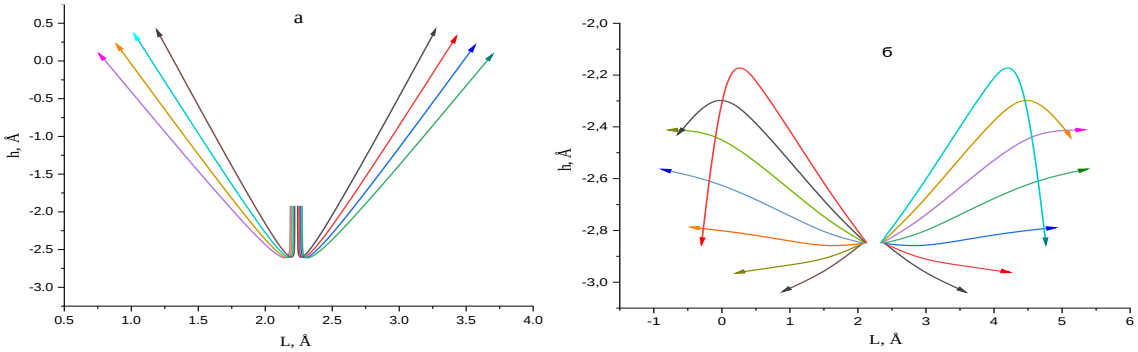


Рисунок 1 – Траектории рассеянных ионов Ar^+ от дна полуканала образованной на поверхности CdTe(001)<$\bar{1}$10> при $\psi = 7^0$ (a) и $\psi = 13^0$ (b) с начальной энергией E_0 = 1 кэВ

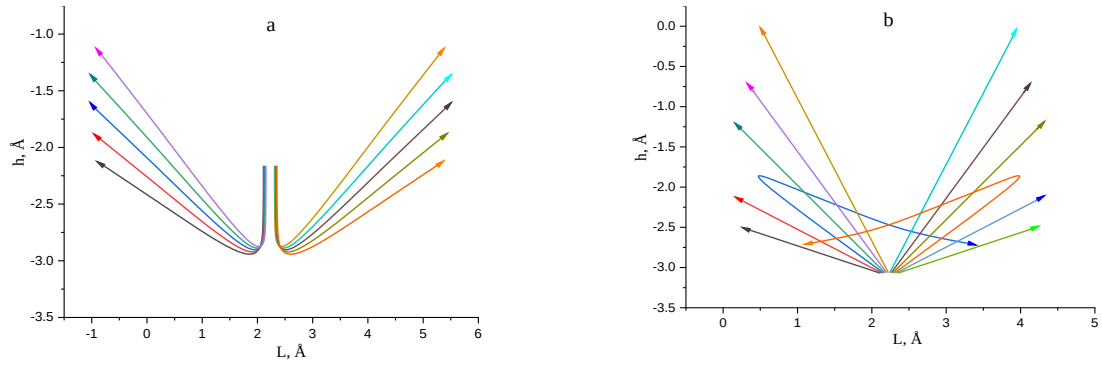


Рисунок 2 – Траектории рассеянных ионов Ar^+ от дна полуканала образованной на поверхности CdTe(001)<$\bar{1}$10> при $\psi=7^0$ (a) и $\psi=13^0$ (b) с начальной энергией E_0=3 кэВ

Список литературы

1. Rosandi, Yudi. Glancing ion incidence on Si(100): Influence of surface reconstruction on ion subsurface channeling / Yudi Rosandi, H. M. Urbassek. Yu. Rosandi // Phys. Rev. B85. – 2012. – 155430. – https://doi.org/10.1103/PhysRevB.85.155430.
2. Wethekam, S. Survival of He+ Ions during Grazing Scattering from a Ag(111) Surface / S. Wethekam, A. Mertens, H. Winter // Phys. Rev. Lett. – 2003. – № 90. – P. 037602. – https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.037602.
3. Bykov, V. Real-Space Surface Crystallography from Ion Scattering / V. Bykov, L. Houssiau, J. W. Rabalais // J. Phys. Chem. B. – 2000. – № 104. – P. 6340–6352. – https://doi.org/10.1021/jp0001891

This article presents the results of the scattering process of Ar^+ ions from the surface semichannel formed on the CdTe(001)<$\bar{1}$10> at small angles of incidence by using the computer simulation method of binary collision approximation. Analysis of the trajectory of scattered ions enables the determination of the focusing property of the semichannel. Increasing the angle of incidence and initial energy leads to improvement in the focusing properties of the semichannel. The energy distributions of scattered Ar^+ ions from the semichannel formed on the surface of CdTe(001)<$\bar{1}$10> are calculated. At low initial energies, the scattered ion energy spectrum exhibits a single peak attributed to scattered ions from the semichannel and from the surface atomic row. Increasing the initial energy leads to a separation of this peak by energy. It has been established that the scattered ion peak from the semichannel occurs in the low-energy region of the spectrum.

Исмоилов Жалоладдин Уткир угли, студент Ургенчского государственного университета, Ургенч, Республика Узбекистан, uchkunk@mail.ru.
Садуллаев Шухрат Равшанович, преподаватель Ургенчского государственного университета, Ургенч, Республика Узбекистан, uchkunk@mail.ru.
Якубов Комилжон Рузметович, доцент Ургенчского государственного университета, Ургенч, Республика Узбекистан, uchkunk@mail.ru.
Научный руководитель – *Кутлиев Учкун Отобоевич*, доктор физико-математических наук, профессор Ургенчского государственного университета, Ургенч, Республика Узбекистан, uchkunk@mail.ru.

УДК 537.87

Л. А. КАЛОША

РЕГУЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ МГЦ-ДИАПАЗОНА НА РЕШЁТКЕ ИЗ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Исследовались диэлектрические свойства полимерного композитного материала на основе поливинилового спирта. Представлены графики зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь исследуемого материала от частоты. Рассмотрена периодическая решетка, которая в мегагерцовом диапазоне обладает достаточной чувствительностью к варьированию диэлектрической проницаемости ее элементов. Определены диэлектрические характеристики материала, которые обеспечивают управление коэффициентами прохождения и отражения электромагнитного поля в полосе частот. По результатам численного исследования рассеяния электромагнитного поля на решетке с элементами с изменяемой диэлектрической проницаемостью построена зависимость диэлектрической проницаемости от частоты. Приведены результаты вычислительного эксперимента по влиянию расчетных диэлектрических характеристик материала элементов решетки на коэффициенты прохождения и отражения электромагнитного поля мегагерцового диапазона.

Создание современных электродинамических систем для радио и микроволнового диапазонов основано на использовании технологий с применением материалов с контролируемыми и настраиваемыми электромагнитными характеристиками [1]. Данные материалы могут быть в виде однородных среды и композитных структур. Современные подходы к управлению электромагнитными параметрами сред базируются на широком спектре

физических механизмов от структурной деформации до внешних полевых воздействий. Комбинирование этих принципов открывает путь к созданию материалов с принципиально новыми, ранее недостижимыми характеристиками. Однако, электроактивные полимеры представляют наибольший интерес для практических приложений в различных сферах [2].

Актуально использование композитных материалов в условиях воздействия электромагнитных полей мегагерцового и микроволнового диапазонов. В связи с этим перспективным является исследование поведения материалов в микроволновом диапазоне, в том числе и при их облучении высокочастотными полями. Особый теоретический и практический интерес представляет анализ резонансных явлений при взаимодействии излучения мегагерцового диапазона с внутренней структурой полимерных композитных материалов, что может использоваться для создания энергоэффективных методов управления их электромагнитными характеристиками [3]. Одним из характерных свойств полимеров является дисперсия диэлектрической проницаемости, которая определяется строением полимера и зависит от частоты приложенного поля. При этом релаксационные свойства полимеров характеризуются спектром времен релаксации, что обусловлено различием молекулярных взаимодействий в разных точках объема полимера, которое усиливается возможностью внутреннего вращения макромолекул [4]. Следует ожидать, что при внесении в полимер наполнителей, появится новое время релаксации, и как следствие дисперсия диэлектрической проницаемости на новых частотах, что позволит реализовать управление структурой материала и его электромагнитными свойствами в рассматриваемом диапазоне частот.

Исследование дисперсии диэлектрической проницаемости материала проводилось для нескольких образцов на основе поливинилового спирта с добавлением примесей (порошок талька) различной концентрации. Проведенные измерения показали, что исследуемые образцы обладают дисперсией диэлектрической проницаемости в диапазоне от 2 до 120 (рисунок 1).

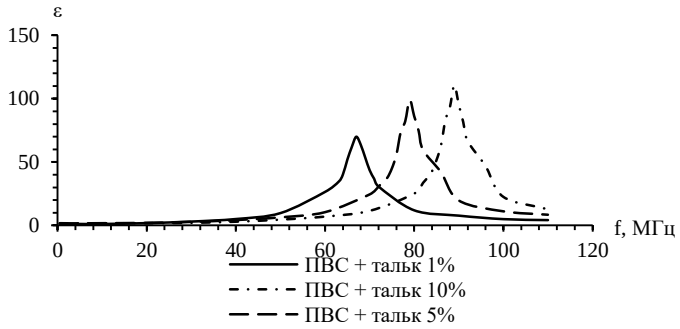


Рисунок 1 – Зависимость диэлектрической проницаемости полимерного материала от частоты поля

Максимум диэлектрической проницаемости для каждого образца наблюдался на своей частоте и при увеличении концентрации наполнителя сдвигался в более высокочастотную область. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь представлена на рисунке 2.

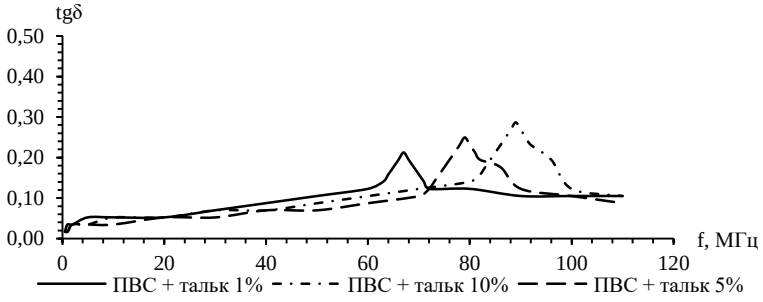


Рисунок 2 – Зависимость тангенса угла потерь полимерного материала от частоты поля

Дисперсия диэлектрической проницаемости полимерного материала на основе поливинилового спирта и порошка талька от частоты и амплитуды электрического поля мегагерцового диапазона может использоваться для управления электромагнитными свойствами материала.

Вычислительный эксперимент проводился с использованием программного продукта CST MICROWAVE STUDIO, который позволяет выполнять численное моделирование электродинамических устройств в высокочастотном диапазоне. Исследовалась периодическая решетка, состоящая из элементов в виде брусьев, состоящих из металлической подложки со слоем диэлектрического материала, расположенных на определенном расстоянии друг от друга. Расстояние между брусьями и размер элементом выбирались исходя из критерия наибольшей чувствительности решетки к диэлектрической проницаемости в диапазоне 2–120 для диапазона частот от 10 до 300 МГц.

Разработанная математическая модель позволяет исследовать возможность управления коффициентом отражения в мегегерцовом диапазоне. Рассматривался случай нормального падения плоской электромагнитной волны на решетку. При поведении исследования изменились только диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь полимерного материала при сохранении постоянными конструктивных параметров решетки. Моделирование рассеяния электромагнитной волны на решетке из металлополимерных элементов изменение коэффициентов прохождения и отражения рассеянного поля при изменении диэлектрической проницаемости полимерного материала. Результаты показали, что для каждого используемого значения диэлектрической проницаемости коэффициент прохождения имел хотя бы один минимум ниже -20 дБ в диапазоне от 80 до 220 МГц. Коэффициент отражения варьировался в пределах -0,05 – -20 дБ. На основании полученных данных коэффициента прохождения был построен график зависимости диэлектрической проницаемости от частоты (рис. 3). С учетом того, что до 80 МГц величина дилектрической проницаемости не влияет на коэффициенты прохождения и отражения для данной структуры, значение принимается равным 3.

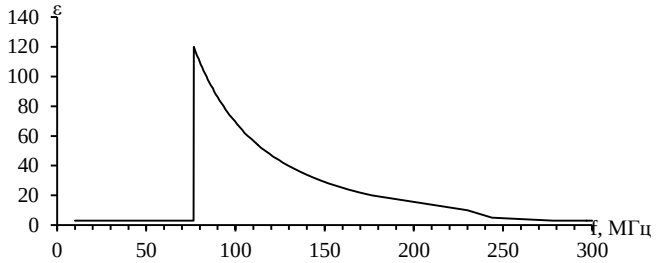


Рисунок 3 – Расчетная зависимость диэлектрической проницаемости материала от частоты *f*

Полученная расчетная диэлектрическая проницаемость была использована в качестве дисперсионной характеристики полимерного материала элементов структуры для исследования рассеяния на ней плоской электромагнитной волны мегагерцового диапазона.

Рассматривалось влияние полученной расчетной диэлектрической проницаемости полимерного материала элементов структуры на характеристики рассеяния электромагнитного поля. При этом, при сохранении данной функциональной зависимости диэлектрической проницаемости, также исследовалось влияние варьирования значения тангенса угла диэлектрических потерь полимерного материала от 0,00003 до 0,1.

Коэффициент прохождения во всем диапазоне 80–220 МГц имеет значения порядка -0,0014 дБ (рис. 4). Частотная зависимость коэффициента отражения *R* электромагнитного поля для структуры из композитного материала с диэлектрической проницаемостью, являющейся функцией от частоты *f*, для различных значений тангенса угла диэлектрических потерь представлена на рисунке 5.

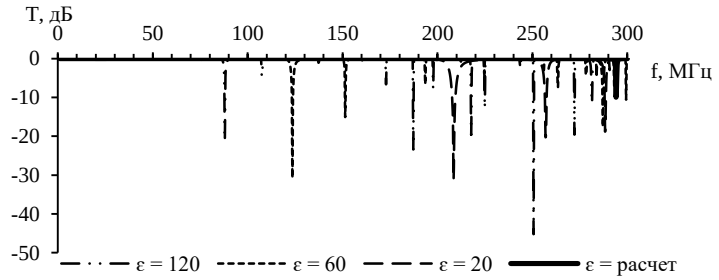


Рисунок 4 – График зависимости коэффициента прохождения *T* электромагнитного поля от частоты *f*, для различных значений диэлектрической проницаемости

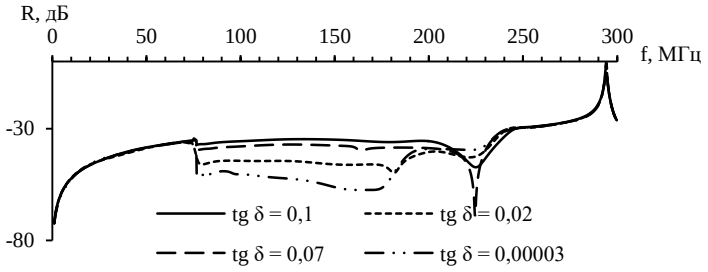


Рисунок 5 – График зависимости коэффициента отражения *R* электромагнитного поля от частоты *f*, для расчётной диэлектрической проницаемости и различных значений тангенса угла диэлектрических потерь материала

Результаты показали, что для исследуемой периодической структуры частотная зависимость диэлектрической проницаемости может использоваться для управления коэффициентами прохождения и отражения в широком диапазоне частот.

Рассмотренная модель периодической решетки демонстрирует возможность применения полимерных композитных материалов, обладающих дисперсией диэлектрической проницаемости в высокочастотном диапазоне, для управления рассеянием электромагнитного поля мегагерцового диапазона без применения конструктивных изменений и воздействия внешних факторов.

Список литературы

1. Fan, K. Dynamic electromagnetic metamaterials / K. Fan, W. J. Padilla // Materials Today. – 2014. – Vol. 18, № 1. – P. 39–50.

2. Narvaez, D. A Review of Electroactive Polymers in Sensing and Actuator Applications / D. Narvaez, B. Newell // Actuators. – 2025. – № 14. – 258 p. – https://doi.org/10.3390/act14060258.

3. Bezsudnov, I. V. Dielectric elastomer actuators: materials and design / I. V. Bezsudnov, A. G. Khmelnitskai, A. A. Kalinina, S. A. Ponomarenko, // Russ. Chem. Rev. – 2023. – № 92 (2). – DOI: https://doi.org/10.57634/RCR5070.

4. Энциклопедия полимеров: в 3 т. / редкол.: В. А. Каргин (гл. ред.) [и др.]. – М. : Советская энциклопедия, 1972. – Т. 1 (А–К). – С. 740–746.

The dielectric properties of a polymer composite material based on polyvinyl alcohol were investigated. The graphs of the dependencies of the dielectric permittivity and the tangent of the dielectric loss angle of the studied material on the frequency are presented. A periodic lattice is considered which, in the megahertz range, has sufficient sensitivity to variations in the permittivity of its elements. The dielectric characteristics of the material are determined, which ensure control of the transmission and reflection coefficients of the electromagnetic field in the frequency range. Based on the results of a numerical study of the scattering of an electromagnetic field on a lattice with elements with variable permittivity, the dependence of permittivity on frequency was constructed. The results of a computational experiment on the influence of the calculated dielectric characteristics of the lattice element material on the transmission and reflection coefficients of the electromagnetic field in the megahertz range are presented.

Калоша Любовь Александровна, аспирант кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, ya-2009@tut.by.

Научный руководитель – *Гайда Леонид Станиславович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, gls@grsu.by.

УДК 543.275.1:53.088

В. Д. КАРПИЦКИЙ, А. В. ГРУШЕВСКАЯ

ОЦЕНИВАНИЕ ВЛАЖНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ

Разработаны этапы оценивания метрологических характеристик стандартных образцов влажности древесины для совершенствования системы обеспечения единства измерений и повышения качества и точности результатов изменений.

Влажность материала (вещества) – это отношение массы содержащейся в ней воды к массе абсолютно сухого материала (вещества), выраженное в процентах или долях [1–4].

Влажность древесины является одним из основных параметров, определяющих её физико-механические свойства, долговечность и область применения. От содержания влаги зависят прочность, плотность, усушка и разбухание древесины, а также устойчивость к биологическому разрушению и стабильность геометрических размеров в процессе эксплуатации.

Надёжный контроль влажности необходим на всех стадиях технологического цикла: при заготовке и хранении лесоматериалов, в процессе сушки пиломатериалов, при производстве мебели и строительных конструкций, а также при приёмочном контроле готовых изделий. Ошибки в оценке влажности приводят к деформациям конструкций, снижению срока службы и нарушению требований нормативной документации.

Измерение влажности древесины выполняют различными методами – от классического высушивания образцов до применения переносных электрических влагомеров. Для обеспечения сопоставимости результатов и поддержания единства измерений необходима эталонная база, в качестве которой используют стандартные образцы влажности древесины с аттестованными значениями влажности.

Применение стандартных образцов [5–16] влажности древесины позволяет проводить градуировку и поверку влагомеров, оценивать корректность методик измерений и обеспечивать прослеживаемость результатов к эталонному методу. Таким образом, исследование методов оценки влажности древесины и метрологических

характеристик стандартных образцов имеет существенное практическое значение для лесной, деревообрабатывающей и строительной отраслей.

В настоящей работе разработаны этапы оценивания метрологических характеристик стандартных образцов влажности древесины для совершенствования системы обеспечения единства измерений и повышения качества и точности результатов изменений.

Существует несколько основных групп методов измерения влажности древесины. К прямым (эталонным) относят метод высушивания до постоянной массы, при котором влажность определяется по разности масс образца до и после высушивания.

К косвенным методам относятся электрические методы, основанные на зависимости электрического сопротивления или диэлектрической проницаемости древесины от её влажности. В контактных (игольчатых) влагомерах измеряют сопротивление между электродами, введёнными в древесину. В бесконтактных ёмкостных влагомерах регистрируют изменение ёмкости измерительного конденсатора при внесении в его поле образца древесины.

Кроме традиционных методов, применяются радиометрические, микроволновые и инфракрасные методы, позволяющие осуществлять бесконтактный контроль влажности древесины в потоке. Такие системы используют в автоматизированных линиях сушки и сортировки пиломатериалов, где требуется непрерывный контроль параметров процесса.

Независимо от выбранного метода измерений, результаты должны быть сопоставимы с эталонным методом высушивания, что обеспечивается корректной градуировкой средств измерений с использованием стандартных образцов влажности древесины.

В большинстве технологических процессов оперативный контроль выполняют электрическими влагомерами, а результаты периодически сверяют с данными, полученными по методу высушивания.

Стандартные образцы [5–16] влажности древесины представляют собой специально подготовленные образцы древесины с аттестованными значениями влажности, подтверждёнными результатами метрологической аттестации. Они служат эталонной базой для градуировки и поверки средств измерения влажности, а также для оценки правильности методик выполнения измерений.

Основное назначение стандартных образцов влажности древесины заключается в обеспечении единства и сопоставимости измерений влажности в различных лабораториях и на производственных участках.

Метрологические характеристики стандартных образцов влажности древесины определяют область их применения и степень доверия к результатам измерений, полученным с их использованием. Оценивание этих характеристик проводят в процессе аттестации стандартных образцов и при последующем контроле их пригодности.

К основным метрологическим характеристикам стандартных образцов влажности древесины относят: аттестованное значение влажности, погрешность (или расширенную неопределённость) аттестованного значения, показатели однородности и стабильности, а также диапазон и условия применения образцов. Аттестованное значение влажности устанавливают по результатам измерений, выполненных эталонным методом высушивания.

В соответствии с ГОСТ 17231–78 влажность древесины (в процентах) рассчитывают по нескольким формулам.

В частности, влажность W_1 в процентах для круглых лесоматериалов, если образцы взяты в виде целых срезов или в виде их половин, а также для колотых лесоматериалов вычисляют по формуле:

$$W_1 = \frac{m-m_0}{m_0} \cdot 100, \quad (1)$$

где m – масса пробы до высушивания, г; m_0 – масса пробы после высушивания, г.

Обычно результат измерений является только аппроксимацией или оценкой значения измеряемой величины и, таким образом, он будет полным, только когда оцененное значение измеряемой величины сопровождается значением погрешности или неопределенности. В настоящей работе в соответствии с действующими международными подходами к оцениванию значения измеряемой величины и неизбежно сопровождающей ее неопределенности, разработана методика, состоящая из следующих восьми этапов:

1. Описание измерения и составление его модели;
2. Оценивание значений и стандартных неопределенностей входных величин;
3. Анализ корреляций;
4. Составление бюджета неопределенности;
5. Расчет оценки выходной величины;
6. Расчет стандартной неопределенности выходной величины;
7. Расчет расширенной неопределенности;
8. Представление конечного результата измерений.

Список литературы

1. Берлинер, М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.
2. Петров, А. Н. Контроль влажности материалов / А. Н. Петров. – СПб. : Химиздат, 2015. – 200 с.
3. Иванов, А. В. Методы измерения влажности материалов / А. В. Иванов. – М. : Наука, 2010. – 256 с.
4. Григорьев, Л. М. Контроль влажности строительных материалов / Л. М. Григорьев. – Киев : Будівельник, 2020. – 134 с.
5. ГОСТ 8.315–2019. ГСИ. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения.
6. ГОСТ 8.316–78. ГСИ. Стандартные образцы. Требования к аттестации.
7. ГОСТ 8.009–84. ГСИ. Методики выполнения измерений. Основные положения.
8. РД 50-168–79. Методические указания по применению стандартных образцов.
9. РД 50-365–82. Требования к инструкции по применению стандартных образцов.
10. МИ 1217–86. Методика оценки погрешностей средств измерений с учётом внешних воздействующих факторов.
11. МИ 1318–86. Общие требования к образцовым средствам измерений.
12. ГОСТ 8.326–89. ГСИ. Порядок узаконения нестандартизованных средств измерений.
13. СТ СЭВ 4566–84. Средства измерений. Термины и определения.
14. Методические рекомендации по применению стандартных образцов. – М. : Стандартизация, 1988.
15. Проненко, В. И. Проблемы стандартизации и метрологического обеспечения анализа веществ / В. И. Проненко. – М. : Наука. – 1982.
16. Семенко Н. Г. Стандартныее образцы в системе обеспечения единства измерений / Н. Г. Семенко, В. И. Панева, В. М. Лахов ; под. ред. Н. Г. Семенко. – М. : Изд-во стандартов. – 1990.

Stages of evaluation of the metrological characteristics of standard wood moisture samples have been developed to improve the system for ensuring the uniformity of measurements and to increase the quality and accuracy of measurement results.

Карпицкий Вадим Данилович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

Грушевская Анастасия Викторовна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Василюк Геннадий Тимофеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, vasilyuk@grsu.by.

УДК 004.94

И. О. КИРКО

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ НА ЯЗЫКЕ C#

Электродинамика является фундаментальным разделом физики, однако многие её понятия остаются абстрактными при традиционном изучении. Компьютерное моделирование позволяет визуализировать эти объекты, делая их наглядными и доступными для экспериментов. В данной работе представлены две модели, реализованные на языке C#, которые демонстрируют возможности такого подхода в учебном процессе.

Программная реализация моделей электродинамики. Для разработки был выбран язык C# в силу его высокой производительности, строгой типизации, удобства создания графического интерфейса (Windows Forms) и наличия мощных средств отладки. Эти качества позволяют быстро создавать интерактивные приложения, в которых пользователь может изменять параметры системы и наблюдать результат в реальном времени [1–3].

Модель электрического поля системы точечных зарядов.

Программа рассчитывает потенциал и вектор напряженности электрического поля, создаваемого тремя точечными зарядами, расположенными в плоскости. Потенциал в каждой точке вычисляется по формуле:

$$\varphi(x, y) = \sum_{s=1}^{3} \frac{q_s}{r_s}$$

Компоненты напряженности электрического поля определялись по формулам

$$E_x = \sum_{s=1}^{3} \frac{q_s (x - x_s)}{r_s^2},$$

$$E_y = \sum_{s=1}^{3} \frac{q_s (y - y_s)}{r_s^2}.$$

Значения потенциала кодируются цветом (от синего для минимума до красного для максимума), а векторы напряженности изображаются в виде стрелок, длина и направление которых соответствуют величине и направлению поля. Такая визуализация позволяет наглядно увидеть области с высоким и низким потенциалом, а также структуру поля вблизи зарядов разных знаков. Результаты моделирования представлены на рисунке 1.

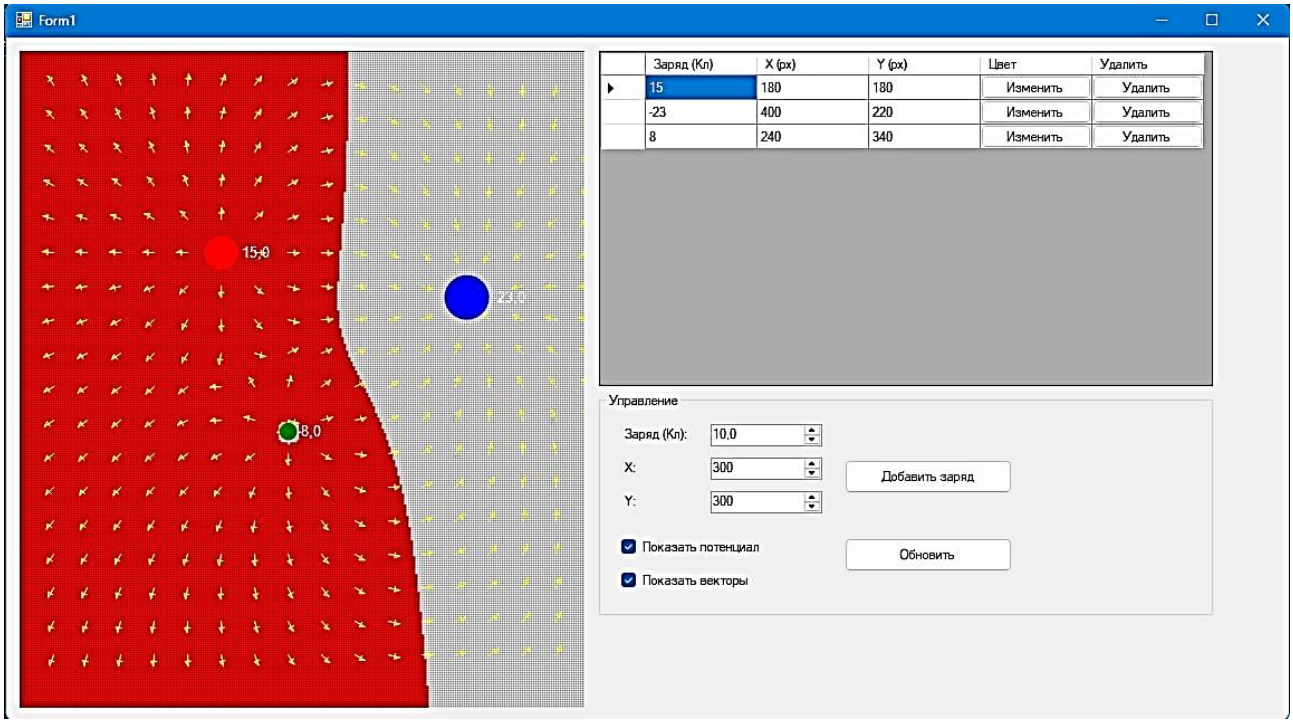


Рисунок 1 – Визуализация потенциала электрического поля системы зарядов

Модель магнитного поля системы параллельных проводников с током. Данная программа предназначена для построения силовых линий магнитного поля, создаваемого несколькими бесконечными прямолинейными проводниками с постоянным током, расположенными параллельно друг другу (сечение плоскостью XY). Магнитная индукция от каждого проводника определяется законом Био – Савара – Лапласа:

$$\vec{B}_k = \frac{\mu_0 I_k}{2\pi r_k}\vec{e}_{\varphi},$$

что в декартовых координатах дает:

$$B_{x,k} = -\frac{\mu_0 I_k}{2\pi r_k}\cdot\frac{y-y_k}{r_k^2},$$

$$B_{y,k} = -\frac{\mu_0 I_k}{2\pi r_k}\cdot\frac{x-x_k}{r_k^2}$$

Суммарное поле находится простым сложением вкладов всех проводников. Силовые линии строятся численным интегрированием дифференциального уравнения силовой линии с использованием метода Эйлера с фиксированным шагом. Пользователь задаёт координаты и силу тока для каждого проводника, начальную точку для построения линии, шаг интегрирования и количество шагов. Результат отображается на графике в виде ломаной линии, а проводники отмечаются кружками. Листинг 1 демонстрирует ключевые методы расчёта компонент поля и его пошагового построения.

```
        // Расчёт компонент магнитной индукции от всех проводников
        private double CalculateBx(double x, double y)
        {
    double Bx = 0;
            foreach (var c in conductors)
            {
       double dx = x - c.X;
                double dy = y - c.Y;
```

```
            double r2 = dx * dx + dy * dy;
            if (r2 < 1e-6) continue;
            Bx += (dy / r2) * c.I;
        }
        return Bx * Mu0_div_2Pi;
    }
private double CalculateBy(double x, double y)
    {
  double By = 0;
        foreach (var c in conductors)
        {
    double dx = x - c.X;
            double dy = y - c.Y;
            double r2 = dx * dx + dy * dy;
            if (r2 < 1e-6) continue;
            By += (-dx / r2) * c.I;
        }
  return By * Mu0_div_2Pi;
    }
// Построение силовой линии методом Эйлера
     private void BuildFieldLine(double startX, double startY, double ds, int steps)
     {
  double x = startX, y = startY;
        for (int i = 0; i < steps; i++)
        {
    double Bx = CalculateBx(x, y);
            double By = CalculateBy(x, y);
            double B_abs = Math.Sqrt(Bx * Bx + By * By);
            if (B_abs < 1e-12) break;

    double nextX = x + (Bx / B_abs) * ds;
            double nextY = y + (By / B_abs) * ds;

    x = nextX; y = nextY;
            // Добавление точки на график
        }}
```

На рисунке 2 показан пример построенных силовых линий для трёх проводников с различными токами.

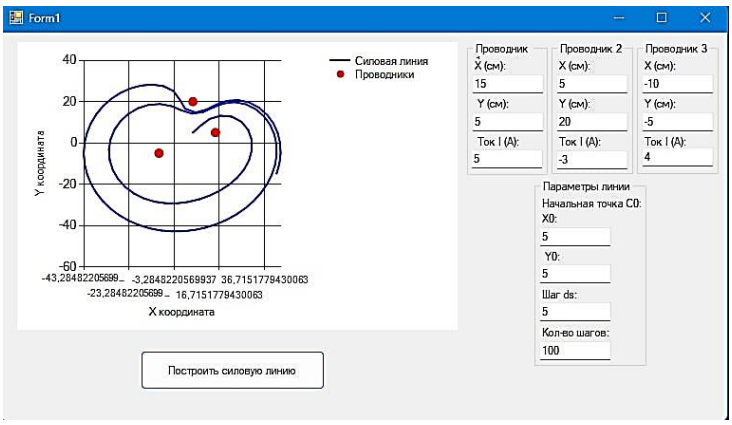


Рисунок 2 – Модель построения силовых линий поля проводников с током

Заключение. Разработанные на языке C# модели электрического и магнитного полей успешно визуализируют сложные электродинамические явления, делая их доступными для изучения. Применение методов дискретизации, численного интегрирования и объектно-ориентированного программирования в сочетании с графическим интерфейсом Windows Forms позволяет создавать гибкие и наглядные учебные пособия. Такие модели могут быть использованы как на лекциях, так и на лабораторных занятиях, способствуя формированию у студентов глубокого понимания фундаментальных законов электродинамики. Представленные модели обладают интерактивностью: пользователь может изменять величины зарядов, их положение, токи в проводниках и сразу видеть, как трансформируется картина поля. Это особенно ценно в обучении, так как позволяет связывать математические формулы с реальным поведением поля.

Список литературы

1. Майер, Р. В. Компьютерное моделирование : учеб.-метод. пособие для студентов пед. вузов [Электронное учебное издание на компактдиске] / Р. В. Майер. – Глазов : Глазов. гос. пед. ин-т, 2015. – 24,3 Мб.
2. Гудевица, М. П. Методы численного решения задач электродинамики / М. П. Гудевица. – М. : Наука, 2019. – 284 с.
3. Характаш, Д. С. Основы моделирования физических процессов в среде MATLAB / Д. С. Характаш. – СПб. : БХВ-Петербург, 2018. – 212 с.

Electrodynamics is a fundamental branch of physics, yet many of its concepts remain abstract when traditionally taught. Computer modeling allows these objects to be visualized, making them tangible and accessible for experimentation. This paper presents two models, implemented in C#, that demonstrate the potential of this approach in the educational process.

Кирко Илья Олегович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, Kirko_IO_22@student.grsu.by.

Научный руководитель – *Крупская Татьяна Константиновна*, магистр педагогических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, krupskay_tk@grsu.by

УДК 538.9:004.94

Д. П. КОЗИЧ, Е. В. СИРОЦКАЯ, А. С. САЛИМБАЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МОДУЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ РЕГЕНЕРИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

Представлены результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) модульных элементов городской инфраструктуры, изготовленных из импортозамещающих композиционных материалов на основе регенерированных полиолефинов. Методом конечных элементов (МКЭ) в среде SolidWorks Simulation проведен анализ прочностных характеристик газонной решетки и унифицированных элементов малых архитектурных форм (МАФ). Верификация модели выполнена на основе экспериментальных данных деформационно-прочностных испытаний композита «полипропилен регенерированный – ультрадисперсный алмаз» (ППр + УДА). Установлено, что введение 0,1 мас. % УДА повышает параметры прочностных характеристик в 1,5 раза по сравнению с ненаполненной матрицей. Результаты виртуальных испытаний подтвердили работоспособность разработанных конструкций при эксплуатационных нагрузках и позволили оптимизировать их геометрические параметры на этапе проектирования.

Ключевые слова: численное моделирование, метод конечных элементов, регенерированные термопласты, полимерные композиты, напряженно-деформированное состояние.

Введение. Переход к принципам циркулярной экономики и импортозамещения в сфере городского благоустройства требует разработки новых материалов и подходов к проектированию изделий [6, 7]. Использование регенерированных термопластов в качестве матрицы для композиционных материалов является экологически и экономически обоснованным решением. Однако, деградация свойств полимеров в процессах переработки требует целенаправленной модификации их структуры, например, путем введения наноразмерных наполнителей, таких как ультрадисперсные алмазы (УДА) [1–4].

Ключевой проблемой при создании изделий ответственного назначения является прогнозирование их поведения в условиях эксплуатации. Традиционный подход, основанный на натурных испытаниях, является затратным и продолжительным. В современном материаловедении для решения этой задачи широко применяются методы компьютерного инжиниринга (CAE). Численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) позволяет с высокой точностью оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкций с учетом анизотропии свойств, реологии материала и геометрической нелинейности, что дает возможность оптимизировать геометрию изделия и минимизировать затраты на этапе опытно-конструкторских работ [5–7].

Цель настоящей работы заключалась в разработке цифровой модели и анализе НДС модульных элементов (газонной решетки и элементов МАФ) из композитов на основе регенерированных полиолефинов с использованием экспериментальных данных о физико-механических свойствах материала.

Материалы и методы исследований.

В качестве материала для моделирования использовали композиционный состав на основе регенерированного полипропилена (ППр) производства ОАО «Белвторполимер» (Гродно), модифицированного 0,1 мас. % ультрадисперсного алмаза (УДА) производства НП ЗАО «Синта» (Минск). Выбор данного состава обусловлен результатами предварительных экспериментальных исследований, показавших оптимальное сочетание прочностных и технологических характеристик.

Для задания свойств материала в модели и её последующей верификации были проведены механические испытания. Показатель текучести расплава (ПТР) определяли на экструзионном пластометре ПТР-ЛАБ-02 (нагрузка 21,19 Н, температура 230 °С). Деформационно-прочностные характеристики (предел прочности при растяжении и изгибе, модуль упругости) исследовали на универсальной испытательной машине ИР5047-50 при скорости деформирования 100 мм/мин. и температуре (23±2) °С.

Твердотельное параметрическое моделирование модульных конструкций (газонной решетки и унифицированного элемента МАФ) выполняли в среде SolidWorks 2022. Анализ НДС проводили в модуле SolidWorks Simulation, реализующем метод конечных элементов (МКЭ). На конечно-элементную сетку накладывались граничные условия, имитирующие эксплуатационные нагрузки. Для газонной решетки моделировали распределенную нагрузку 1,2 МПа, что соответствует весу грузового автомобиля с запасом. Для элемента МАФ прикладывали статическую нагрузку, эквивалентную массе нескольких человек. В качестве критерия прочности использовали предел текучести материала, полученный экспериментально. Также была проведена симуляция технологичности процесса литья под давлением в модуле SolidWorks Plastics для оценки характера заполнения пресс-формы и выявления возможных дефектов [3; 8].

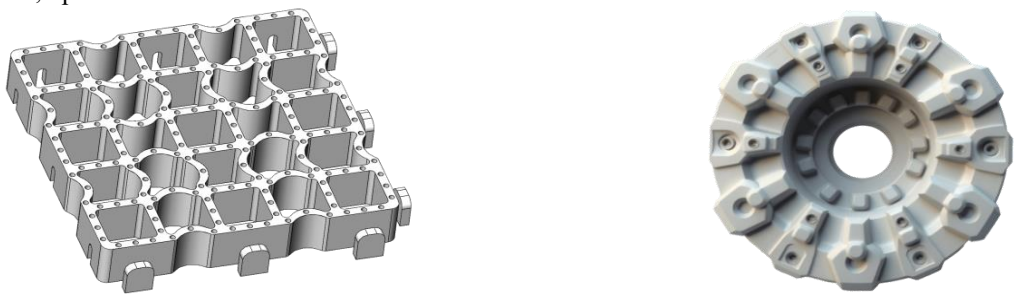
Результаты и их обсуждение.

Разработанная в ходе исследований параметрическая модульная система, реализованная по принципу «замкового» соединения, обеспечивает унификацию конструктивных элементов для создания газонных решеток (рисунок 1*а*) и малых архитектурных форм (МАФ) (рисунок 1*б*), гарантируя оптимизированное распределение напряжений в материале, высокую несущую способность при статических и динамических нагрузках, а также технологичность монтажа и ремонтопригодность элементов городского благоустройства.

При исследовании характеристик разработанных модельных составов композиционных материалов для предложенных модульных конструкций изделий экспериментально установлено, что введение 0,1 мас. % УДА в матрицу регенерированного полипропилена приводит к увеличению вязкости расплава: ПТР снижается с 7,3 до 6,7 г/10 мин., что, однако, остается в пределах рекомендуемых значений для литья под давлением. Наиболее значимый эффект модифицирования проявился в повышении прочностных характеристик:

1) Предел прочности при растяжении составил 32,1 МПа, что на 28 % выше, чем у исходного ППр.

2) Предел прочности при статическом изгибе достиг 36,3 МПа, превышая показатель ненаполненной матрицы в 1,5 раза.



а *б*

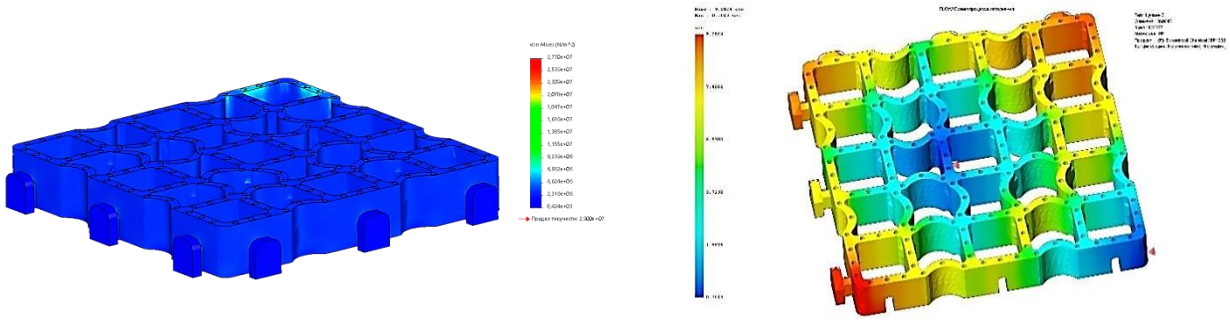
Рисунок 1 – Твердотельные модели разработанных конструкций:
а) модуль экопарковки; б) базовый элемент малой архитектурной формы (МАФ)

Полученные значения предела текучести ($\sigma_т \approx 29$ МПа) и модуля упругости были использованы в качестве входных параметров для МКЭ-модели.

В результате конечно-элементного анализа НДС модульной газонной решетки (рисунок 2*а*) установлено, что под действием расчетной нагрузки (1,2 МПа) максимальные эквивалентные напряжения (по фон Мизесу) локализуются в узлах сопряжения ребер жесткости и составляют 16,5 МПа. Это значение не превышает предела текучести материала (29 МПа), что подтверждает отсутствие пластических деформаций. Максимальный прогиб в центральной части ячейки не превысил 0,7 мм, что свидетельствует о высокой жесткости конструкции.

Локализация максимальных эквивалентных напряжений в узлах сопряжения ребер жесткости обусловлена действием геометрического фактора концентрации напряжений, характерного для рамных конструкций, и подтверждает необходимость учета данного параметра при топологической оптимизации тонкостенных отливок.

Симуляция процесса литья под давлением в SolidWorks Plastics (рисунок 2*б*) показала, что разработанная геометрия изделий обеспечивает равномерное заполнение формы. Однако для предотвращения образования воздушных ловушек и линий спая в тонкостенных элементах решетки рекомендовано оптимизировать расположение точек впрыска и скорректировать температурный режим формы (поддержание температуры в пределах 40–50 °С).



а *б*

Рисунок 2 – Результаты компьютерного моделирования процесса изготовления и эксплуатации газонной решётки: а) распределение эквивалентных напряжений (по фон Мизесу) в конструкции под эксплуатационной нагрузкой; б) кинетика заполнения литьевой формы расплавом композита (распределение времени заполнения)

Для унифицированного элемента МАФ моделирование также подтвердило работоспособность конструкции. Распределение напряжений равномерно по несущим поверхностям, зоны концентрации напряжений отсутствуют. Максимальные напряжения в местах крепления модулей составили 11,2 МПа, что значительно ниже допустимых значений. Реализованный подход к проектированию МАФ базируется на принципе модульной унификации, предполагающем использование ограниченной номенклатуры взаимозаменяемых элементов, изготавливаемых из единого композиционного материала. Данный принцип обеспечивает не только технологичность и экономическую эффективность производства, но и высокую ремонтопригодность, а также стилистическое единство готовых изделий в городской среде.

Таким образом, в практическом аспекте разработанный подход обеспечивает решение прикладной задачи импортозамещения при производстве элементов городской инфраструктуры.

Заключение. В результате проведенных исследований разработана и верифицирована конечно-элементная модель для прогнозирования НДС изделий из перспективного импортозамещающего композита на основе регенерированного ППр, модифицированного УДА. Экспериментально доказано, что введение 0,1 мас. % нанонаполнителя позволяет повысить прочность при изгибе вторичного полипропилена в 1,5 раза. Компьютерное моделирование подтвердило, что разработанные конструкции модульных газонных решеток и элементов МАФ обладают необходимым запасом прочности (коэффициент запаса > 1,75) и жесткости при статических нагрузках. Применение методологии цифрового инжиниринга позволило оптимизировать конструкцию на этапе проектирования, что существенно сокращает время и стоимость опытно-конструкторских работ при внедрении новых материалов в городскую инфраструктуру[4].

Список литературы

1. Скаскевич, А. А. Структура и технология малонаполненных машиностроительных материалов на основе конструкционных термопластов, модифицированных углеродными нанокластерами : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.17.06 / Скаскевич Александр Александрович ; Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2000. – 21 с.

2. Долматов, В. Ю. Детонационные наноалмазы. Получение, свойства, применение / В. Ю. Долматов. – СПб. : Профессионал, 2011. – 536 с.

3. Витязь, П. А. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П. А. Витязь, В. И. Жорник, А. Ф. Ильющенко, В. Т. Сенють ; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 381 с.

4. Наноматериалы и нанотехнологии для машиностроения : учеб. пособие / В. А. Струк [и др.] ; под ред. В. А. Струка, В. А. Гольдаде. – Минск : РИВШ, 2021. – 512 с.

5. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – СПб. : Питер, 2004. – 560 с.

6. Ерохин, В. В. CAD/CAM/CAE-технологии в моделировании технических объектов / В. В. Ерохин, Е. В. Елисеева // Автоматизация. Современные технологии. – 2014. – № 11. – С. 40–44.

7. Котельников, А. А. CAD/CAM/CAE системы : учеб. пособие / А. А. Котельников. – Курск : Юго-запад. гос. ун-т, 2014. – 336 с.

8. Салимбаев, А. С. Разработка импортозамещающих составов композиционных материалов на основе регенерированных термопластов для элементов малых архитектурных форм и экопарковок / А. С. Салимбаев, Д. П. Козич, Е. В. Сироцкая ; науч. рук. А. С. Антонов // Технологические инновации и научные открытия. В 2 ч. Ч. 1 : сб. науч. ст. по материалам XIX Междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 23 дек. 2025 г. – Уфа : НИЦ Вестник науки, 2025. – С. 41–49.

[4]Исследования выполнялись при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках выполнения проекта № ГС 01-26 «Композиционные материалы для изготовления экопарковок и элементов малых архитектурных форм с использованием замкнутого цикла переработки полимерных отходов в несущие конструкционные элементы».

Using the finite element method (FEM) implemented in SolidWorks Simulation, this study investigates the stress-strain state (SSS) of modular structures intended for urban environments. The objects of study are lawn grids and small architectural forms (SAF) fabricated from an import-substituting composite material based on reclaimed polypropylene (PP) modified with ultradispersed diamond (UDD) particles. The numerical model was verified by comparing its results with experimental mechanical test data of the PP + 0.1 wt. % UDD composite, which demonstrated a 1.5-fold increase in strength relative to the unreinforced matrix. The simulation results confirmed the structural integrity of the designed elements under service loads and enabled geometric optimization prior to physical prototyping.

Козич Дарья Павловна, студент 3 курса инженерного факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kozich_dp_23@student.grsu.by.

Сироцкая Екатерина Вадимовна, студент 3 курса инженерного факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, sirockay_ev_23@student.grsu.by.

Салимбаев Арсений Степанович, студент 4 курса инженерного факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, salimbaev_as_22@student.grsu.by.

Научный руководитель – *Антонов Александр Сергеевич*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и ресурсосберегающих технологий Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, antonov_as@grsu.by.

УДК 004.94

Н. С. КОШЕЛЕВ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ТЕЛ

Рассмотрены основные аспекты использования компьютерных моделей для объяснения сущности механических явлений. Проведен анализ ключевых принципов моделирования и их применения в различных областях механики, уделив особое внимание методам численного моделирования, таким как метод конечных элементов, и их роли в прогнозировании и анализе поведения механических систем. Представлены примеры разработки визуальных компьютерных моделей, иллюстрирующих задачи о деформации тел.

Этапы создания моделей:

1. Формулировка задачи: необходимо рассчитать деформацию системы: нити, которая деформируется под действием силы тяжести; балки, которая подвергается внешней нагрузке.

2. Дискретизация области: пространство разбивается на двумерную сетку (пиксели), в каждом узле которой рассчитывается деформация.

3. Выбор численного метода: для расчета деформации используется метод суммирования вкладов сил на каждом элементе системы. В случае с нитью – это сила тяжести и жесткость соединений, для балки – внешняя нагрузка и жесткость материала.

4. Разработка алгоритма: создание двух вложенных циклов по координатам, вычисление расстояний от каждой точки до каждого элемента системы.

5. Реализация в C#: программа использует Windows Forms для отображения результатов (деформация отображается графически).

Модель явления.

Для каждой задачи рассчитаны деформации с учетом внешней силы или поля [1–3].

Поле или деформация отображаются с помощью графических элементов: нить отображается с деформацией в виде точек, которые соединяются в единый график.

Результаты моделирования деформированной неоднородной нити представлены на рисунке 1.

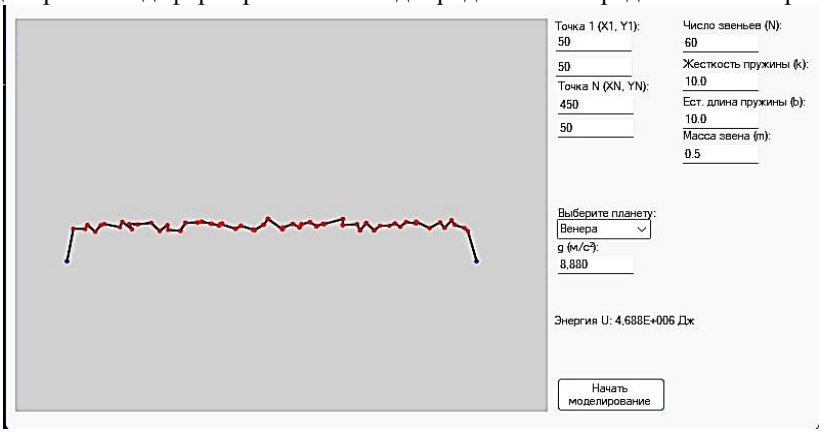


Рисунок 1 – Модель деформированной неоднородной нити

Балка отображается с точки зрения деформации в соответствии с внешней нагрузкой. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.

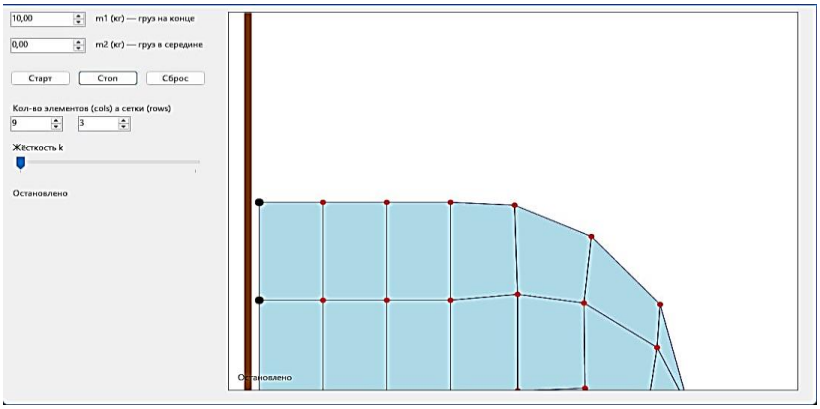


Рисунок 2 – Моделирование формы деформированной балки

В ходе решения задачи о деформации упругой балки средствами языка программирования C# были рассчитаны параметры механической системы с учетом приложенных внешних сил. Деформация и напряженное состояние отображаются с помощью графических элементов: конструкция представлена в виде стержневой системы, а точки приложения сил и реакций соединены в единую расчётную схему. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.

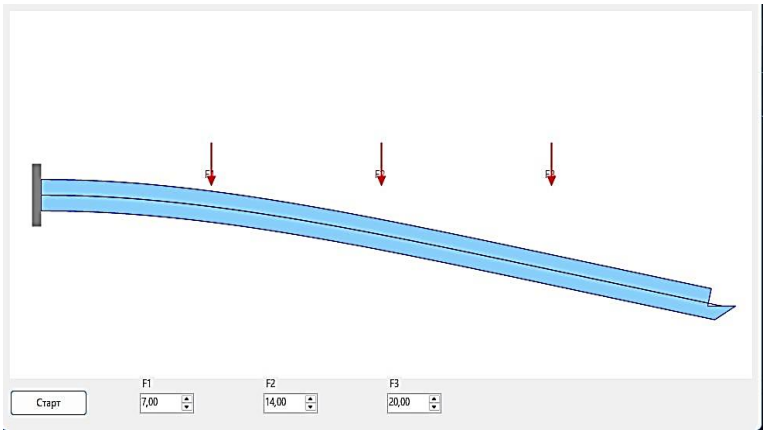


Рисунок 9 – Модель деформации упругой балки под действием внешних сил

Конструкция отображается с точки зрения статического равновесия под действием внешних нагрузок.

Компьютерное моделирование позволяет значительно ускорить процесс проектирования и анализа механических систем, минимизируя при этом количество экспериментов и затрат на их проведение. Модели, созданные с помощью C# позволяют не только понять сущность физических процессов, но и эффективно оптимизировать параметры систем, улучшая их характеристики.

В ходе работы была продемонстрирована важность применения таких моделей для решения реальных инженерных задач, что значительно улучшает точность расчетов и снижает риск ошибок при проектировании. Моделирование стало неотъемлемой частью современных технологий, обеспечивая возможность предсказания поведения системы в условиях различных внешних воздействий и эксплуатации.

Таким образом, показано, что использование компьютерных моделей не только расширяет возможности для инженерного анализа, но и способствует дальнейшему развитию области механики, предлагая новые пути для оптимизации и усовершенствования конструкций.

Список литературы

1. Майер, Р. В. Компьютерное моделирование : учеб.-метод. пособие для студентов пед. вузов [Электронное учебное издание на компактдиске] / Р. В. Майер. – Глазов : Глазов. гос. пед. ин-т, 2015. – 24,3 Мб.

2. Исаев, В. А. Математическое моделирование и вычисления в механике / В. А. Исаев, В. Е. Ларин. – М. : Наука, 2018. – 284 с.

3. Характаш, Д. С. Основы моделирования физических процессов в среде MATLAB / Д. С. Характаш. – СПб. : БХВ-Петербург, 2018. – 212 с.

This paper examines the fundamental aspects of using computer models to explain mechanical phenomena. It analyzes key modeling principles and their application in various areas of mechanics, focusing on numerical modeling methods such as the finite element method and their role in predicting and analyzing the behavior of mechanical systems. Examples of developing visual computer models illustrating deformation problems are presented.

Кошелев Никита Сергеевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, Koshelev_NS_22@student.grsu.by.

Научный руководитель – *Крупская Татьяна Константиновна*, магистр педагогических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь krupskay_tk@grsu.by.

УДК 621.3.049.774

Ю. Л. ЛИХТАР, П. Э. НОВИКОВ, И. Ю. ЛОВШЕНКО

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА МЕЖСЛОЕВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Проведено исследование влияния диэлектрической проницаемости материалов межслойной изоляции на динамические параметры КМОП-инвертора, выполненного по технологии с проектными нормами 0,35 мкм. Реализован процесс сквозного моделирования, включающего приборно-технологическое и схемотехническое моделирование, разработку топологии и экстракцию паразитных элементов (резисторов и конденсаторов) для четырех конструктивных решений, отличающихся материалом межслойной изоляции (SiCOH, FSG, SiO_2, SiN_x). Исследованы динамические характеристики конструктивных решений. Установлено, что при изменении диэлектрической проницаемости от 1,0 (схемотехническое моделирование без учета паразитных R- и C-элементов) до 7,5 задержка переключения из лог. «0» в лог. «1» уменьшается на 34,3 %, а из лог. «1» в лог. «0» – увеличивается на 17,4 %. При этом статическая мощность увеличивается на 15,1 %, а динамическая – не более чем на 45,0 %. Сформулированы рекомендации по выбору оптимальных материалов межслойной изоляции для различных применений.

Введение. Современный этап развития микроэлектроники характеризуется непрерывным усложнением интегральных микросхем и повышением требований к их быстродействию, энергоэффективности и надежности. При переходе к субмикронным и нанометровым технологическим нормам паразитные емкости межсоединений становятся сопоставимы с емкостями активных элементов, а их вклад в задержки распространения сигнала и динамическое энергопотребление существенно возрастает.

Материалы межслойной изоляции (МСИ) становятся одним из ключевых факторов, определяющих производительность интегральных схем. Использование диэлектриков с различной диэлектрической проницаемостью (k) открывает возможности для оптимизации характеристик схемы, однако требует тщательного анализа компромиссов между быстродействием, энергопотреблением и технологичностью [1; 2].

Целью работы является повышение точности прогнозирования эксплуатационных характеристик фрагментов цифровых интегральных микросхем за счет учета влияния свойств материалов межслойной изоляции посредством применения сквозного моделирования на технологическом, схемотехническом и топологическом уровнях проектирования.

Результаты. Исследование проведено на примере КМОП-инвертора, выполненного по технологическим нормам 0,35 мкм, как базового элемента цифровых интегральных схем. Проведено моделирование полного технологического маршрута формирования четырех параллельно соединенных комплементарных пар *n*- и *p*-МОП-транзисторов в системе автоматизированного проектирования в микроэлектронике, получены профили легирования основных областей, сформированы подзатворный диэлектрик, контактные области и многослойная алюминиевая металлизация. Разработано соответствующее топологическое решение. Ключевым требованием при проектировании является минимизация занимаемой площади при соблюдении минимальных зазоров между элементами. Выполнено схемотехническое моделирование переходных процессов с использованием SPICE-симулятора. Использованные модели транзисторов соответствуют приборам, полученным на этапе технологического моделирования. Идентификация паразитных элементов выполнена в специализированном инструменте для трехмерного анализа и автоматической экстракции паразитных параметров. Процесс экстракции включал три этапа:

– формирование трехмерного представления структуры КМОП-инвертора с учетом толщин всех слоев, расстояний между проводниками, геометрии контактных окон и переходных отверстий;

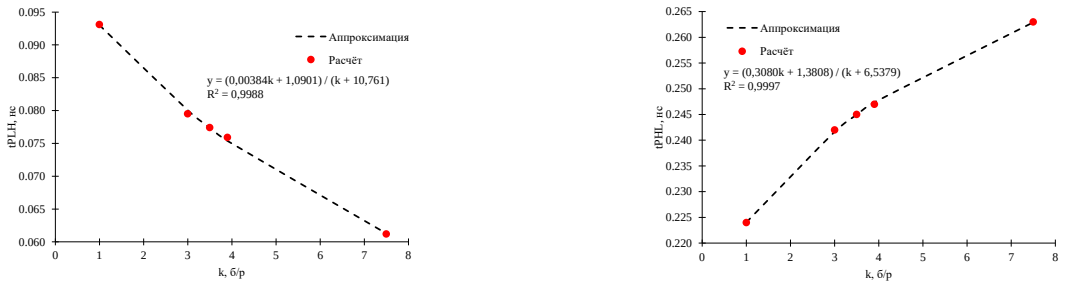
– расчет паразитных сопротивлений и емкостей на основе физической геометрии структуры;

– генерация расширенного SPICE-netlist с включением паразитных элементов.

В результате экстракции идентифицировано 36 паразитных резисторов и 576 паразитных конденсаторов. Диапазон значений паразитных сопротивлений составляет от $1 \cdot 10^{-8}$ до 1,12 Ом (суммарно порядка 15 Ом), диапазон значений паразитных емкостей – от 0,42 до 26,16 аФ (суммарная емкость порядка 5 фФ).

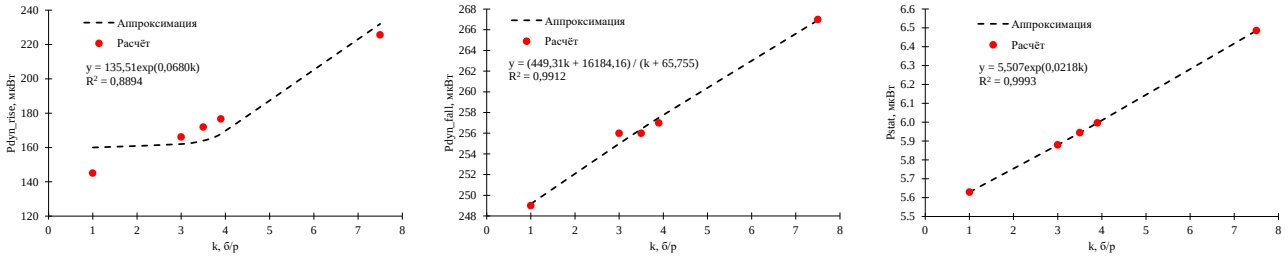
Учет влияния диэлектрической проницаемости k материалов межслойной изоляции реализован посредством схемотехнического моделирования с использованием расширенного списка соединений, содержащего паразитные элементы. Проведен анализ переходных процессов при следующих условиях: напряжение питания 1,8 В, температура 300 К, длительность моделирования 50 нс, входной импульсный сигнал с периодом 20 нс, временем фронта и спада 1 нс. Исследованы четыре конструктивных решения с различными материалами МСИ и базовая схема без учета паразитных элементов (идеализированный случай, k = 1,0): SiCOH (k = 3,0), фторсиликатное стекло (FSG, k = 3,5), SiO_2 (k = 3,9) и SiN_x (k = 7,5) [3].

Для каждой конфигурации определен комплекс динамических параметров: временные задержки переключения из лог. «0» в лог. «1» и наоборот по уровню 50 % (tPLH и tPHL соответственно, рисунок 1); статическая мощность и динамическая мощность при переключении из лог. «0» в лог. «1» и наоборот (Pstat, Pdyn_rise и Pdyn_fall соответственно, рисунок 2).



а *б*

Рисунок 1 – Зависимости tPLH (а) и tPHL (б) от k



а *б* *в*

Рисунок 2 – Зависимости Pdyn_rise (а), Pdyn_fall (б) и Pstat (в) от k

В результате изменения диэлектрической проницаемости k материала межслойной изоляции наблюдается изменение временных характеристик схемы, а именно задержек переключения tPLH и tPHL. Задержка tPLH монотонно уменьшается с ростом диэлектрической проницаемости от 0,0931 нс для базовой схемы до 0,0612 нс для SiN_x, что составляет снижение на 34,3 %. Задержка tPHL демонстрирует рост от 0,2240 до 0,2630 нс (прирост 17,4 %). Статическая мощность Pstat, обусловленная токами утечки в установившихся режимах, возрастает с ростом k от 5,64 до 6,49 мкВт (на 15,1%). Динамическая составляющая Pdyn_rise увеличивается с 160,0 до 232,0 мкВт (на 45,0 %), а составляющая Pdyn_fall – с 249,0 до 267,0 мкВт (на 7,2 %), что свидетельствует об увеличении энергопотребления для решений, сформированных на основе материалов с высокой диэлектрической проницаемостью.

Оптимальный выбор материала межсоединений определяется целевым назначением устройства. Для высокоскоростных схем, где критична минимизация tPLH, предпочтителен SiN_x, обеспечивающий наименьшую задержку фронта. Для применений с ограничением по потребляемой мощности целесообразно рассмотрение low-k диэлектриков (SiCOH или FSG), минимизирующих паразитные ёмкости и динамические потери. С точки зрения сбалансированного сочетания параметров для топологических решений логических элементов интегральных микросхем, сформированных по технологическому процессу с проектными нормами 0,35 мкм, оптимальным решением остаётся SiO_2.

Список литературы

1. Baklanov, M. Dielectric Films for Advanced Microelectronics / M. Baklanov, M. Green, K. Maex. – Chichester : Wiley, 2007. – 512 P.

2. Joshi, B. N. Analysis of interconnect capacitance for sub nano CMOS technology using the low dielectric material / B. N. Joshi, Y. S. Mhaisagar, A. M. Mahajan // Microelectronics Reliability. – 2011. – Vol. 51, № 5. – P. 953–958.

3. Progress in the development and understanding of advanced low k and ultralow k dielectrics for very large-scale integrated interconnects – State of the art / A. Grill, S. M. Gates, T. E. Ryan [et al.] // Applied Physics Reviews. – 2014. – Vol. 1, № 1.

This study investigates the influence of the dielectric permittivity of interlayer dielectric (ILD) materials on the dynamic parameters of a CMOS inverter fabricated using a 0,35 μm technology node. A comprehensive simulation flow was implemented, encompassing technology computer-aided design (TCAD) for device and process simulation, circuit-level simulation, layout design, and parasitic extraction (resistive and capacitive elements) for four design variants differing in ILD material (SiCOH, FSG, SiO_2, SiN_x). The dynamic characteristics of these configurations were systematically analyzed. It was established that varying the relative permittivity from 1,0 (circuit simulation without accounting for parasitic R and C elements) to 7,5 results in a 34,3 % reduction in the propagation delay for the low-to-high logic transition and a 17,4 % increase for the high-to-low transition. Concurrently, static power consumption increases by 15,1 %, while dynamic power consumption rises by no more than 45,0 %. Based on these findings, recommendations are formulated for the selection of optimal ILD materials tailored to specific application requirements.

Лихтар Юлиана Леонидовна, студент Национального детского технопарка, Минск, Республика Беларусь.

Новиков Павел Эдуардович, студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, p.novikov@bsuir.by.

Научный руководитель – *Ловшенко Иван Юрьевич*, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, lovshenko@bsuir.by.

УДК 535.37

Е. Ю. МАНУЙЛОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПИНЦЕТА НА СПЕКТР ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ МОЛЕКУЛ

Исследуется влияние оптического пинцета на спектральные характеристики флуоресценции молекулярных систем. Оптический пинцет представляет собой метод оптического захвата микрочастиц, основанный на действии градиентных сил, возникающих в неоднородном поле интенсивности сфокусированного лазерного излучения. В работе рассмотрено распределение интенсивности гауссова лазерного пучка в области фокуса и условия формирования потенциальной ловушки для диэлектрических частиц. Проведено численное моделирование распределения интенсивности и градиентных сил в оптической ловушке с использованием языка Python. Показано, что высокая локальная интенсивность лазерного излучения может приводить к изменению условий взаимодействия молекул и увеличению вероятности образования эксимерных состояний. Это сопровождается смещением спектра флуоресценции в длинноволновую область. Полученные результаты демонстрируют возможность управления спектральными характеристиками флуоресценции за счёт изменения параметров лазерного излучения в оптическом пинцете.

Исследование взаимодействия молекул в локализованных оптических полях позволяет детально анализировать их спектроскопические характеристики и динамику в строго контролируемых условиях. Области высокой интенсивности создают возможность изучения пространственно-зависимых эффектов и механизмов возбуждения молекул с высокой точностью.

В последние годы особый интерес представляют оптические пинцеты, которые используются не только для удержания и перемещения частиц, но и для исследования процессов взаимодействия молекул в областях концентрированного лазерного излучения. Интенсивные локальные поля способны модифицировать условия флуоресценции молекулярных систем, влияя на вероятность образования связанных возбуждённых состояний, включая эксимерные комплексы.

Фокусировка лазерного пучка объективом с большой числовой апертурой приводит к формированию области с резко неоднородным распределением интенсивности.Диэлектрическая частица, находящаяся в таком поле, испытывает действие градиентной силы, которая стремится переместить её в область наибольшей интенсивности излучения.В дипольном приближении, когда размер частицы значительно меньше длины волны излучения, градиентная сила может быть записана в виде:

$$F_{grad} = \frac{\alpha}{2\varepsilon_0 nc}\nabla I(r),$$

где α – поляризуемость частицы, $I(r)$ – распределение интенсивности, n – показатель преломления среды, c – скорость света.

Помимо градиентной силы на частицу действует сила рассеяния, связанная с переносом импульса фотонов:

$$F_{scatt} = \frac{n\sigma I}{c},$$

где σ – эффективное сечение рассеяния.

Потенциальная энергия оптической ловушки определяется выражением:

$$U(r) = -\frac{\alpha}{2\varepsilon_0 n\, cI(r)}.$$

Если градиентная сила превышает силу рассеяния, формируется потенциальная яма, обеспечивающая устойчивое удержание частицы вблизи фокуса лазерного пучка. Интенсивность лазерного пучка вблизи фокуса описывается распределением гауссова пучка:

$$I(r,z)=I_0\left(\frac{w_0}{w(z)}\right)^2 exp\left(-\frac{2r^2}{w(z)^2}\right),$$

где $w(z) = w_0\sqrt{1+\left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$ – радиус пучка на расстоянии z от фокуса, $z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ – радиус Рэлея.

Максимальная интенсивность наблюдается в центре фокального пятна. При удалении от оси пучка интенсивность быстро уменьшается, что приводит к появлению сильного градиента интенсивности и формированию оптической ловушки.

Высокая локальная интенсивность лазерного излучения может приводить к локальному нагреву среды и увеличению подвижности молекул. Это повышает вероятность взаимодействия между молекулами и способствует образованию эксимерных состояний.

Эксимер представляет собой возбуждённый димер, возникающий при взаимодействии возбуждённой молекулы с молекулой в основном состоянии. Излучение эксимеров обычно характеризуется более длинной длиной волны по сравнению с мономерной флуоресценцией.

Соотношение интенсивностей эксимерной и мономерной флуоресценции можно оценить выражением:

$$\frac{I_E}{I_M} = \frac{k_f[M]}{k_r + k_{nr} + k_f[M]},$$

где k_f – скорость образования эксимеров, k_r – радиационная скорость распада, k_{nr} – скорость безызлучательного распада, [M] – концентрация мономера.

Увеличение локальной концентрации и интенсивности излучения в области оптической ловушки приводит к увеличению вероятности образования эксимерных состояний и, как следствие, к смещению спектра флуоресценции в длинноволновую область.

Расчёты показали, что максимальная интенсивность достигается в центре фокусного пятна и быстро уменьшается при удалении от оси пучка. В области фокуса формируется потенциальная яма, обеспечивающая удержание частицы. Таким образом, оптический пинцет может выступать не только как инструмент манипулирования микрочастицами, но и как средство управления фотохимическими процессами и спектральными свойствами вещества.

Для анализа распределения интенсивности и сил в оптической ловушке было выполнено численное моделирование на языке Python с использованием библиотек NumPy и Matplotlib.

На первом этапе задавались основные параметры системы:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
c = 3e8 eps0 = 8.854e-12
lambda_laser = 1064e-9 power = 100e-3 w0 = 1e-6
n_particle = 1.50 n_medium = 1.33 particle_radius = 1e-6
```

Поляризуемость диэлектрической частицы рассчитывалась по формуле:

```
alpha = 4 * np.pi * eps0 * particle_radius**3 * ((n_particle**2 - n_medium**2) / (n_particle**2 + 2*n_medium**2))
```

Распределение интенсивности гауссова пучка моделировалось выражением

```
r = np.linspace(-3e-6,3e-6,500)
intensity0 = 2power/(np.piw0**2)
intensity = intensity0np.exp(-2r2/w02)
```

На основе распределения интенсивности вычислялась градиентная сила оптической ловушки.

```
dr = r[1]-r[0]
dI = np.gradient(intensity,dr)
f_grad = (alpha/(2ceps0*n_medium))*dI
```

Для более наглядного анализа структуры оптической ловушки было выполнено трёхмерное моделирование распределения интенсивности лазерного пучка.

```
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
```

```
grid = np.linspace(-3e-6,3e-6,120)
X,Y,Z = np.meshgrid(grid,grid,grid)
zR = np.pi*w0**2/lambda_laser
wz = w0*np.sqrt(1+(Z/zR)**2)
I3D = intensity0*(w02/wz2)np.exp( -2(X2+Y2)/wz**2 )
mid = len(grid)//2 sliceI = I3D[:,:,mid]
X2,Y2 = np.meshgrid(grid,grid)
fig = plt.figure() ax = fig.add_subplot(111,projection='3d')
ax.plot_surface( X21e6, Y21e6, sliceI, cmap='viridis' )
ax.set_xlabel('x (мкм)') ax.set_ylabel('y (мкм)') ax.set_zlabel('I(Вт/м^2)')
plt.show()
```

Трёхмерное моделирование обеспечивает количественную визуализацию пространственного распределения интенсивности в фокальной области лазерного пучка и структуры формируемой потенциальной ловушки. Этот подход позволяет исследовать влияние оптического пинцета на спектральные характеристики флуоресценции молекулярных систем через анализ градиентов поля и потенциальных сил, действующих на захватываемые частицы. Детальный анализ распределения интенсивности гауссова пучка и условий формирования стабильной оптической ловушки показывает, что высокая локальная интенсивность лазерного излучения изменяет условия взаимодействия молекул, способствуя формированию эксимерных состояний и смещению спектра флуоресценции.

На рисунке 1 представлена визуализация работы оптического пинцета с флуоресцентной микрочастицей. Верхняя панель демонстрирует три последовательные 3D-сцены, созданные в программном комплексе Blender. Красный конус обозначает сфокусированный лазерный пучок, формирующий потенциальную ловушку, а сферические объекты голубого и жёлто-зелёного цветов моделируют диэлектрические частицы с флуоресцентными молекулами. По мере увеличения локальной интенсивности лазерного поля частица перемещается к центру фокуса, сопровождаясь изменением спектрального цвета свечения с голубого на жёлто-зелёный, что отражает частичное нарастание эксимерной флуоресценции.

Нижняя панель рисунка 1 показывает экспериментальные изображения поперечного сечения флуоресцентного пятна и сравнительные спектры. Так, на рисунке 2 спектр без пинцета наблюдается преимущественно мономерная флуоресценция с пиком около 440 нм; доля эксимерной составляющей минимальна, длинноволновая компонента почти отсутствует. А там, где спектр с оптическим пинцетом возрастает вероятность формирования эксимеров, что приводит к появлению и усилению длинноволнового пика около 570 нм; спектр сдвигается в длинноволновую область, а видимый цвет свечения изменяется с синего на оранжево-жёлтый.

Представленная визуализация объединяет три ключевых аспекта функционирования оптического пинцета: формирование локально усиленного поля, удержание частицы в фокусе и управляемое изменение спектральных свойств флуоресценции. Использование Python-скриптов и 3D-визуализации позволяет количественно оценивать распределение интенсивности, градиентных сил и флуоресцентных свойств микросистем.

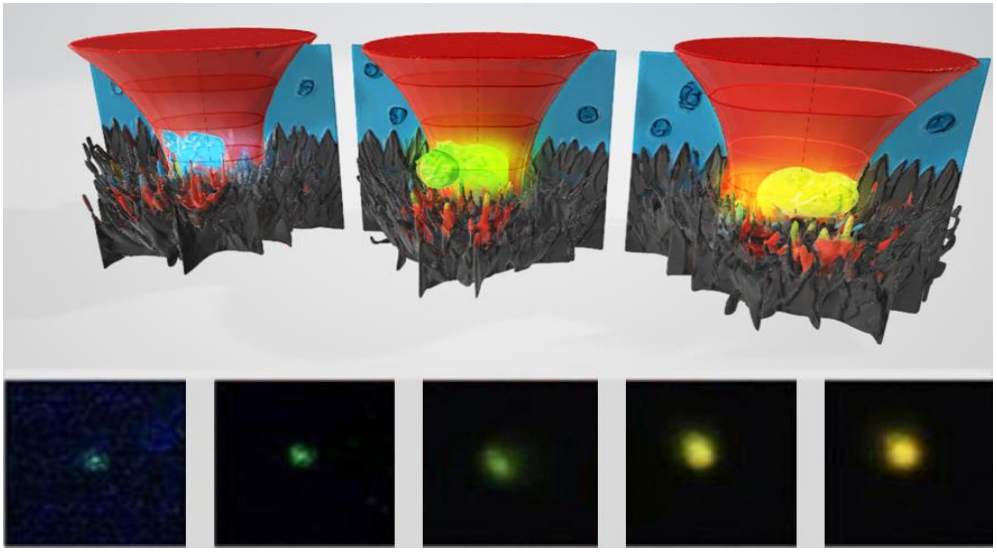


Рисунок 1 – Трёхмерная визуализация работы оптического пинцета и изменения флуоресценции микрочастиц

Лазерный оптический пинцет обеспечивает эффективное удержание микрочастиц диаметром 1–2 μм за счёт формирования градиентного поля с максимальной силой порядка 10^{-10} Н при мощности 100 мВт. Локальные зоны высокой интенсивности создают контролируемый тепловой эффект ($\Delta T \approx 4–5$ °C), способствующий изменению диффузионных свойств молекул и повышению вероятности их взаимодействия. В этих условиях рисунок 2 демонстрирует высокая локальная интенсивность лазерного поля значительно усиливает образование эксимеров, что проявляется в смещении спектра флуоресценции в длинноволновую область и изменении видимого цвета свечения с синего на оранжево-жёлтый.

Использование Python-скриптов и 3D-визуализации позволяет количественно оценивать распределение интенсивности, градиентных сил и флуоресцентных свойств в оптической ловушке. Так, полученные результаты демонстрируют возможность использования оптических пинцетов не только для манипулирования микрочастицами, но и для управления спектральными свойствами вещества.

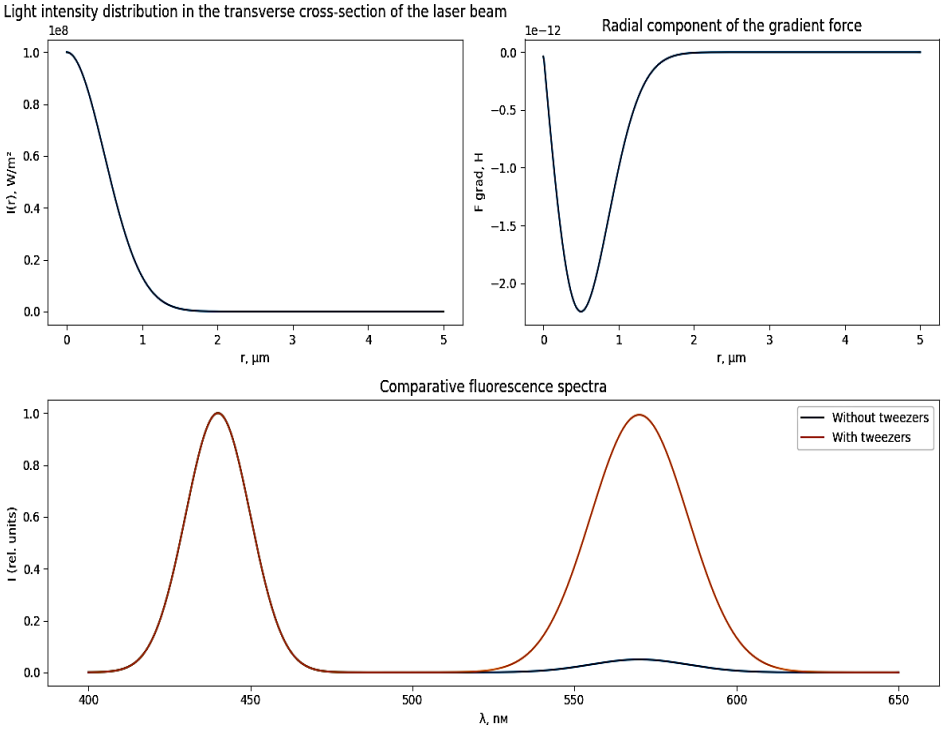


Рисунок 2 – Распределение интенсивности лазерного пучка, радиальная компонента градиентной силы и сравнительные спектры флуоресценции молекул с и без оптического пинцета

Список литературы

1. Nieto-Vesperinas, M. Optical forces on small magnetodielectric particles / M. Nieto-Vesperinas, J. J. Saenz, R. Gomez-Medina, L. Chantada // Optics Express. – 2010. – Vol. 18. – P. 11428–11443.

2. Fluorescence Colour Control in Perylene-Labeled Polymer Chains Trapped by Nanotextured Silicon / R. Takao [et al.] // Angewandte Chemie Int. Ed. – 2022. – Vol. 61, e202117227.

3. Yang, Y. Optical trapping with structured light: a review / Y. Yang, Y.-X. Ren, M. Chen, Y. Arita, C. Rosales-Guzmán // Applied Photonics. – 2021. – Vol. 3, 034001.

4. Neuman, K. C. Optical trapping / K. C. Neuman, S. M. Block // Rev. Sci. Instrum. – 2004. – Vol. 75 (9). – P. 2787–2809.

This work investigates the influence of optical tweezers on the spectral characteristics of fluorescence in molecular systems. Optical tweezers are a method for optically trapping microparticles based on the action of gradient forces arising in the inhomogeneous intensity field of focused laser radiation. The study examines the intensity distribution of a Gaussian laser beam in the focal region and the conditions for forming a potential trap for dielectric particles. Numerical simulations of the intensity distribution and gradient forces in the optical trap were performed using the Python programming language. It is shown that high local laser intensity can lead to changes in the conditions of molecular interaction and an increase in the probability of excimer state formation. This is accompanied by a shift of the fluorescence spectrum toward the long-wavelength region. The results demonstrate the possibility of controlling the spectral characteristics of fluorescence by varying the parameters of the laser radiation in the optical tweezers.

Мануйлова Елизавета Юрьевна, студент 4 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, manuilovaliza82@gmail.com.

Научный руководитель – *Новицкий Андрей Викторович*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры ФОиПИ физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, Novitsky@bsu.by.

УДК 538.9

Н. В. МАСКЕВИЧ

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ КОНТЕКСТА ИЗМЕРЕНИЙ В ФИЗИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Предлагается метод повышения точности данных в исследованиях физики конденсированного состояния путем добавления системы визуального контроля на основе искусственного интеллекта к существующим измерительным приборам. Анализ нейронными сетями снимков экспериментальных установок в важные моменты исследования помогает зафиксировать условия измерения (например, положение образцов, наличие помех) и обеспечивает полную проверку и учет всех этапов эксперимента.

В современной физике конденсированного состояния эксперименты все чаще полагаются на автоматизированную обработку больших объемов данных [1]. Цифровые датчики, контроллеры и системы сбора данных обеспечивают возможность получения тысяч измерений в секунду [2]. Несмотря на свою эффективность, традиционная автоматизация имеет существенный недостаток: она работает исключительно с числовыми данными, игнорируя контекст, в котором эти данные были получены [3].

Контекст включает в себя все визуальные и ситуационные данные, которые могут повлиять на точность измерения: загрязнение оптических элементов, смещение образца, возникновение паразитных бликов, механические дефекты индикаторов, ошибки в позиционировании и другие факторы [4]. В традиционной схеме исследователь получает файл с числовыми данными и лишь при последующем анализе может обнаружить отклонения от нормы. В этот момент эксперимент уже был завершен, установка демонтирована, и установить причину выброса стало не представляться возможным.

В областях, где даже незначительные отклонения могут быть ошибочно приняты за новые физические явления, например, при изучении фазовых переходов, квантовых явлений или свойств неизученных материалов, эта проблема приобретает особую остроту. Недостаточно лишь фиксировать числовые результаты; необходимо также запечатлевать условия их получения, что позволит проводить верификацию контекста эксперимента в реальном времени.

Чтобы устранить потерю контекста при автоматизированном сборе данных, предложено оригинальное архитектурное решение: дополнить классическую измерительную систему визуальным каналом регистрации, обрабатываемым методами искусственного интеллекта [1]. Суть идеи проста: сделать фотографию активным инструментом измерения, способным не только фиксировать конкретные численные показатели, но и анализировать условия их получения.

Основа подхода – параллельная фиксация двух типов данных:

- цифровой канал, обеспечивающий стандартное считывание показаний приборов и датчиков посредством привычных интерфейсов [2]. Это высокочастотный и точный источник количественной информации;
- визуальный канал, осуществляющий автоматическую съемку объекта измерения или индикаторов в ключевые моменты эксперимента[1]. Фото содержит ценную информацию о расположении образца, состоянии установки, присутствии внешних воздействий и прочих деталях, игнорируемых традиционным цифровым сигналом.

Объединяя оба потока данных в единую информационную структуру, удается создать насыщенную картину эксперимента, где каждое числовое значение подкреплено визуальным контекстом его происхождения [3].

Затем используется искусственный интеллект. Специально разработанная свёрточная нейросеть занимается двумя основными задачами:

1. Распознаёт показания измерительных приборов непосредственно по изображениям шкал, циферблатов и дисплеев, независимо от типа индикатора и внешнего вида панели [3; 5].

2. Оценивает качество самого изображения, рассчитывая коэффициент уверенности (confidence score). Если нейросеть замечает низкую четкость картинки, появление бликов, загрязнений или других проблем, то она предупреждает оператора о потенциальной ненадежности данных [4].

Получив такую систему, исследователи имеют возможность гораздо точнее оценить реальную обстановку эксперимента, исключить грубые ошибки и обеспечить надежную трактовку данных. Важно отметить, что реалии реальных экспериментов разнообразны и заранее не предопределены. Поэтому в архитектуру встроен механизм активного обучения: при недостаточной уверенности в результате нейросеть запрашивает мнение оператора [6; 7]. Полученные таким образом поправки используются для повторного обучения модели, что повышает точность работы системы в дальнейшем.Помимо непосредственных преимуществ, архитектура обладает одним крайне полезным качеством – полным аудитом всей истории эксперимента. Любое событие фиксируется с временной отметкой и привязкой к исходным фотографиям, что позволяет ретроспективно восстанавливать ход эксперимента и подтверждает достоверность данных даже спустя много лет [3].

Наконец, стоит подчеркнуть гибкость предложенной концепции [1]. Архитектура интегрируется поверх существующих измерительных систем без существенных изменений инфраструктуры [1]. Дополнительная установка недорогих цифровых камер и организация автоматической съёмки позволяют плавно внедрить инновационный подход без остановки текущих экспериментов [1].

Эта разработка призвана показать, каким образом современные технологии искусственного интеллекта способны эффективно восполнить пробелы классического подхода, связанного с измерениями, существенно повысив качество и надежность исследований.

Практическая реализация предложенного подхода открывает возможности, выходящие за рамки простой фиксации ошибок. Интеграция визуального канала и ИИ преобразует процесс эксперимента из «слепого» накопления данных в интеллектуальный диалог с установкой. Оператор получает не просто массив чисел, а структурированный поток данных, где каждый критический результат измерения сопровождается визуальным свидетельством своей достоверности. Это позволяет не только отбраковывать артефакты в реальном времени, но и оперативно вмешиваться в ход эксперимента при обнаружении нештатной ситуации, например, загрязнения линзы или дрейфа образца, предотвращая тем самым проведение заведомо некорректных измерений [1; 4].

Однако внедрение таких систем сопряжено с рядом методических вызовов. Ключевым из них является обеспечение репрезентативности обучающей выборки для нейросети. Условия реального эксперимента, такие как блики или частичное перекрытие индикаторов, могут значительно отличаться от идеализированных изображений. Именно здесь механизм активного обучения, основанный на запросе оператора, демонстрирует свою состоятельность. Он позволяет дообучать модель непосредственно в процессе работы, адаптируя её к специфике конкретной установки без необходимости длительной предварительной разметки данных [6]. Такой симбиоз человека и алгоритма лежит в основе современной парадигмы человеко-машинного взаимодействия в научной среде [7].

В перспективе развитие данной архитектуры видится в двух направлениях. Во-первых, это переход от верификации к предиктивной аналитике. Анализируя временные ряды визуальных данных, нейросеть сможет предсказывать момент возникновения неисправности, например, критическое загрязнение оптики, и выдавать предупреждение заранее. Во-вторых, это автоматическая адаптация параметров эксперимента. Обнаружив по фотоснимку, что образец сместился, система сможет не только сигнализировать об этом, но и самостоятельно скорректировать положение предметного столика, полностью исключив человеческий фактор из цикла подстройки [1]. Таким образом, предложенный метод закладывает основу для создания полностью автономных экспериментальных комплексов, способных не только собирать, но и критически осмысливать получаемые данные в контексте физической реальности.

Этот переход от пассивной регистрации данных к активному контекстному анализу знаменует собой смену парадигмы в методологии физического эксперимента.

Список литературы

1. Springer Nature Experiments: новые функции на базе ИИ для научных исследований [Электронный ресурс] // Научная библиотека СПбГУ. – 2026. – Режим доступа: https://library.spbu.ru/ru/novosti/968-novye-funktsii-na-baze-ii-v-springer-nature-experiments.html.

2. Васильев, П. М. Цифровая обработка сигналов и нейросетевые методы в экспериментальных исследованиях [Электронный ресурс] / П. М. Васильев, А. С. Калинкин // Проблемы управления. – 2020. – № 2. – Режим доступа: http://pu.mtas.ru/archive/pu220.php.

3. Microsoft COCO: Common Objects in Context [Электронный ресурс] / T.-Y. Lin [et al.] // arXiv.org. – 2015. – Режим доступа: https://arxiv.org/abs/1405.0312.

4. Bergmann, P. MVTec AD – A Comprehensive Real-World Dataset for Unsupervised Anomaly Detection [Электронный ресурс] / P. Bergmann, M. Fauser, D. Sattlegger, C. Steger // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2019. – P. 9592-9600. – Режим доступа: https://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2019/html/Bergmann_MVTec_AD_A_Comprehensive_RealWorld_Dataset_for_Unsupervised_Anomaly_CVPR_2019_paper.html.

5. Бычков, А. Г. Использование сверточных нейросетей для классификации изображений [Электронный ресурс] / А. Г. Бычков, Т. М. Киселёва, Е. В. Маслова // Вестн. Сибир. гос. индустриального ун-та. – 2023. – № 1. – С. 39–49. – Режим доступа: https://vestnik.sibsiu.ru/jour/article/view/138.

6. Settles, B. Active Learning Literature Survey [Электронный ресурс] / B. Settles // University of Wisconsin – Madison. – 2009. – Режим доступа: http://burrsettles.com/pub/settles.activelearning.pdf.

7. Yoo, D. Learning Loss for Active Learning [Электронный ресурс] / D. Yoo, I. S. Kweon // arXiv.org. – 2019. – Режим доступа: https://arxiv.org/abs/1905.03677.

A method is proposed to enhance data accuracy in condensed matter physicss research by integrating an AI-based visual inspection system with existing measurement instrumentation. Neural network analysis of experimental setup imagery at critical stages of the study facilitates the recording of measurement conditions (e.g., sample positioning, presence of interference) and ensures comprehensive verification and accounting of all experimental phases

Маскевич Никита Валерьевич, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Белко Александр Витальевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

УДК 004.94

М. И. МОЙСЕЙЧИК

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МАСС-СПЕКТРОМЕТРА

В настоящее время возникает все большая необходимость создания современных, интерактивных и наглядных учебных пособий, которые позволяют компенсировать недостаток практической работы на дорогостоящем оборудовании и глубже понять фундаментальные процессы. В работе представлен пример бесплатного, кроссплатформенного приложения, которое может быть использовано в учебном процессе для повышения эффективности усвоения сложного материала по масс-спектрометрии.

Масс-спектрометрия является одним из наиболее мощных и информативных аналитических методов, широко применяемых в химии, биохимии, медицине, экологии, фармацевтике и материаловедении. Метод позволяет определять молекулярные массы, элементный и изотопный состав, структуру молекул. Однако сложность физических принципов, лежащих в основе работы масс-спектрометра, и высокая стоимость реального оборудования создают барьеры для эффективного обучения студентов [1–3].

Разработка структуры и алгоритмов учебного приложения

Постановка задачи и декомпозиция на модули

Задача разработки учебного пособия была декомпозирована на три основных логических модуля:

Теоретический модуль: предоставляет структурированную информацию об истории, принципах работы, основных узлах и типах масс-спектрометров.

Модуль контроля знаний: содержит тестовые вопросы по теории для самопроверки.

Интерактивный симулятор: визуализирует процесс работы упрощённой модели магнитного секторного масс-спектрометра. Пользователь может задавать параметры (массу иона, ускоряющее напряжение, индукцию поля) и наблюдать за траекторией иона и формированием масс-спектра для смеси.

Выбор технологий и описание структуры программы

Для реализации выбраны следующие технологии:

Язык программирования: Python 3.13. Выбор обусловлен его простотой, читаемостью, богатой экосистемой научных библиотек и кроссплатформенностью.

Библиотеки:

PySide6 – для создания современного, интуитивно понятного графического интерфейса.

NumPy – для эффективных математических вычислений при моделировании траекторий ионов.

Matplotlib – для построения графиков масс-спектров внутри приложения.

Структура программы следует парадигме MVC (Model-View-Controller):

Model (Модель): Классы, описывающие данные (параметры иона, уравнения движения, вопросы теста).

View (Представление): Окна и виджеты PySide6, отображающие теорию, тесты и симуляцию.

Controller (Контроллер): Логика, связывающая действия пользователя в интерфейсе с расчётами в модели и обновлением представления.

Реализация и функционал программного обеспечения

Модуль теоретического материала

Модуль реализован в виде набора вкладок (QTabWidget). Материал структурирован по разделам: «Введение», «Принцип действия», «Источники ионов», «Масс-анализаторы», «Детекторы».

Модуль тести рования

Модуль содержит базу вопросов с множественным выбором. Вопросы загружаются из структурированного файла (JSON, YAML). Интерфейс тестирования (QWidget с QVBoxLayout) последовательно выводит вопрос и варианты ответов (QRadioButton). По завершении теста выводится результат: количество правильных ответов и процент усвоения материала.

Модуль интерактивной симуляции масс-спектрометра

Это центральный модуль приложения. Он состоит из:

- Панели управления (QGroupBox **с** QDoubleSpinBox**,** QSlider): Позволяет задавать: массу иона (в атомных единицах массы, а.е.м.), заряд иона (кратность), ускоряющее напряжение (В), индукцию магнитного поля (Тл), радиус кривизны масс-анализатора (м).

- Визуализатора траектории (Matplotlib Canvas): В реальном времени рисует траекторию движения иона от источника через зону ускорения и по дуге в магнитном поле к детектору. Траектория рассчитывается на основе уравнения второго закона Ньютона, записанного для заряженной частицы, движущейся в магнитном поле перпендикулярно линиям индукции с использованием NumPy.

- Генератора масс-спектра (Matplotlib Canvas): При включении режима «Смесь» позволяет задать несколько ионов с разными массами и относительными интенсивностями. На основе рассчитанных положений фокусировки (радиусов) строится классический столбчатый масс-спектр, имитирующий сигнал детектора.

Верификация работы симулятора

Для проверки корректности математической модели симулятора были проведены расчёты для ряда известных ионов (например, N_2^+, CO^+) с заданными параметрами V и B. Рассчитанные из второго закона Ньютона значения радиуса фокусировки R сравнивались с положениями пиков на виртуальном детекторе в программе. Расхождение не превысило 0,5 %, что подтверждает адекватность модели.

Оценка эффективности учебного пособия

Предварительное тестирование приложения на группе студентов 3 курса показало:

Повышение наглядности: 90 % опрошенных отметили, что интерактивная симуляция помогла лучше понять связь между физическими параметрами (*m*/*z*, *B*, *V*) и результатом измерения – масс-спектром.

Удобство интерфейса: Интерфейс на PySide6 стал интуитивно понятным.

Эффективность контроля: Модуль тестирования позволяет быстро выявить слабо усвоенные разделы теории.

Гибкость: Возможность изменять любые параметры в симуляторе стимулирует исследовательский интерес.

Таким образом, было разработано интерактивное учебно-методическое пособие – десктоп-приложение для изучения принципов работы аналитического масс-спектрометра.

Спроектирована и реализована модульная архитектура приложения, включающая теоретический раздел, систему тестирования и интерактивный симулятор.

Приложение разработано на Python 3.13 с использованием библиотек PySide6, NumPy и Matplotlib, что обеспечивает кроссплатформенность, современный интерфейс и научную точность расчётов.

Созданный симулятор наглядно демонстрирует процесс ионизации, ускорения, пространственного разделения и детектирования ионов в магнитном секторном анализаторе, позволяя в реальном времени наблюдать зависимость траектории иона от его *m*/*z* и параметров прибора.

Проведена верификация математической модели симулятора и предварительная оценка педагогической эффективности приложения.

Разработанное программное обеспечение готово к использованию в учебном процессе. Оно позволяет компенсировать недостаток практики на реальных приборах, делая сложный теоретический материал более доступным и наглядным.

Перспективными направлениями развития проекта являются:

- Добавление симуляторов для других типов масс-анализаторов (квадруполь, время-пролётный).
- Реализация модуля для обработки реальных масс-спектров (форматы .mzML, .raw).
- Создание базы данных масс-спектров стандартных соединений для учебных задач идентификации.
- Развитие сетевого режима для проведения лабораторных работ в компьютерном классе.

Список литературы

1. Майер, Р. В. Компьютерное моделирование : учеб.-метод. пособие для студентов пед. вузов [Электронное учебное издание на компактдиске] / Р. В. Майер. – Глазов : Глазов. гос. пед. ин-т, 2015. – 24,3 Мб.

2. De Hoffmann, E. Mass Spectrometry: Principles and Applications / E. De Hoffmann, V. Stroobant. – 3rd ed. – John Wiley & Sons, 2007.

3. Smith, R. M. Understanding Mass Spectra: A Basic Approach / R. M. Smith. – John Wiley & Sons, 2004.

There is a growing need to create modern, interactive, and visual teaching aids that compensate for the lack of hands-on experience with expensive equipment and provide a deeper understanding of fundamental processes. This paper presents an example of a free, cross-platform application that can be used in the classroom to improve the learning of complex mass spectrometry material.

Мойсейчик Максим Игоревич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, Mojsejchik_MI_23@student.grsu.by.

Научный руководитель – *Крупская Татьяна Константиновна*, магистр педагогических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, krupskay_tk@grsu.by.

УДК 004.94

Е. А. НАСЕКАЙЛО, Д. А. СЕМЁНЧИК, К. А. САВЧУК

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ДВС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРАКТИВНОЙ 3D-ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Рассматриваются результаты компьютерного моделирования термодинамических циклов двигателей внутреннего сгорания. Физическая модель построена на уравнениях политропных процессов для идеального газа с постоянной теплоёмкостью. Численная реализация выполнена на языке Python с применением библиотеки Viser. Проведён анализ влияния показателя адиабаты, степени сжатия и степени предварительного расширения на термический КПД и форму индикаторных диаграмм P–V и T–S.

Целью работы является численное исследование термодинамических циклов двигателей внутреннего сгорания и создание интерактивного инструмента для их визуального анализа. Рассматриваются два цикла: цикл Отто с подводом теплоты при постоянном объёме и цикл Дизеля с подводом теплоты при постоянном давлении. В качестве физической модели используются уравнения политропных процессов для идеального газа, описывающих последовательные термодинамические состояния рабочего тела в цилиндре двигателя [1; 3].

Компьютерное моделирование позволяет варьировать такие физические параметры, как показатель адиабаты k, степень сжатия ε, степень предварительного расширения ρ, начальные давление и температуру, при этом в реальном времени отслеживаются изменения давления, объёма, температуры, энтропии и термического КПД [3]. Рабочее тело считается идеальным газом с постоянной теплоёмкостью. Процессы сжатия и расширения приняты политропными с постоянным показателем политропы n. В цикле Отто теплота подводится изохорно, в цикле Дизеля – изобарно. Отвод теплоты в обоих случаях происходит по изохоре.

Термический КПД цикла Отто зависит от степени сжатия ε и показателя адиабаты k [3]:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \tag{1}$$

Для цикла Дизеля на КПД дополнительно влияет степень предварительного расширения ρ [1; 3]:

$$\eta = 1 - \frac{1}{k} \cdot \frac{\rho^k - 1}{(\rho - 1) \cdot \varepsilon^{k-1}} \tag{2}$$

При одинаковой максимальной температуре T_3 термический КПД цикла Дизеля оказывается выше. Это объясняется тем, что в цикле Дизеля сжимается чистый воздух, что позволяет применять степени сжатия ε = 15–16 без риска самовоспламенения [1; 3]. Параметры рабочего тела в характерных точках цикла рассчитываются последовательно по соотношениям политропного процесса:

$$\frac{p_2}{p_1} = \varepsilon^n \qquad \frac{T_2}{T_1} = \varepsilon^{n-1} \tag{3}$$

Здесь n – показатель политропы; при $n = k$ процесс адиабатный, при $n \to \infty$ – изохорный. Изменение удельной энтропии:

$$\Delta S = c_v \ln\frac{T_2}{T_1} + R \ln\frac{V_2}{V_1} \tag{4}$$

Численная реализация предполагает, что текущий объём цилиндра как функция угла поворота коленчатого вала φ определяется геометрией кривошипно-шатунного механизма:

$$V(\varphi) = Vc + \frac{\pi D^2}{4}\left[R(1 - \cos\varphi) + L - \sqrt{L^2 - R^2 \sin^2\varphi}\right] \tag{5}$$

Здесь Vc – объём камеры сгорания, D – диаметр цилиндра, R – радиус кривошипа, L – длина шатуна. Расчётное ядро реализовано в модуле engine_physics.py. При изменении любого входного параметра пересчёт всех термодинамических характеристик выполняется немедленно.

Интерфейс построен на библиотеке Viser с веб-архитектурой: Python-сервер управляет сценой через API, браузерный клиент выполняет рендеринг средствами Three.js. Трёхмерная модель кривошипно-шатунного механизма создана в Blender 4.2 и включает коленчатый вал, шатуны, поршни, гильзы цилиндров и клапанный механизм (рисунок 1). Анимация синхронизирована с расчётной угловой скоростью коленчатого вала [2].

Трёхмерная модель наглядно демонстрирует кинематическую связь между вращением коленчатого вала и возвратно-поступательным движением поршней, что соответствует закону изменения объёма V(φ) из формулы (5), непосредственно используемому в термодинамических расчётах.

На диаграмме P–V площадь замкнутой кривой цикла численно равна удельной работе. Сравнение циклов Отто и Дизеля при одинаковой максимальной температуре показывает, что цикл Дизеля охватывает большую

площадь, то есть обеспечивает более высокий КПД. На диаграмме T–S площадь под кривой подвода теплоты равна q_1, под кривой отвода – q_2. Прямоугольная форма цикла Карно соответствует теоретически максимальному КПД при тех же температурных пределах [1; 3].

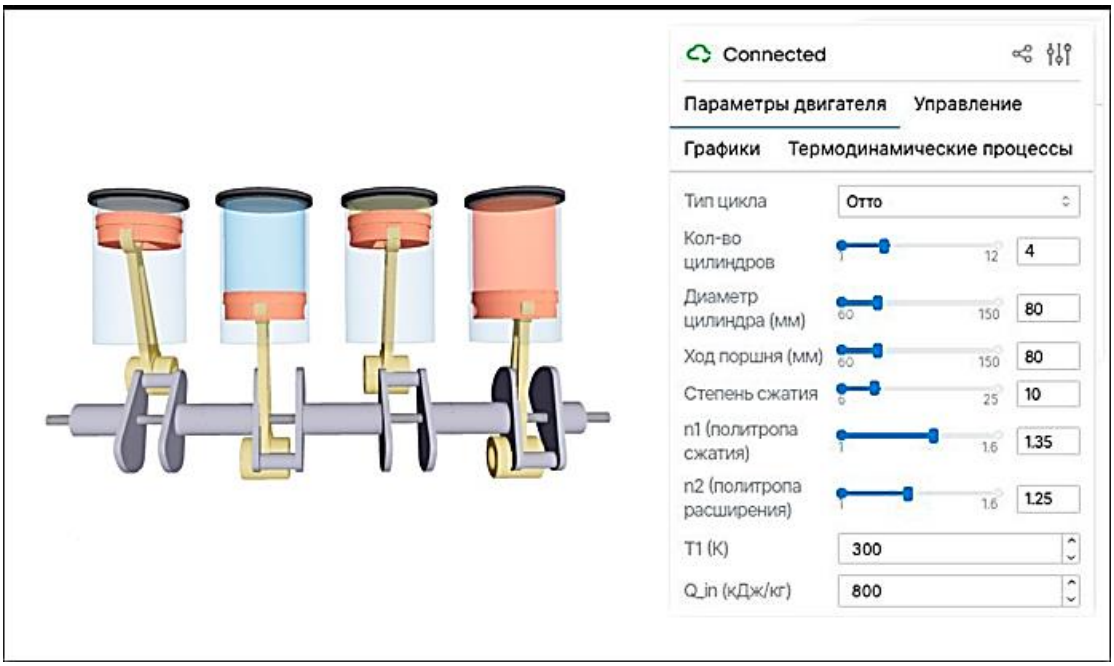


Рисунок 1 – Трёхмерная модель кривошипно-шатунного механизма и панель параметров двигателя

Модуль «Термодинамические процессы» позволяет строить изотермический, изобарный, изохорный и изоэнтропийный процессы при произвольных начальных условиях в любой из 12 систем координат с наложением нескольких кривых на один график (рисунок 2).

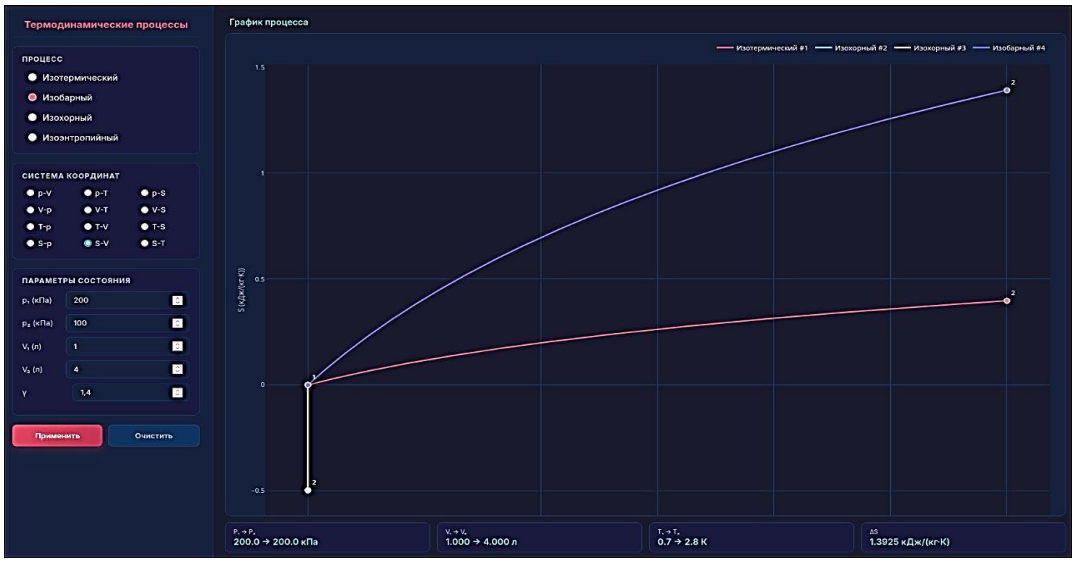


Рисунок 2 – Модуль «Термодинамические процессы»: наложение кривых нескольких процессов в системе S–V

Выбор библиотеки Viser обусловлен нативной поддержкой формата glTF/GLB. Сравнительный анализ приведён в таблице 1.

Полученные расчётные данные показывают, что термический КПД цикла Отто заметно возрастает с увеличением степени сжатия: при ε = 4 он составляет около 0,43, а при ε = 9 достигает 0,58. При этом скорость роста КПД постепенно снижается, так что увеличение ε сверх 10 даёт всё меньший прирост эффективности. Для цикла Дизеля картина несколько иная: при фиксированной степени сжатия рост степени предварительного

расширения ρ снижает КПД, что хорошо прослеживается на совмещённых P–V диаграммах. Это объясняется тем, что изобарный подвод теплоты занимает тем большую долю цикла, чем больше ρ, тогда как средняя температура теплоотдачи увеличивается медленнее температуры теплоподвода.

Таблица 1 – Сравнение библиотек по техническим критериям

Критерий	**Viser**	**DearPyGui**	**Tkinter**
Рендеринг	Three.js / WebGL	OpenGL / ImGui	Tk canvas
3D-модели glTF/GLB	Встроено	Ручная интеграция	Нет
Анимации glTF	Нативно	Не поддерживаются	Нет
Интерактивные графики	Plotly / HTML	ImPlot	matplotlib
Транспорт	WebSocket	Нативные вызовы	Tk event loop
Доступ с устройств	Любой браузер	Только десктоп	Только десктоп

Важной возможностью разработанного комплекса является анализ влияния показателя политропы n на форму индикаторной диаграммы. Как видно из диаграмм, увеличение n приводит к росту максимального давления в конце сжатия и, как следствие, к увеличению удельной работы цикла. Возможность задавать различные значения показателя политропы раздельно для процессов сжатия и расширения делает модель более приближённой к реальному рабочему процессу двигателя, поскольку условия теплообмена на этих тактах существенно различаются.

В результате была разработана программная система для компьютерного исследования термодинамических циклов ДВС на языке Python с применением библиотеки Viser. Физическая модель основана на уравнениях политропных процессов для идеального газа. Интерактивные диаграммы P–V и T–S позволяют исследовать влияние параметров ε, n, ρ на термический КПД и форму индикаторных кривых. Трёхмерная анимированная модель обеспечивает наглядную кинематическую связь между геометрией двигателя и расчётной функцией V(φ). Совокупность этих инструментов подтверждает пригодность комплекса как учебного средства для изучения термодинамики тепловых двигателей [3].

Список литературы

1. Двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов / В. Н. Луканин [и др.] ; под ред. В. Н. Луканина. – М. : Высшая школа, 2005. – 479 с.

2. Brent Yi. Viser: A Pythonic 3D Visualization Library [Электронный ресурс] / Brent Yi. – Режим доступа: https://viser.studio. – Дата доступа: 28.02.2026.

3. Хутская, Н. Г. Термодинамический расчёт циклов тепловых двигателей : учеб.-метод. пособие / Н. Г. Хутская, Г. И. Пальчёнок. – Минск : БНТУ, 2021. – 49 с.

4. Hoffstadt, J. DearPyGui: A Fast and Powerful GUI Toolkit for Python [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://dearpygui.readthedocs.io. – Дата доступа: 28.02.2026.

The paper presents results of computer simulation of thermodynamic cycles of internal combustion engines. The physical model is based on polytropic process equations for an ideal gas with constant heat capacity. Numerical implementation is performed in Python using the Viser library. The influence of the adiabatic index, compression ratio and pre-expansion ratio on thermal efficiency and the shape of P-V and T-S indicator diagrams is analysed. A 3D animated crankshaft mechanism provides a visual kinematic link between engine geometry and the cylinder volume law V(phi) used in thermodynamic calculations. Verification of the model showed agreement with analytical formulas within 0.1 %.

Насекайло Евгений Александрович, студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nasekailo007@gmail.com.

Семёнчик Даниил Андреевич, студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, fatebtwdisa@gmail.com.

Савчук Кирилл Андреевич, студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, haloneprog@gmail.com.

Научный руководитель – *Ситкевич Анастасия Леонидовна*, магистр физико-математических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, girl-physicist@mail.ru.

УДК 537.8

А. А. ОБРЯДОВА

РАСЧЁТ ПРОХОЖДЕНИЯ СВЕТА ЧЕРЕЗ ПЛАСТИНКУ, СОСТОЯЩУЮ ИЗ ДВУХ СЛОЁВ СО СВОЙСТВАМИ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО МЕТАМАТЕРИАЛА

Проведено теоретическое исследование прохождение электромагнитной волны через пластинку, состоящую из двух слоев гиперболического метаматериала, у которого компоненты тензора диэлектрической проницаемости отличаются знаками для поперечного и продольного направлений в слое. Разработана программа в численной системе MathCAD и изучены коэффициенты отражения, пропускания и поглощения для пластинок из чередующихся слоев со свойствами гиперболического метаматериала 1-го и 2-го типов. Полученные результаты могут найти применение при исследовании оптических свойств сильно анизотропных сред и для практических применений в виде фильтров электромагнитного излучения.

На предыдущей XXXIII Международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния» были представлены результаты расчета прохождения света через слой гиперболического метаматериала (ГММ) одного из двух типов I либо II, которые отличаются знаками компонент тензора диэлектрической проницаемости [1]. В данной работе будет представлено аналогичное исследование, но для пластинки, состоящей из двух слоев гиперболических материалов различны типов.

Как известно, метаматериалы представляют собой искусственные среды с субволновой структурой, обладающие необычными оптическими свойствами. Первоначальные исследования метаматериалов были сосредоточены на структурах, которые обладают как отрицательной диэлектрической проницаемостью, так и отрицательной проницаемостью (известными как дважды отрицательные среды), поскольку такие структуры очень перспективны для субволновой оптики, так как они обладают отрицательным преломлением. [2]. Отличительной особенностью гиперболических метаматериалов является то, что они обладают сильной анизотропией диэлектрической проницаемости в двух направлениях: вдоль и поперек структуры. Такие материалы могут быть получены с помощью чередования нанослоев из диэлектрика и металла или с помощью упорядоченного расположения металлических нанопроволок в диэлектрике. Область применимости таких материалов сосредоточены в основном в оптике: в качестве фильтров электромагнитного излучения, для создания оптических наноловушек, для усиления флуоресценции молекул, расположенных вблизи поверхности ГММ, и других приложений.

Целью работы является теоретическое исследование коэффициентов пропускания, отражения и поглощения электромагнитных волн пластинкой, состоящей из двух слоев со свойствами гиперболических метаматериалов и разработка программы в численной системе MathCAD для вычислений данных коэффициентов.

В настоящей работе рассматривается плоская волна, которая падает на пластинку, составленную из двух прилегающих слоев из различных материалов со свойствами гиперболических метаматериалов типов I и II. Пусть слои имеют толщины h_1 и h_2, над пластинкой и под пластинкой пусть находится воздух. Слои расположены перпендикулярно к оси z.

В результате решения поставленной задачи были получены формулы для расчетов коэффициентов отражения (R), пропускания (T) и поглощения ($A = 1 - R - T$) волны от пластинки:

$$T = \frac{1}{|A_0|^2 + |B_0|^2}\left(\frac{\mu_1}{\mu_4}\left|\frac{(1+a_{TE})(1+d_{TE})e^{i\beta_{2,TE}h}}{1+a_{TE}d_{TE}e^{2i\beta_{2,TE}h}}\right|^2|A_0|^2 + \right.$$

$$\left. + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_4}\left|\frac{(1+a_{TM})(1+d_{TM})e^{i\beta_{2,TM}h}}{1+a_{TM}d_{TM}e^{2i\beta_{2,TM}h}}\right|^2|B_0|^2\right)\frac{\operatorname{Re}\beta_4}{k_1\cos\theta_0}, \tag{1}$$

$$R = \frac{1}{|A_0|^2 + |B_0|^2}\left(\left|\frac{a_{TE} + d_{TE}e^{2i\beta_{2,TE}h}}{1+a_{TE}d_{TE}e^{2i\beta_{2,TE}h}}\right|^2|A_0|^2 + \left|\frac{a_{TM} + d_{TM}e^{2i\beta_{2,TM}h}}{1+a_{TM}d_{TM}e^{2i\beta_{2,TM}h}}\right|^2|B_0|^2\right), \tag{2}$$

где A_0 и B_0 – амплитуды падающей волны; Θ – угол, который составляет вектор, указывающий направление распространения волны, с отрицательным направлением оси z. В найденных выражениях случай $A_0 \neq 0$, $B_0 = 0$ – соответствует падающей волне s-типа (TM-волна), а случай $A_0 = 0$, $B_0 \neq 0$ – соответствует падающей волне p-типа (TE-волна). Коэффициенты ТМ-типа, входящие в (2) и (3), имеют вид ($j = 1, 4$):

$$a_{TM} = \frac{\varepsilon_{2,\rho}k_1\cos\theta_0 - \varepsilon_1\beta_{2,TM}}{\varepsilon_{2,\rho}k_1\cos\theta_0 + \varepsilon_1\beta_{2,TM}}, \quad b_{TM} = \frac{\varepsilon_3\beta_{2,TM} - \varepsilon_{2,\rho}\beta_3}{\varepsilon_3\beta_{2,TM} + \varepsilon_{2,\rho}\beta_3}, \tag{3}$$

$$c_{TM} = \frac{\varepsilon_{3,\rho}\beta_{2,TM} - \varepsilon_{2,\rho}\beta_{3,TM}}{\varepsilon_{3,\rho}\beta_{2,TM} + \varepsilon_{2,\rho}\beta_{3,TM}}, \quad d_{TM} = \frac{\varepsilon_4\beta_{3,TM} - \varepsilon_{3,\rho}\beta_4}{\varepsilon_4\beta_{3,TM} + \varepsilon_{3,\rho}\beta_4}, \quad \beta_{j,TM} = \sqrt{k_0^2\varepsilon_{j,\rho}\mu_j - \frac{\varepsilon_{j,\rho}}{\varepsilon_{j,z}}k_1^2\sin^2\theta_0}, \tag{4}$$

$\beta_4 = \sqrt{k_4^2 - k_1^2\sin^2\theta_0}$, в которых $k_1 = k_0\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}$ и $k_4 = k_0\sqrt{\varepsilon_4\mu_4}$ – волновые числа в средах 1 и 4. Коэффициенты ТЕ-типа a_{TE}, b_{TE}, c_{TE}, d_{TE}, $\beta j_{,TE}$ получаются из соответствующих коэффициентов ТЕ-типа с помощью одновременной замены диэлектрической и магнитной проницаемостей ε ↔ μ (индексы опущены).

На рисунках 1 и 2 приведены графики для коэффициентов отражения и пропускания R и T, полученные с помощью программирования формул (1) и (2) в среде MathCAD, как функции угла падения Θ. Зависимости представлены для частного случая пластинки толщиной $k_0h = 1$ при $\varepsilon_{2\rho} = 5 + 0{,}1\cdot i$, $\varepsilon_{2z} = -5 + 0{,}1\cdot i$ (ГММ-I) и $\varepsilon_{2\rho} = -5 + 0{,}1\cdot i$, $\varepsilon_{2z} = 5 + 0{,}1\cdot i$ (ГММ-II) . Диэлектрические проницаемости сред 1 и 4 равны единице.

На рисунках 3 и 4 также приведены графики коэффициентов отражения и пропускания R и T, но уже для пластинки толщиной $k_0h = 10$.

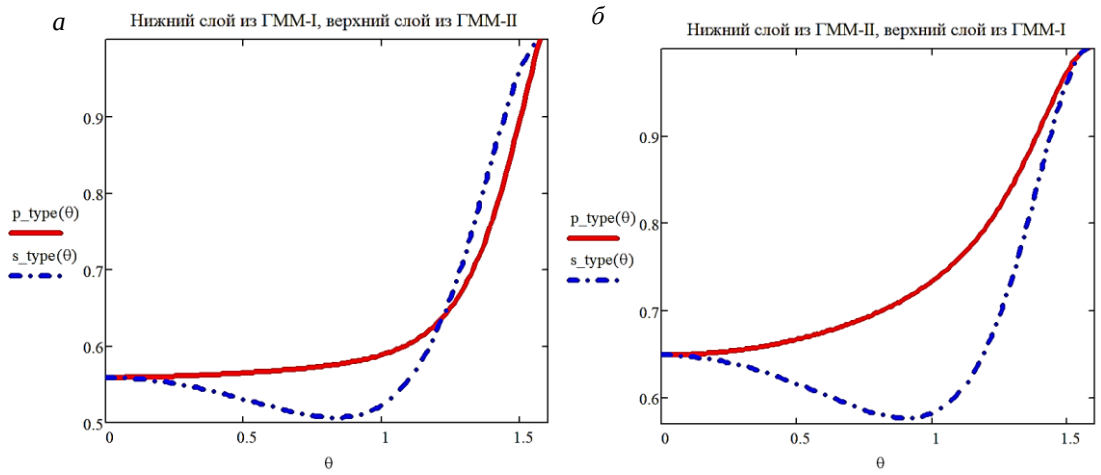


Рисунок 1 – Коэффициенты отражения для пластинки, состоящей из двух слоёв гиперболических метаматериалов, где (а) нижний слой состоит из ГММ-I, а верхний слой состоит из ГММ-II и (б) наоборот, нижний из ГММ-II, а верхний из ГММ-I для волн *s*- и *p*-типов как функция θ при толщине пластинки k_0h = 1

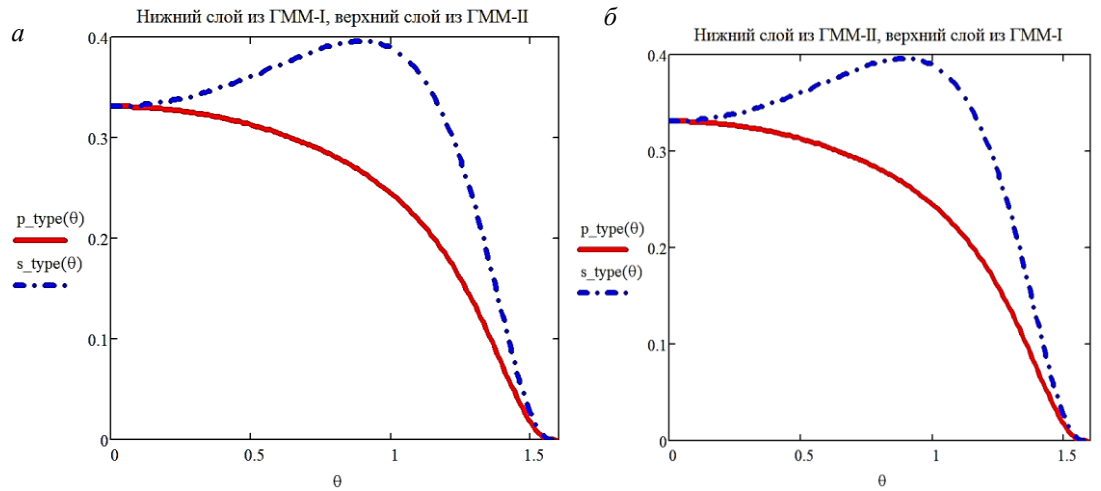


Рисунок 2 – Коэффициенты пропусканиия для пластинки, состоящей из двух слоёв гиперболических метаматериалов, где (а) нижний слой состоит из ГММ-I, а верхний слой состоит из ГММ-II и (б) наоборот, нижний из ГММ-II, а верхний из ГММ-I для волн *s*- и *p*-типов как функция θ при толщине пластинки k_0h=1

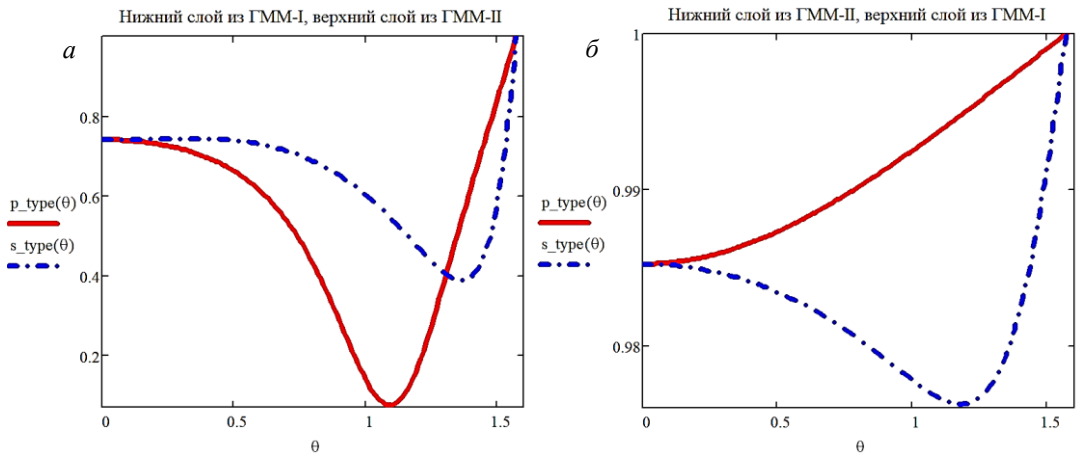


Рисунок 3 – Коэффициенты отражения для пластинки, состоящей из двух слоёв гиперболических метаматериалов, где (а) нижний слой состоит из ГММ-I, а верхний слой состоит из ГММ-II и (б) наоборот, нижний из ГММ-II, а верхний из ГММ-I для волн *s*- и *p*-типов как функция θ при толщине пластинки k_0h = 10

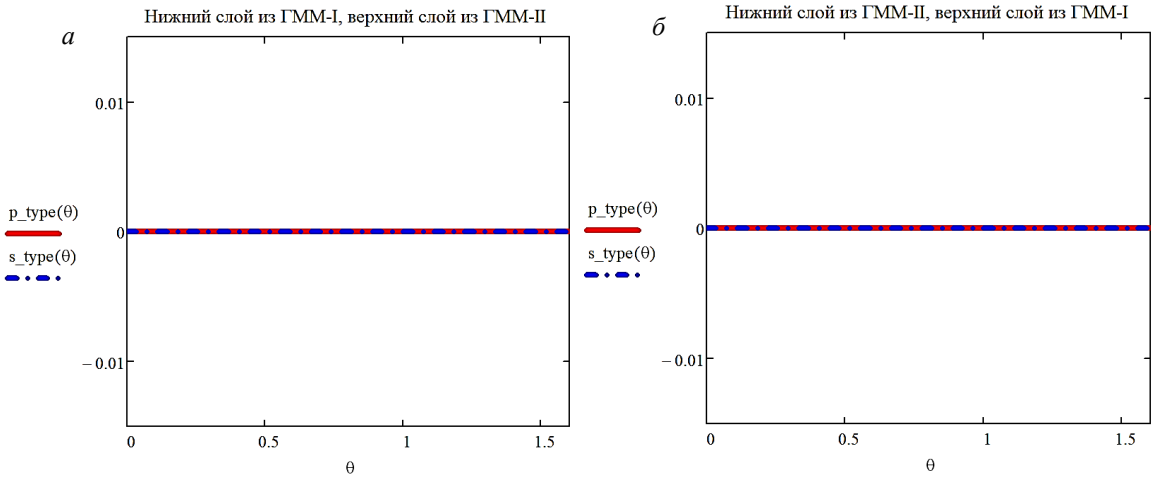


Рисунок 4 – Коэффициенты пропусканиия для пластинки, состоящей из двух слоёв гиперболических метаматериалов, где (а) нижний слой состоит из ГММ-I, а верхний слой состоит из ГММ-II и (б) наоборот, нижний из ГММ-II, а верхний из ГММ-I для волн *s*- и *p*-типов как функция θ при толщине пластинки k_0h = 10

Из полученных выше рисунков следует, что в том случае, когда относительная толщина двухслойной пластинки из ГММ значительно меньше единицы (т. е. в случае оптически тонкого слоя с k_0h <<1) независимо от того какой слой является первым: из ГММ-I или из ГММ-II, коэффициенты отражения и пропускания приблизительно одинаковые. При этом это не зависит от угла падения волны и ее типа (*s* или *p*).

По мере увеличения толщины коэффициенты отражения для двух случаев двухслойной пластинки начинают меняться, и заметное отличие для них возникает уже для случая k_0h = 1. Однако коэффициенты пропускания при этом все еще примерно совпадают.

Для случая очень толстой пластинки (k_0h = 10) коэффициенты пропускания стремятся к нулю, т. к. пластинка сильно поглощает падающее излучение (слой из ГММ-II имеет металлические свойства). Из полученных рисунков также видно, что коэффициенты пропускания для оптически толстого слоя для двухслойной пластинки в случаях верхнего слоя из ГММ-I и из ГММ-II – заметно отличаются.

Таким образом, в настоящей работе были построены и проанализированы графики зависимости коэффициентов отражения и пропускания от угла падения электромагнитной волны для двухслойной пластинки, составленной из гиперболического метаматериала первого и второго типов. Была обнаружена сложная картина зависимости от угла падения, толщины пластинки и свойств ГММ. Выявлены общие закономерности исследуемых коэффициентов, связанные с увеличением толщины слоев метаматериалов. Полученные результаты могут быть использованы для разработки фильтров электромагнитного излучения на основе слоев из ГММ.

Список литературы

1. Обрядова, А. А. Расчет прохождения света через пластинку со свойствами гиперболического метаматериала / А. А. Обрядова // Физика конденсированного состояния : материалы XXXIII Междунар. науч -практ. конф. аспир., магистр. и студ. (г. Гродно, 3–4 апр. 2025 г.) / ГрГУ им. Янки Купалы, физ.-техн. фак.; редкол.: Г. А. Гачко (гл. ред.), Н. Г. Валько (зам. гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2025. – С. 168–170.
2. Сарычев, А. К. Электродинамка метаматериалов / А. К. Сарычев, В. М. Шалаев. – М. : Научный мир, 2011. – 224 с.

A theoretical study was conducted on electromagnetic wave propagation through a plate composed of two layers of a hyperbolic metamaterial with permittivity tensor components of opposite signs in the transverse and longitudinal directions within the layer. A program was developed in the MathCAD numerical system, and the reflection, transmission, and absorption coefficients were studied for plates composed of alternating layers with the properties of Type 1 and Type 2 hyperbolic metamaterials. The obtained results can be used in studying the optical properties of highly anisotropic media and for practical applications, such as electromagnetic radiation filters.

Обрядова Анжела Александровна, преподаватель-стажер кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, obrydova_aa@grsu.by.

Научный руководитель – *Гузатов Дмитрий Викторович*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, guzatov@grsu.by.

УДК 539.19:004.942

Е. В. ОБУХОВСКИЙ, А. А. ХУДИК, А. В. НИКИТЧИК, Я. П. ПЕТРЕВИЧ

ТЕХНОЛОГИИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В работе рассматриваются технологии программирования для разработки приложений для 3D-моделирования технологического оборудования. Приведено описание применения библиотек Python (Trimesh [2], PyVista [3], PySide6 [8]) и C# (OpenTK [4], Assimp [5]) для визуализации 3D моделей объектов. Представлены решения по интеграции графического интерфейса с базами данных PostgreSQL [6] для интерактивного анализа параметров и расчетов.

Моделирование в физике конденсированного состояния служит теоретическим фундаментом и инженерным инструментом для разработки и эксплуатации технологического оборудования. Оно позволяет предсказывать новые материалы с нужными свойствами, понимать и контролировать сложные физико-химические процессы на атомном уровне, оптимизировать параметры работы оборудования для повышения выхода качественной продукции, сокращать время и стоимость разработки новых технологических процессов. Важным аспектом производства с использованием технологического оборудования являются также обучающие системы, которые позволяют подготовить специалистов согласно требованиям предприятия. В настоящее время современными инструментами обучения являются технологии виртуальной реальности [1]. Использование виртуальных тренажеров позволяет обеспечить обучение профессиональным навыкам сотрудников в условиях физической недоступности или простоя производственного оборудования повлечет большие издержки производства. При разработке виртуальных тренажеров моделирование следует учитывать как фундаментальную основу для поведенческой логики тренажера. Разработка большинства приложений виртуальной реальности невозможно без 3D-моделирования.

Для отображения 3D моделей центробежных насосов в разработанном программном обеспечении используются специализированная python библиотека Trimesh [2], предназначенная для загрузки, обработки и анализа полигональных сеток в среде Python. При выборе пользователем конкретного экземпляра насосного оборудования система обращается к базе данных PostgreSQL [6], извлекая путь к файлу модели в формате .obj. Процедура считывания геометрии реализуется с помощью метода trimesh.load(). Этот метод читает данные файла из локальной директории и формирует на их основе структурированную сетку в оперативной памяти компьютера, подготавливая ее к последующему рендерингу.

Непосредственное отображение и взаимодействие с моделью проходит с помощью встроенного метода show(). Эта функция позволяет запустить отдельное интерактивное окна просмотра, в котором геометрия оборудования отрисовывается с использованием аппаратного ускорения. Пользовательский интерфейс просмотрщика позволяет детально изучить конструктивные особенности выбранного оборудования: поддерживается вращение, панорамирование и масштабирование трехмерного объекта в режиме реального времени. Подобный подход значительно повышает наглядность разрабатываемой системы и упрощает визуально-конструктивный анализ исследуемого оборудования.

С архитектурной точки зрения, использование связки Python и Trimesh [2] является легковесной альтернативой внедрению тяжелых САПР-компонентов. Рендеринг осуществляется через графический интерфейс Pyglet на базе OpenGL, что позволяет получить высокую производительность даже на офисных компьютерах без установки специализированного инженерного ПО. Механизм обработки исключений изолирует процесс визуализации, гарантируя, что возможные ошибки при чтении поврежденной геометрии не повлияют на стабильность подключения к базе данных и работу основного интерфейса

Для визуализации трёхмерных моделей станков в приложении была использована библиотека PyVista [3], разработанная на основе VTK и предназначенная для интерактивной работы с 3D-данными на языке Python. PyVista [3] предоставляет удобный API, который позволяет загружать полигональные сетки, управлять сценой отображения и организовывать интерактивный просмотр без необходимости прямого взаимодействия с низкоуровневыми компонентами VTK.

Перед загрузкой трёхмерных моделей в PyVista [3] их необходимо было предварительно преобразовать из инженерного формата STEP в сеточный формат OBJ с помощью САПР FreeCAD. Это связано с тем, что PyVista [3] поддерживает только формат OBJ для прямой загрузки через метод pv.read(). В окне просмотра можно настроить три источника освещения, сглаживание поверхностей (smooth_shading), параметры зеркального отражения (specular, specular_power) и положение камеры в изометрии. Всё это вместе обеспечивало реалистичное и наглядное отображение геометрии станка. Графический интерфейс приложения, созданного с использованием библиотеки Tkinter, делился на две основные части. В левой панели располагался список доступных станков. Когда пользователь выбирал станок, в правой части экрана появлялась подробная таблица технических характеристик. Технические характеристики станков хранились в реляционной базе данных PostgreSQL [6]. Подключение к ней осуществлялось через адаптер psycopg2 [7]. Добавление нового станка в каталог не требовало изменений в коде. Достаточно было лишь разместить OBJ-файл в директории проекта и добавить соответствующую запись в базу данных.

Для отображения трёхмерных моделей станков, мы использовали библиотеку PyVista – предназначенную для работы с 3D-данными на Python. Для подготовки трёхмерных моделей к отображению в приложении мы использовали промежуточную конвертацию в формат OBJ

В окне просмотра, созданном на основе PyVista, мы настроили параметры освещения, сглаживания и положения камеры .Технические характеристики станков были сохранены в реляционной базе данных PostgreSQL, к которой приложение подключалось с помощью адаптера psycopg2. Графический интерфейс был разработан с использованием библиотеки Tkinter. Он предоставлял пользователю список моделей, таблицу параметров и кнопку для вызова трёхмерного просмотра выбранного станка. Добавление новой модели сводилось к размещению соответствующего OBJ-файла в директории проекта и внесению записи о станке в базу данных.

Для реализации визуализации трехмерных моделей конденсированного состояния была использована библиотека OpenTK – оболочка для работы с OpenGL в среде C#. OpenTK обеспечивает доступ к современному графическому API, позволяет создавать контексты OpenGL внутри WinForms-приложений и управлять рендерингом, шейдерами, буферами вершин и трансформациями матриц. С помощью этой библиотеки реализовано интерактивное управление моделями освещения, вращением, масштабированием и освещением, что позволяет пользователю объединить структуру в первое время.

Для загрузки и обработки 3D-моделей применяется Assimp (Open Asset Import Library) – кроссплатформенная библиотека, поддерживающая множество форматов файлов, включая OBJ, FBX и COLLADA. Assimp обеспечивает импорт данных, нормалей и топологии объектов, что позволяет легко интегрировать реальные молекулярные модели в программу. Комбинация OpenTK и Assimp позволила создать удобный инструмент для изучения физических свойств молекул и других объектов в конденсированном состоянии.

Программное приложение разработано с использованием технологий платформы .NET, языка программирования C# и среды разработки Visual Studio. Для построения пользовательского интерфейса используется Windows Forms, что обеспечивает удобное взаимодействие пользователя с программой, включая загрузку моделей, изменение параметров визуализации и управление отображением трёхмерной сцены.

Список литературы

1. Асланов, Р. Э. Модели и методы разработки подсистемы подготовки специалистов автоматизированной системы управления производством с использованием симуляторов виртуальной реальности / Р. Э. Асланов, А. А. Большаков // Изв. С.-Петербург. гос. технол. ин-та (техн. ун-та). – 2023. – № 65. – С. 81–89.

2. Dawson-Haggerty, S. Trimesh [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://trimsh.org/.

3. Sullivan, C. B. PyVista: 3D plotting and mesh analysis through a streamlined interface for the Visualization Toolkit (VTK) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doi.org/10.21105/joss.01450/.

4. The Open Toolkit library. OpenTK Documentation [Электронный ресурс].– Режим доступа: https://opentk.net/learn/

5. Assimp. Open Asset Import Library [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.assimp.org/.

6. PostgreSQL. PostgreSQL Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.postgresql.org/docs/.

7. Psycopg.psycopg2 – PostgreSQL database adapter for Python [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.psycopg.org/docs/.

8. The Qt Company. PySide6 Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doc.qt.io/qtforpython-6.

The paper examines programming technologies for creating 3D modeling systems of technological equipment. The experience of applying Python libraries (Trimesh [2], PyVista, PySide6 [8]) and C# (OpenTK, Assimp) for visualization is described. Solutions for integrating graphical interfaces with PostgreSQL [6] databases for interactive parameter analysis and calculations are presented.

Обуховский Егор Валерьевич, студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, egorcom061@gmail.com.

Худик Александр Александрович, студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, sashahudik921@gmail.com.

Никитчик Алексей Васильевич студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nikitchiklesha43@gmail.com.

Петревич Ярослав Павлович студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, petrevich07@mail.ru.

Научный руководитель – *Белко Александр Витальевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, av_belko@grsu.by.

537.539

М. У. ОТАБАЕВ, И. Д. ПАЛВАНАЗАРОВА, И. Дж. ЯДГАРОВ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАССЕЯННЫХ ИОНОВ Ar^+ С ПОВЕРХНОСТИ InGaP(001)<110>

С помощью компьютерного моделирования исследована процесс рассеяние ионов Ar^+ с дефектной поверхности InGaP(001) <110> при бомбардировке под малыми углами падения с начальной энергией E_0 = 5 кэВ. Получены и анализированы энергетические распределения рассеянных ионов. Показано, что энергетическом распределении наблюдаются высоко интенсивные пики, соответствующие рассеянным ионам от поверхностной атомной цепочки и полуканала. С увеличением угла падения бомбардирующих частиц наблюдаются мало интенсивные пики, и они соответствуют к рассеянным ионам от дефекта. Наши расчёты показали, что точечные дефекты влияют на процесс рассеяния ионов и отсутствие атомов на поверхностном атомном ряде приводить к увеличении неупругих потерь энергии ионов.

Взаимодействие ускоренных ионов с поверхностью твёрдых тел является одним из ключевых направлений современной физики конденсированного состояния и физики поверхности. Особый интерес представляет процесс рассеяния ионов инертных газов, в частности ионов аргона (Ar^+), поскольку благодаря химической инертности аргон практически не вступает в химические реакции с мишенью и позволяет исследовать преимущественно физические механизмы взаимодействия – упругое и неупругое рассеяние, перенос энергии, каскады столкновений и распыление атомов поверхности.

Полупроводниковые соединения типа AIII–BV, такие как InGaP, широко применяются в оптоэлектронике, солнечных элементах и высокочастотных приборах. Кристаллографическая ориентация поверхности (001) является технологически наиболее востребованной, так как именно на ней осуществляется эпитаксиальный рост гетероструктур. Однако реальные поверхности InGaP(001) неизбежно содержат дефекты – вакансии, междоузельные атомы, ступени, дислокации, антиузловые дефекты и примесные включения. Наличие дефектов существенно изменяет потенциальный рельеф поверхности и влияет на механизмы рассеяния падающих ионов.

Процесс рассеяния ионов Ar^+ с дефектной поверхности InGaP(001) определяется совокупностью ядерных и электронных взаимодействий. При энергиях от сотен электронвольт до нескольких килоэлектронвольт основной вклад в изменение траектории вносит упругое ядерное торможение, описываемое бинарными столкновениями с атомами индия, галлия и фосфора. Дефекты структуры нарушают периодичность кристаллической решётки, что приводит к изменению каналирования и блокирования ионов, перераспределению углов рассеяния и вероятности обратного отражения. Энерегетический спектр рассеянных ионов Ar^+ с поверхности InGaP(001)<110> при разных углах падениях и с начальной энергией 5 кэВ. Исследование энергетических распределений рассеянных ионов Ar^+ при взаимодействии с кристаллической поверхностью InGaP(001)<110> представляет собой эффективный инструмент диагностики атомной структуры и дефектного состояния верхних слоёв полупроводника. Выбор кристаллографического направления <110> обусловлен тем, что в данной ориентации формируются открытые полуканалы между атомными рядами, что существенно влияет на характер ионного рассеяния и формирование энергетического спектра. В наших расчётах использовались метод приближении парных столкновений. При исследовании процессов рассеяния ионов в твёрдых телах возникает сложная задача описания взаимодействия падающей частицы одновременно с большим числом атомов кристаллической решётки. Полное квантово-механическое или многотельное описание такой системы чрезвычайно трудоёмко.Для энергий ионов от сотен эВ до десятков кэВ широко применяется метод приближения парных столкновений (Binary Collision Approximation, BCA). Его основная идея состоит в том, что взаимодействие иона

с веществом рассматривается как последовательность независимых двухчастичных (бинарных) столкновений между падающим ионом и отдельными атомами мишени.Таким образом, сложная многотельная задача сводится к цепочке простых задач классической механики для двух частиц. На рис. 1 представлена энергетический спектр рассеянных ионов Ar^+ носит многопиковый характер. Наличие нескольких максимумов связано с тем, что ионы могут рассеиваться от атомов, расположенных на разных глубинах и в различных кристаллографических позициях. В частности, в спектре наблюдаются- высокоэнергетический пик, соответствующий рассеянию от атомов поверхностного атомного ряда. Пик средней энергии, связанный с рассеянием от атомов, расположенных на дне полуканала вдоль направления <110>. Низкоэнергетический вклад (пик или уширение), обусловленный рассеянием на дефектах структуры и множественными столкновениями. Каждый из этих вкладов формируется в результате различных микроскопических механизмов взаимодействия ионов с твёрдым телом. Первый, наиболее высокоэнергетический пик формируется за счёт квазибинарных упругих столкновений иона Ar^+ с атомами индия, галлия или фосфора, принадлежащими верхнему атомному ряду поверхности InGaP(001). Так как взаимодействие происходит с атомами первого слоя без существенного проникновения вглубь кристалла, энергетические потери минимальны и спектральный пик располагается в области максимальных энергий. Этот пик является узким, что свидетельствует о преимущественно однократных упругих столкновениях и высокой упорядоченности поверхностного атомного ряда. При ориентации пучка вдоль направления <110> формируются полуканалы – пространственные промежутки между атомными рядами. Часть ионов проникает вглубь структуры вдоль этих направлений, испытывая слабое отклонение до момента столкновения с атомами, расположенными на дне полуканала. В этом случае ион проходит больший путь в кристалле, увеличиваются потери энергии, возрастает вероятность малых последовательных отклонений. В результате формируется второй пик, расположенный при меньших энергиях по сравнению с поверхностным максимумом. Его положение определяется суммарными потерями энергии до и после основного столкновения. Третий вклад в энергетический спектр связан с наличием дефектов поверхности и приповерхностного слоя. Энергетически это проявляется в виде-низкоэнергетического пика, либо протяжённого «хвоста» спектра, заметного уширения основного распределения. В нашем случае наблюдалось в виде протяжённого «хвоста». Ионы, рассеянные на дефектах, как правило, теряют больше энергии вследствие увеличенного пути внутри кристалла и хаотизации траекторий. Поэтому соответствующий вклад располагается в области пониженных энергий. Интенсивность данного компонента напрямую связана с концентрацией дефектов и может использоваться как количественная характеристика степени радиационного повреждения или структурной неупорядоченности поверхности.

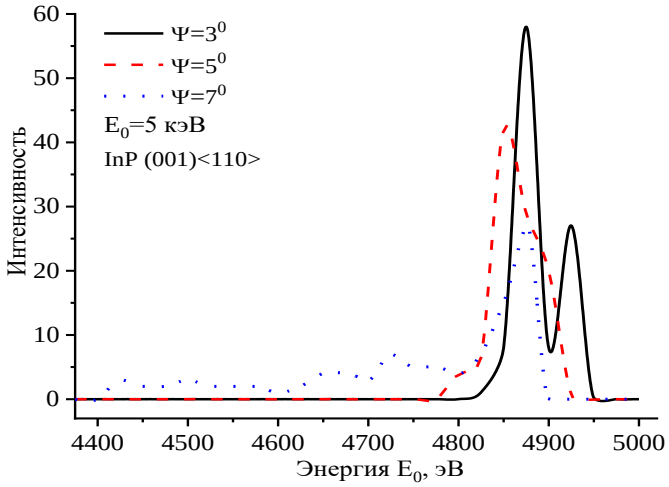


Рисунок 1 – Энерегетический спектр рассеянных ионов Ar^+ с поверхности InGaP(001)<110> при разных углах падениях и с начальной энергией 5 кэВ

Таким образом, изучение процесса рассеяния ионов аргона с дефектной поверхности InGaP(001) имеет как фундаментальное значение для понимания микроскопических механизмов ион-твердотельного взаимодействия, так и прикладное – для оптимизации технологий ионной обработки, травления и диагностики полупроводниковых структур.

Список литературы

1. Warren, W.W. Ion scattering from semiconductor surfaces / W.W. Warren, R.T. Tung // Surf. Sci. Rep. – 1996. – № 24.
2. Adler, D. Ion-Solid Interactions: Fundamentals and Applications / D. Adler. – Cambridge University Press, 1998.
3. Rettner, C. T. Simulation of low-energy Ar^+ scattering at surfaces with defects / C. T. Rettner, M. W. Finnis, F. Cleri, A. Rosengren // Phys. Rev. B. – 1997. – № 56.

Using computer simulation, we studied the scattering of Ar^+ ions from a defective InGaP(001) <110> surface bombarded at small incidence angles with an initial energy of $E_0 = 5$ keV. Energy distributions of the scattered ions were obtained and analyzed. It was shown that the energy distribution exhibits highly intense peaks corresponding to ions scattered from the surface atomic chain and half-channel. As the incidence angle of the bombarding particles increases, low-intensity peaks are observed, which correspond to ions scattered from the defect. Our calculations showed that point defects influence ion scattering, and the absence of atoms in the surface atomic row leads to increased inelastic ion energy losses.

Отабаев Мехрож Учкун угли, магистрант Ургенчского государственного университета, Ургенч, Республика Узбекистан, uchkunk@mail.ru.

Палваназаров Ильмира Муродбековна, магистрант, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Республика Узбекистан, uchkunk@mail.ru.

Научный руководитель – *Ядгаров Ишмумин Джаббарович*, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией Института ион-плазменных технологий, заведующий кафедрой физики Ургенчского государственного университета, Ургенч, Республика Узбекистан, uchkunk@mail.ru.

УДК 539.1

Н. А. ПАШКОВИЧ

РАСЧЁТ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО СПЕКТРА ФУЛЛЕРЕНА C_{60} ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ КВАНТОВОЙ ХИМИИ

Методами квантовой химии AM1 и PM3 проведена оптимизация структуры фуллерена C_{60} и рассчитан его колебательный спектр. Рассмотрены четыре ИК-активные колебательные моды симметрии F_{1u} с наибольшей интенсивностью. Полученные результаты сопоставлены с данными, рассчитанными методом теории функционала плотности (DFT), и с экспериментальными значениями из литературы.

Фуллерены представляют собой молекулярные аллотропные формы углерода, структура которых образована исключительно атомами C, замкнутыми в выпуклый многогранник. Согласно теореме Эйлера, для формирования замкнутой углеродной поверхности из шестиугольных и пятиугольных циклов необходимо ровно двенадцать пятиугольников при произвольном числе шестиугольников. Название данного класса соединений восходит к имени американского архитектора Р. Б. Фуллера, чьи геодезические купольные конструкции обнаруживают структурное сходство с этими молекулами [1].

Наиболее симметричным и широко изученным представителем семейства фуллеренов является C_{60}, открытый в 1985 году Х. Крото, Р. Смолли и Р. Кёрлом путём лазерного испарения графита [1]. Молекула C_{60} состоит из 60 эквивалентных атомов углерода, расположенных в вершинах усечённого икосаэдра: двадцати правильных шестиугольников и двенадцати правильных пятиугольников, при этом ни одна пара пятиугольников не имеет общего ребра (правило изолированных пятиугольников). Молекула принадлежит точечной группе симметрии I_h и имеет диаметр около 0,71 нм; длины связей C–C составляют 0,140 нм для связей, общих для двух шестиугольников, и 0,145 нм для связей на границе шестиугольника и пятиугольника [2].

Высокая симметрия молекулы C_{60} определяет её исключительные физические и химические свойства. Молекула обладает развитой π-электронной системой, обусловливающей способность принимать электроны и проявлять свойства многоэлектронных редокс-агентов. В твёрдом состоянии C_{60} образует молекулярный кристалл с температурой плавления около 1180 °C, а при легировании щелочными металлами приобретает металлические и сверхпроводящие свойства [1; 2].

Колебательный спектр молекулы несёт информацию о её геометрической структуре, силовых константах и характере химических связей. Для фуллерена C_{60} теория групп предсказывает 174 нормальных колебания ($3N - 6 = 174$ при $N = 60$), из которых в инфракрасном (ИК) спектре активны лишь четыре моды симметрии F_{1u}, а в рамановском – десять мод (два типа A_g и восемь типа H_g). Сопоставление рассчитанных и экспериментальных значений частот является надёжным тестом применимости квантово-химических методов к данной системе [2, 3].

Для квантово-химического моделирования фуллеренов широко применяются полуэмпирические методы, сочетающие приближения теории Хартри – Фока с параметризацией на основе экспериментальных данных. Такой подход позволяет существенно сократить вычислительные затраты по сравнению с неэмпирическими методами при сохранении приемлемой точности для большинства структурных и спектральных характеристик [3].

Метод AM1 (Austin Model 1) разработан М. Дж. С. Дьюаром и соавторами в 1985 году как усовершенствование метода MNDO (Modified Neglect of Diatomic Overlap). В AM1 введены дополнительные гауссовы функции для описания кор-кор отталкивания, что позволяет точнее воспроизводить геометрию и теплоты образования органических соединений. Метод параметризован по широкому набору экспериментальных термохимических данных [3].

Метод PM3 (Parametric Method 3) предложен Дж. Дж. П. Стюартом в 1989 году. При сохранении формализма MNDO в PM3 применена автоматизированная процедура оптимизации параметров по расширенной экс-

периментальной базе данных, включающей более широкий круг соединений. По сравнению с AM1 метод PM3 демонстрирует, как правило, более высокую точность при расчёте энергий активации и термохимических свойств [3].

В качестве референсного метода в настоящей работе использованы результаты расчёта методом теории функционала плотности (DFT, уровень B3LYP/6-31G(d)). Метод DFT учитывает эффекты электронной корреляции через функционал обменно-корреляционной энергии и обеспечивает существенно более высокую точность по сравнению с полуэмпирическими подходами. Вместе с тем расчёт на DFT-уровне для системы размерности C_{60} требует применения высокопроизводительных вычислительных комплексов [4], тогда как полуэмпирические методы допускают расчёт на персональном компьютере.

Перед расчётом колебательных частот проводилась оптимизация геометрии молекулы – нахождение конфигурации, соответствующей минимуму полной потенциальной энергии. Расчёт нормальных частот для неоптимизированной структуры лишён физического смысла, поскольку значения частот принципиально зависят от отклонения геометрии от равновесного положения. Оптимизация выполнена методом сопряжённых градиентов Полака–Рибьера, обеспечивающим эффективную сходимость для молекул с большим числом степеней свободы [3].

Для каждого из применённых методов были определены четыре колебательные моды симметрии F_{1u} с наибольшей ИК-интенсивностью. Выбор этих мод обусловлен правилами отбора для молекул группы симметрии I_h: только указанные четыре моды являются ИК-активными и доступны для прямого экспериментального наблюдения [2]. Результаты расчёта сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Частоты (ν, $см^{-1}$) и интенсивности (I, КМ/моль) четырёх ИК-активных мод F_{1u} фуллерена C_{60}, рассчитанные методами PM3, AM1 и DFT

Мода	Параметр	PM3	AM1	DFT (B3LYP/6-31G(d))
$F_{1u}(1)$	ν, $см^{-1}$	557,15	573,50	536,83
	I, КМ/моль	5,546	2,963	27,517
$F_{1u}(2)$	ν, $см^{-1}$	733,28	775,51	586,25
	I, КМ/моль	1,756	0,570	14,651
$F_{1u}(3)$	ν, $см^{-1}$	1377,15	1405,02	1213,17
	I, КМ/моль	2,613	4,880	6,432
$F_{1u}(4)$	ν, $см^{-1}$	1708,12	1752,49	1463,26
	I, КМ/моль	18,339	15,615	10,783

Анализ данных таблицы 1 позволяет установить ряд закономерностей. Прежде всего, оба полуэмпирических метода систематически завышают значения колебательных частот по сравнению с DFT: отклонение составляет от 3,7 до 25,1 % для PM3 и от 6,9 до 32,3 % для AM1. Наиболее значительное расхождение наблюдается для моды $F_{1u}(2)$: DFT предсказывает 586,25 $см^{-1}$, тогда как PM3 даёт 733,28 $см^{-1}$, а AM1 – 775,51 $см^{-1}$. Указанная систематическая переоценка частот характерна для полуэмпирических методов и объясняется упрощённым описанием электрон-электронного взаимодействия в рамках приближения MNDO [3].

Наиболее интенсивной модой по данным DFT является $F_{1u}(1)$ (27,517 КМ/моль), тогда как для PM3 и AM1 доминирующей выступает $F_{1u}(4)$ с интенсивностью 18,339 и 15,615 КМ/моль соответственно. Значительное занижение интенсивности моды $F_{1u}(1)$ в PM3 (5,546 КМ/моль) и AM1 (2,963 КМ/моль) по сравнению с DFT (27,517 КМ/моль) свидетельствует о том, что полуэмпирические методы недооценивают дипольный момент колебания, связанного с деформациями оболочки молекулы. Частоты PM3 в целом ближе к результатам DFT, чем частоты AM1 (среднее отклонение 17,4 % и 22,0 % соответственно), что согласуется с известными данными о более высокой точности PM3 при описании колебательных характеристик углеродных систем [3].

Для оценки достоверности полученных результатов проведено их сопоставление с экспериментальными данными по ИК-спектру фуллерена C_{60}. В качестве источника экспериментальных значений использована работа [5], в которой приводятся частоты четырёх ИК-активных мод: 528, 577, 1183 и 1429 $см^{-1}$. Расчётные и экспериментальные значения частот, а также относительные отклонения от эксперимента (Δ) приведены в таблице 2.

Метод DFT (B3LYP/6-31G(d)) воспроизводит экспериментальные частоты всех четырёх мод с высокой точностью: среднее абсолютное отклонение составляет 2,1 %, а максимальное – 2,6 % для моды $F_{1u}(3)$. Полуэмпирические методы PM3 и AM1 воспроизводят правильный порядок мод по частоте, однако абсолютные значения систематически завышены. Наибольшее расхождение с экспериментом наблюдается для моды $F_{1u}(2)$: PM3 завышает на 27,1 %, AM1 – на 34,4 %. Наименьшее расхождение для обоих методов даёт мода $F_{1u}(1)$: отклонения составляют +5,5 % и +8,6 % соответственно. Средние отклонения равны 17,1 % для PM3 и 21,1 % для AM1.

Принципиально важным является тот факт, что, несмотря на значительные абсолютные отклонения, оба полуэмпирических метода демонстрируют высокую линейную корреляцию с экспериментом: коэффициент корреляции Пирсона составляет r = 0,9957 для PM3 и r = 0,9936 для AM1. Столь высокие значения r закономерны, поскольку методы AM1 и PM3 параметризованы на базе обширных массивов экспериментальных данных о молекулярных геометриях и термохимических свойствах органических соединений. Это обусловливает сохранение правильных соотношений между частотами мод при систематическом смещении абсолютных значений. Систематическое завышение частот устраняется введением эмпирического масштабирующего множителя: 0,949 для PM3 и 0,932 для AM1, что согласуется с выводами работы [5].

Таблица 2 – Сравнение расчётных частот (см$^{-1}$) мод F_{1u} фуллерена C_{60} с экспериментом [5] и относительные отклонения Δ

Мода	Параметр	PM3	AM1	DFT (B3LYP/6-31G(d))	Эксперимент [5]
$F_{1u}(1)$	ν, см$^{-1}$	557,15	573,50	536,83	528
	Δ, %	+5,5 %	+8,6 %	+1,7 %	–
$F_{1u}(2)$	ν, см$^{-1}$	733,28	775,51	586,25	577
	Δ, %	+27,1 %	+34,4 %	+1,6 %	–
$F_{1u}(3)$	ν, см$^{-1}$	1377,15	1405,02	1213,17	1183
	Δ, %	+16,4 %	+18,8 %	+2,6 %	–
$F_{1u}(4)$	ν, см$^{-1}$	1708,12	1752,49	1463,26	1429
	Δ, %	+19,5 %	+22,6 %	+2,4 %	–

Квантово-химическими методами PM3 и AM1 проведена оптимизация структуры фуллерена C_{60} и рассчитан его колебательный спектр. Оптимизация геометрии выполнена методом Полака–Рибьера; рассчитанные частоты нормальных колебаний оптимизированной структуры являются действительными, что подтверждает достижение равновесной конфигурации.

Для четырёх ИК-активных мод симметрии F_{1u} получены значения частот и интенсивностей методами PM3 и AM1, которые сопоставлены с результатами расчёта методом DFT (B3LYP/6-31G(d)), выполненного научным руководителем. Установлено, что полуэмпирические методы систематически завышают частоты: среднее отклонение от DFT составляет 17,4 % для PM3 и 22,0 % для AM1. Вместе с тем PM3 обнаруживает лучшее соответствие DFT по сравнению с AM1, что согласуется с литературными данными об относительной точности методов.

Сопоставление с экспериментальными данными [5] показало, что DFT воспроизводит экспериментальные частоты с точностью 2,1 %, тогда как средние отклонения полуэмпирических методов составляют 17,1 % (PM3) и 21,1 % (AM1). Несмотря на это, оба метода демонстрируют высокую линейную корреляцию с экспериментом ($r \approx 0{,}994$–$0{,}996$), что обусловлено их параметризацией на экспериментальных данных и свидетельствует о корректном воспроизведении относительного расположения полос в ИК-спектре. Таким образом, применение методов PM3 и AM1 оправдано для задач, требующих качественной интерпретации колебательных спектров или предварительного скрининга при ограниченных вычислительных ресурсах, тогда как для получения количественно точных значений частот предпочтительно использование метода DFT, реализуемого на высокопроизводительных вычислительных комплексах.

Список литературы

1. Наноматериалы и нанотехнологии / В. М. Анищик [и др.]. – Минск : Изд. центр БГУ, 2008. – 375 с.

2. Елецкий, А. В. Фуллерены / А. В. Елецкий, Б. М. Смирнов // Успехи физических наук. – 1993. – Т. 163, № 2. – С. 33–60.

3. Блатов, В. А. Полуэмпирические расчётные методы квантовой химии / В. А. Блатов, А. П. Шевченко, Е. В. Пересыпкина. – 2-е изд. – Самара : Универс-групп, 2005. – 32 с.

4. Белко, А. В. Расчёт термодинамических свойств фуллереноподобных объектов на основе квантовохимических подходов / А. В. Белко, А. В. Никитин // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка. – 2024. – Т. 14, № 3. – С. 57–63.

5. Солопов, С. С. Расчёт в приближении Хартри – Фока – Рутаана структуры, частот нормальных колебаний и спектров инфракрасного поглощения фуллеренов C_{60} и C_{70} / С. С. Солопов, Ю. К. Тимошенко // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2006. – Т. 8, № 2. – С. 146–148.

The structure of fullerene C_{60} has been optimised and its vibrational spectrum has been calculated using the PM3 and AM1 quantum-chemical methods. The four IR-active F_{1u} modes obtained were compared with DFT (B3LYP/6-31G(d)) results and with experimental data from the literature. Both semiempirical methods systematically overestimate vibrational frequencies (mean deviations 17.1 % for PM3 and 21.1 % for AM1 from experiment), while maintaining a high linear correlation with experiment ($r \approx 0.994$–0.996). DFT reproduces the experimental frequencies with a mean deviation of 2.1%.

Пашкович Николай Андреевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nikolajpaskovic@gmail.com.

Научный руководитель – *Белко Александр Витальевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, belko_av@grsu.by.

УДК 004.65

Р. В. ПОЛКОВНИКОВ, В. Д. КОЗЫРО

РАЗМЕРНЫЙ ФАКТОР ДЛЯ РАСЧЁТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НАПОЛНИТЕЛЕЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рассматривается проблема учета размерного фактора при расчете теплопроводности композиционных систем с преобладанием фононного механизма переноса энергии. На примере карбида кальция демонстрируется методика расчета удельной теплопроводности в зависимости от размеров частиц. Сложность рассматриваемого процесса заключается в необходимости учета большого числа факторов. В частности, теплопроводность карбида кремния при одинаковой температуре в зависимости от структуры, технологии изготовления может меняться от 200 до 30 Вт/мК. Размерные и температурные факторы приводят к необходимости рассматривать большое число механизмов переноса энергии (диффузионный, баллистический, гидродинамический), что значительно усложняет решение проблемы.

Как известно при размерах объектов в нанодиапазоне их физические свойства отличны от объемных. В композитах этим условиям могут отвечать, размеры частиц наполнителя и их форма. Оценка размерного фактора для теплопроводности частицы наполнителя в общем случае зависит от размеров и формы частицы, а также от направления теплового потока, В дальнейшем анализе будем ориентироваться на карбид кальция. Граничным температурным параметром, определяющим размерные эффекты является характеристическая температура Дебая [1]. Вывод основан на теории Дебая, описывающей различие квантовых состояний при температурах ниже Θ_D и на анализе связей между Θ_D и размером частицы. Размеры частицы определяются дебаевской длиной $L \approx \lambda_D$, которая рассчитывается по формуле [2] (коэффициент «230» – размерный);

$$L_o = 230\Theta_D^{-1/2}[\text{нм}]. \quad (1)$$

Поскольку у карбида кремния температура Дебая достаточно высокая (1200 К), следует ожидать, что размерные эффекты могут проявляться в широком диапазоне обычных температур. При этом размерная граница в пределах 7нм.

Наиболее приемлемый анализ размерных эффектов, связанных с теплопроводностью, базируется на фононном приближении. Рассматриваются два механизма переноса теплоты: диффузионный и баллистический. Эти механизмы связывают со значением числа Кнудсена [3]:

$$Kn = \frac{l}{L}, \quad (2)$$

где l – длина свободного пробега фононов; L – характерный размер.

Границы диффузионного и баллистического механизмов переноса теплоты можно оценить по критерию Кнудсена: $Kn < 10^{-3}$ – диффузионный перенос; $Kn > 1$ – баллистический перенос. Эффективная теплопроводность в зависимости от размерного фактора может быть представлена выражением [3]:

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_0}{1+Kn}, \quad (3)$$

диффузионная теплопроводность:

$$\lambda_0 = \frac{1}{3}\sum_i \int \hbar\omega_i v_i^2 \tau_i \frac{\partial N_0}{\partial T}\frac{d^3k}{(2\pi)^3} \quad (4)$$

$\omega_i v_i^2 \tau_i$ – соответственно, частота, групповая скорость и время свободного пробега фононов;

N_0 –распределение Бозе – Эйнштейна;

T – температура;

k –модуль волнового вектора.

ħ – постоянная Планка – Дирака.

Эффективная теплопроводность с учетом размерного фактора, учитывающая диффузионный и баллистический механизмы переноса энергии может быть рассчитана по формуле [4]:

$$\lambda_{eff} = \frac{1}{3}\sum_i \int k_B(\hbar\omega_i/(k_BT))^2 \frac{\exp(\hbar\omega_i/(k_BT))}{\exp\hbar\omega_i/(k_BT)-1} v_i\ (\boldsymbol{k}) l_i(\boldsymbol{k})\, cos^2\,\Theta d\boldsymbol{k} \quad (5)$$

где k_B – постоянная Больцмана; $\boldsymbol{k}$ – волновой вектор; Θ –угловая переменная направления потока энергии;

Для быстрой оценки влияния можно использовать простое соотношение:

$$\lambda_{eff} = \lambda_0 L^{\beta},\ \beta \geq 0. \quad (6)$$

Параметр β зависит от формы и размеров частицы, от направления теплового потока, его определение связано с серьезными трудностями и должно опираться на экспериментальные данные.

Для оценки коэффициента теплопроводности можно использовать простое соотношение (формула Дебая):

$$\lambda_{eff} = \frac{1}{3} Cvl, \quad (7)$$

где C, v, l – средние значения объемной теплоемкости в расчете на элементарную ячейку, скорости звуковых фононов, длины свободного пробега фононов.

Основным механизмом переноса тепла в карбиде кальция при высоких температурах является фононный (колебания кристаллической решетки). Для определения коэффициента теплопроводности кристалла применим формулу Лейбфрида – Шлеманна [5]:

$$\lambda = \frac{2\pi k M \Theta_D^3 \alpha^3}{h T \gamma^2 N}, \quad (8)$$

где k – постоянная Больцмана;

h – постоянная Планка;

M – средний молекулярный вес;

Θ_D – температура Дебая;

γ – постоянная Грюнайзена;

α – постоянная решетки;

N – число атомов в элементарной ячейке.

Температурная зависимость коэффициента теплопроводности карбида кремния в области температур, близких к температуре Дебая представлена на рисунке 1.

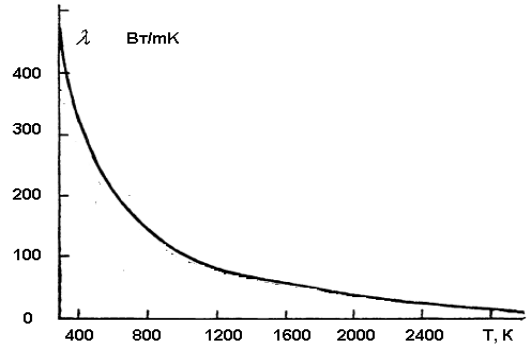


Рисунок 1 – Теплопроводность карбида кремния при высоких температурах (8)

Когда рассматриваются размерные эффекты, связанные с теплопроводностью, необходимо уточнение размеров и формы нанообъекта (нанонити, пленки, нанотрубки). Для всех этих случаев рассматриваются два механизма переноса теплоты: диффузионный и баллистический. Второй, в свою очередь, предусматривает *N*-процессы (учитывает взаимодействие фононов с фононами без потери квазиимпульса) и *U*-процессы (учитывает взаимодействие с границами и дефектами решетки).

Оценим длину свободного пробега фононов в кристаллах кремния и карбида кремния рисунок 2.

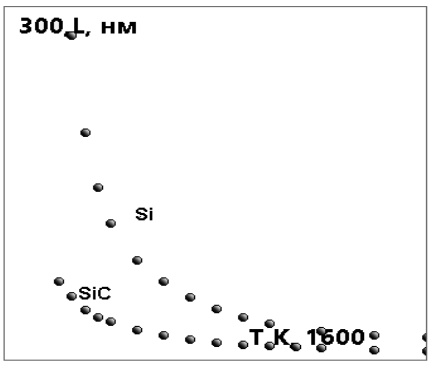


Рисунок 2 – Зависимости средней длины пробега фононов для кремния и карбида кремния от температуры

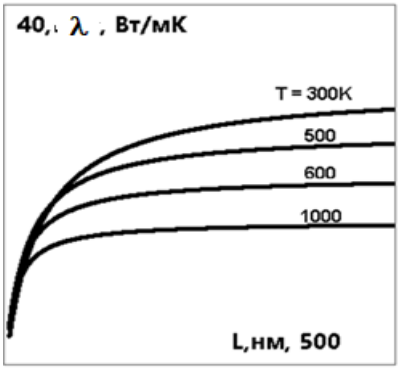


Рисунок 3 – Зависимости коэффициента теплопроводности карбида кремния от размера частиц (8)

Рассмотренные методики учета размерного фактора при определении физических свойств наполнителей композиционных материалов показывают, что получение надежных данных возможно только на основе экспериментальных данных. Моделирование этих свойств также должно опираться на экспериментальные данные.

Список литературы

1. Хвесюк, В. И. Теплопроводность наноструктур / В. И. Хвесюк, А. С. Скрябин // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55, № 3. – С. 447–471.

2. Лиопо, В. А. Определение максимального размера наночастиц / В. А. Лиопо // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фізіка. Вылічальная тэхніка і інфарматыка. – 2007. – № 1(48). – С. 50–56.

3. Tang, J. H. Phonon Boundary Scattering Effect on Thermal Conductivity of Thin Films / J. H. Tang, Y. Zhao, G. X. Zhai, C. Bi // J. Appl. Phys. – 2011. – Vol. 110. – P. 046102.

4. Maldovan, M. Transition Between Ballistic and Diffusive Heat Transport Regimes in Silicon Materials / M. Maldovan // Appl. Phys. Lett. – 2012. – Vol. 101. – P. 113110.

5. Беленков, Е. А. Классификация и структура фаз карбида кремния / Е. А. Беленков, Э. Н. Агалямова, В. А. Грешняков // Физика твердого тела. – 2012. – Т. 54, вып. 2. – С. 16–22.

The paper discusses the problem of taking into account the dimensional factor, when calculating the thermal conductivity of composite systems with a predominance of the phonon mechanism of energy transfer. Using calcium carbide as an example, a method for calculating specific thermal conductivity as a function of particle size is demonstrated. The complexity of the process under consideration lies in the need to take into account a large number of factors. In particular, the thermal conductivity of silicon carbide at the same temperature, depending on the structure and manufacturing technology, can vary from 200 to 30 W/mK. Dimensional and temperature factors lead to the need to consider a large number of mechanisms of energy transfer (diffusion, ballistic, hydrodynamic), which greatly complicates the solution of the problem.

Полковников Руслан Александрович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, eror.sans@inbox.ru.

Козыро Валерий Данилович, студент 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nik@grsu.by.

УДК 533.9; 621.793.18

А. Н. ПОТЫЛКИН, С. М. ЗАВАДСКИЙ

ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ИСТОЧНИКА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЁМКОСТНОГО РАЗРЯДА С НАЛОЖЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ И ПОЛИРОВКИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ДИАМЕТРОМ ДО 300 ММ

Для создания высокоэффективной системы ионно-плазменной полировки исполнительных поверхностей прецизионных оптических деталей использован высокочастотный емкостной разряд с наложением магнитного поля. Для разработки такой системы проведены исследования в области моделирования источника плазмы высокочастотного емкостного разряда с магнитным полем.

Для ионно-плазменной обработки поверхности твердых тел применяется ряд систем. Наиболее простой конструкцией обладают диодные системы ионно-плазменного травления, основанные на емкостном разряде [1]. Однако такие системы обладают рядом недостатков: высокие рабочие давления, низкую плотность плазмы, высокие рабочие напряжения и низкий ток разряда. Кроме того в процессе ионного травления происходит изменение элементного состава и структуры поверхности твердого тела [2]. Особенно этот эффект проявляется при увеличении диаметра подложки до 200–300 мм. Все эти факторы резко ограничивают использование диодных систем для формообразования ионной полировки элементов оптических деталей.

Снижение рабочего давления и уменьшение рабочего напряжения ионно-плазменного устройства может быть достигнуто за счет увеличения плотности плазмы. Увеличение концентрации заряженных частиц приводит к увеличению проводимости разряда и плотности ионного тока. Наиболее эффективным методом, позволяющим увеличить степень ионизации рабочего газа, является использование магнитного поля. На основе предыдущих исследований [3] было установлено, что разряд в скрещенных E×H полях является эффективным источником заряженных частиц и может существовать при давлениях до 10^{-2} Па. При наложении арочного магнитного поля вследствие различной подвижности электронов вдоль и поперек магнитного поля наблюдается фокусировка электронов в магнитном поле и формирование так называемой магнитной ловушки. При этом плазма локализуется у распыляемой поверхности, имеет форму, близкую к тороидальной. Магнитное поле существенно увеличивает путь электронов от катода к аноду и препятствует уходу электронов на анод и другие части системы с положительным потенциалом, что повышает число ионизирующих столкновений электронов с атомами газа. Электроны могут перемещаться в ловушке в сторону анода только благодаря столкновениям с молекулами газа. При достаточном запасе энергии каждый электрон может сгенерировать несколько новых электрон-ионных пар, что обеспечивает поддержание высокоплотной плазмы даже при низком давлении.

С целью оценки возможности создания системы ионной полировки поверхности оптических деталей диаметром до 300 мм и толщиной до 25 мм проведены расчеты распределения магнитного поля и границы плазмы магнитной системы источника высокочастотного емкостного разряда с наложением магнитного поля. Ранее было установлено, что для DC магнетронных распылительных систем верхняя и боковые границы плазмы ограничены величиной горизонтальной составляющей индукции магнитного поля от 0,02 Тл и более [4]. Информации о проведении подобных исследований для ВЧ магнетронных распылительных систем в научной литературе не обнаружено, поэтому для верхней границы ловушки Z_0 было выбрано условие минимального значения вектора горизонтальной составляющей индукции магнитного поля $B_y > 0{,}02$ Тл.

На рисунке 1 представлена модель для расчета границы плазмы магнитной системы источника высокочастотного емкостного разряда с наложением магнитного поля.

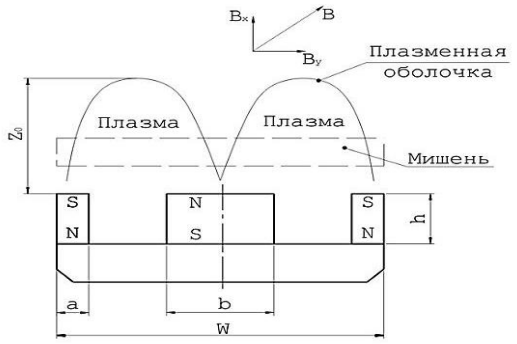


Рисунок 1 – Модель для расчёта границы плазмы магнитной системы источника высокочастотного ёмкостного разряда с наложением магнитного поля

Для данной конфигурации проведено моделирование границы плазмы протяженного участка магнитной системы при различной высоте и ширине магнитов. Материал магнитов Nd-Fe-B. Высота магнитов h изменялась от 10 до 30 мм (см. рисунок 1). Общая ширина магнитной системы W изменялась от 80 до 140 мм. При этом мы пытались формировать сбалансированную конфигурацию магнитного поля за счет увеличения ширины магнитов (a, b). Максимальная граница плазмы при постоянной высоте магнитов h = 10 мм была достинута на ширине магнитной системы W = 140 мм и увеличилась до 62 мм (рисунок 2).

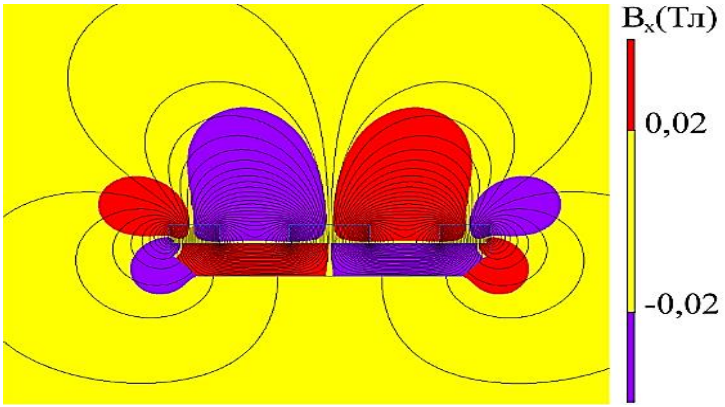


Рисунок 2 – Распределение магнитных полей магнитной системы W = 140 мм, h = 10 мм (Z_0 = 62.0 мм)

Также проведено моделирование границы плазмы при увеличении высоты магнитов. Расчеты показали, что увеличение высоты магнитов до 20 мм дает значительное увеличение протяженности плазмы, но дальнейшее увеличение толщины магнитов практически не увеличивало магнитное поле. При увеличении h до 30 мм Z_0 увеличилось только до 46,3 мм. При широкой магнитной системе W = 140 мм и h = 20 мм протяженность границы плазмы Z_0 удалось увеличить до 72 мм. На основе анализа полученных результатов моделирования сделаны следующие выводы: с разбросом параметров магнитов можно обеспечить протяженность границы плазмы примерно до 65 мм; с учетом стенок камеры, водоохлаждаемого фланца и границы плазмы толщина подложки не может превышать 35 мм.

Проведены расчеты магнитной системы с учетом закругленных участков. При расчетах использовались следующие исходные данные: высота магнитов h = 25 мм, радиус закругленного участка R_{ms} = 70 мм. Ширина центрального и бокового магнитов подбиралась из условия получения сбалансированной конфигурации магнитного поля при максимальной протяженности магнитной ловушки Z_0. Было установлено, что на закругленных участках, по сравнению с прямолинейными участками магнитной системы, для получения сбалансированной конфигурации магнитного поля необходимо уменьшать ширину бокового магнита (a) и увеличивать диаметр центрального магнита (D_i). При ширине бокового магнита более 18 мм практически невозможно добиться сбалансированной конфигурации магнитного поля даже при больших диаметрах центрального магнита. Также при увеличении диаметра центрального магнита магнитное поле между центральным и боковыми магнитами все больше замыкается непосредственно между магнитами, что уменьшает высоту магнитной ловушки. Поэтому ширина бокового магнита была уменьшена до 15 мм. При увеличении радиуса центрального магнита конфигурация магнитного поля изменяется от несбалансированной II-го типа к сбалансированной. При этом происходит увеличение Z_0 (рисунок 3). При D_i > 40 мм конфигурация магнитной ловушки становится практически сбалансированной. В качестве оптимальной была выбрана конфигурация: a = 15 мм, D_i = 45 мм, h = 25 мм.

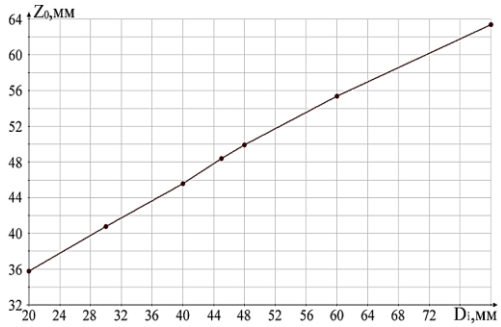


Рисунок 3 – Зависимость Z_0 от диаметра центрального магнита (на закругленном участке боковой магнит шириной a = 15 мм)

При данных размерах граница магнитной ловушки находится на расстоянии 48,4 мм от поверхности мишени. Увеличение ширины бокового магнита до 18 мм позволило увеличить Z_0 только до 50 мм (увеличение по сравнению с a = 15 мм только 1,5 мм). Это намного меньше, чем полученное ранее значение для прямолинейных участков, где Z_0 достигало 65–70 мм. Поэтому, если использовать ранее рассчитанные значения размеров магнитной системы для прямолинейного участка, где a = 28 мм, b = 30 мм h = 20 мм (Z_0 > 70 мм), происходит большое искажение магнитной ловушки при переходе от прямолинейного участка к закругленному.

Для уменьшения искажения магнитной ловушки при переходе от прямолинейного участка к закругленному было уменьшено магнитное поле на протяженном участке. Ширина бокового магнита a была уменьшена до 18 мм. При моделировании изменялась ширина центрального магнита с целью формирования сбалансированного магнитного поля и максимального значения Z_0.

На основе анализа была выбрана конфигурация для прямолинейного участка a = 18 мм, b = 12 мм, h = 25 мм. При данных размерах граница магнитной ловушки находится на расстоянии 56,2 мм от поверхности мишени. Для упрощения конструкции магнитной системы для закругленного участка также предложено увеличить размер бокового магнита до a = 18 мм и D_i = 48 мм. При данных размерах граница магнитной ловушки находится на расстоянии 49,8 мм от поверхности мишени. На рисунке 4 представлена окончательная конфигурация магнитной системы[5].

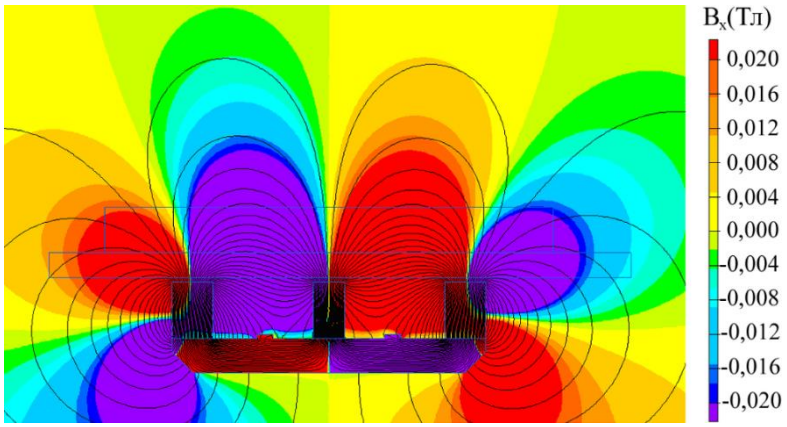


Рисунок 4 – Распределение индукции магнитного поля на прямолинейном участке магнитной системы протяженного магнетрона при a = 18 мм, b = 14 мм (Z_0 = 58,2 мм, R_{sp} = 36,6 мм)

Список литературы

1. Интегрированные технологии микро- и наноструктурированных слоев / А. П. Достанко [и др.] ; под общей ред. А. П. Достанко и В. Л. Ланина. – Минск : Беспринт, 2013. – 189 с.

2. Shinichi Tachi. Impact of plasma processing on integrated circuit technology migration: From 1 mm to 100 nm and beyond / Shinichi Tachi // Journal of Vacuum Science Technology. – 2003. – Vol. 21, № 5. – P. S131–S138.

3 Голосов, Д. А. Исследование характеристик магнетронных распылительных систем несбалансированного типа / Д. А. Голосов, И. В. Свадковский, С. М. Завадский // Электронная обработка материалов. – 2002. – № 6. – С. 66–74.

4. Голосов, Д. А. Сквозное моделирование процессов нанесения покрытий при магнетронном распылении / Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2013. – № 4. – С. 75–82.

The article discusses methods for improving the characteristics of precision optical parts by ion polishing of the working surfaces. Simulation of a high-frequency capacitive discharge source with the application of a magnetic field and a system for ion polishing of precision optical parts have been carried out. The results obtained can be used to optimize and improve the processes and equipment for plasma polishing of the working surfaces of precision optical parts.

Потылкин Андрей Николаевич, магистрант 2 курса факультета компьютерного проектирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, potylkin.andrey@mail.ru.

Научный руководитель – *Завадский Сергей Михайлович*, кандидат технических наук, начальник Центра 2.1 НИЧ БГУИР, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, szavad@bsuir.by.

[5]Исследования выполнены в рамках научного проекта № Т25КИ-055 (№ W2421112) при финансовой поддержке БРФФИ и Национального фонда естественных наук Китая.

УДК 539.19:004.942

К. Р. САЛАТА, М. Д. БОРОВИК, Е. А. КЕДИК

МЕТОДЫ ВЕБ-ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ИНТЕРАКТИВНЫНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СИМУЛЯТОРОВ

Рассматриваются методы веб-программирования при создании интерактивных физических симуляторов. На основе анализа трех учебных проектов систематизированы подходы к реализации физических моделей различной сложности: от законов сохранения в механике до уравнения состояния идеального газа. Особое внимание уделяется визуализации физической системы средствами Canvas и SVG.

Современное физическое образование немыслимо без экспериментальной базы, однако далеко не все явления доступны для прямого наблюдения в учебной аудитории [1]. Интерактивные веб-симуляторы восполняют этот пробел, позволяя обучающимся исследовать фундаментальные законы физики в условиях, максимально приближенных к идеализированным теоретическим моделям [2]. В отличие от сложных инженерных пакетов, веб-решения должны быть доступны через браузер без установки, при этом сохраняя физическую достоверность модели [3]. Цель работы – систематизация методов разработки таких симуляторов на примере студенческих проектов, реализующих различные разделы физики.

Анализ проектов показывает, что независимо от предметной области, ядром любого симулятора выступает строгая физическая модель, реализованная на стороне клиента [4]. Серверный компонент, если присутствует (проект с бильярдными шарами), отвечает только за сохранение результатов экспериментов и аутентификацию, не вмешиваясь в физический расчет.

В проекте моделирования упругих столкновений физическая модель базируется на фундаментальных законах сохранения импульса и энергии для замкнутой системы. Для двух соударяющихся шаров эти законы записываются в векторной форме: $m_1\upsilon_1 + m_2\upsilon_2 = m_1u_1 + m_2u_2$ (импульс) и $m_1\upsilon_1^2/2 + m_2\upsilon_2^2/2 = m_1u_1^2/2 + m_2u_2^2/2$ (энергия). Совместное решение этих уравнений дает аналитические выражения для конечных скоростей. Для нецентрального удара применяется разложение скоростей на нормальные и тангенциальные составляющие: нормальные компоненты изменяются согласно формулам центрального удара, а тангенциальные остаются неизменными. Коэффициент восстановления Ньютона $e = |u_2 - u_1|/|\upsilon_2 - \upsilon_1|$, варьируемый от 0 до 1, позволяет моделировать как абсолютно упругие, так и частично неупругие столкновения [4].

В симуляторе изопроцессов физической основой выступает уравнение состояния идеального газа Клапейрона-Менделеева: $pV = \nu RT$. Для каждого изопроцесса это уравнение дополняется условием постоянства одного из параметров: изотермический процесс (T = const) подчиняется закону Бойля-Мариотта $p_1V_1 = p_2V_2$, изобарный (p = const) – закону Гей-Люссака $V_1/T_1 = V_2/T_2$, изохорный (V = const) – закону Шарля $p_1/T_1 = p_2/T_2$. Адиабатический процесс описывается уравнением Пуассона $pV^\gamma = \text{const}$, где $\gamma = C_p/C_v$ – показатель адиабаты. Расчет работы газа осуществляется интегрированием: $A = \int PdV$, причем для изотермического процесса $A = \nu RT \ln(V_2/V_1)$, а для изобарного $A = P\Delta V$.

Симулятор электрических цепей опирается на закон Ома для участка цепи $I = U/R$ и для полной цепи $I = \varepsilon/(R + r)$. При последовательном соединении элементов общее сопротивление находится как $R_{общ} = \Sigma R_i$, а сила тока одинакова для всех элементов: $I = I_1 = I_2 = ... = I_n$. Мощность, выделяемая на нагрузке, рассчитывается по формулам $P = I^2R = U^2/R = IU$. Особенностью модели является расчет сопротивления лампы накаливания через ее номинальную мощность: $R_{лампы} = U^2/P_{ном}$, после чего фактическая мощность определяется как $P = I^2 \cdot R_{лампы}$ и визуализируется изменением яркости свечения.

Ключевое архитектурное решение – выделение модуля физической модели в отдельный компонент, который рассчитывает состояние системы на основе описанного математического аппарата, не взаимодействуя напрямую с интерфейсом. Этот модуль гарантирует физическую корректность симуляции. Паттерн «Наблюдатель» обеспечивает синхронизацию: компоненты интерфейса подписываются на изменения параметров физической модели и автоматически реагируют на них [1]. Так, изменение пользователем давления в симуляторе изопроцессов инициирует пересчет температуры по закону Шарля и мгновенное обновление графика, создавая эффект непосредственного управления физической системой.

Адекватная визуализация физических процессов не менее важна, чем корректность расчетов, поскольку именно через графическое представление обучающийся воспринимает физическую закономерность [2].

HTML5 Canvas оптимален для динамических сцен с непрерывным обновлением состояний [5]. В симуляторе бильярдных шаров каждый кадр анимации требует пересчета координат всех объектов с дискретным шагом по времени Δt. Физический движок последовательно проверяет условия столкновения (расстояние между центрами $d \le R_1 + R_2$), вычисляет новые скорости согласно законам сохранения и корректирует позиции для устранения взаимного проникновения шаров. Canvas обеспечивает плавную визуализацию этого процесса при 60 FPS, выступая идеальным инструментом для отображения непрерывных механических процессов [5].

SVG работает в «режиме хранения», где каждый элемент является частью DOM-дерева. В симуляторе электрических цепей это позволяет представить каждый компонент как отдельный объект, управляемый через CSS и JavaScript. Физическая модель здесь дискретна: изменение топологии цепи (соединение или разъединение элементов) инициирует пересчет всех токов и напряжений [5]. SVG идеально подходит для визуализации структурных физических систем, где важно выделить каждый элемент и его связи.

Особый интерес представляет гибридный подход в симуляторе изопроцессов: здесь Canvas используется для построения графиков термодинамических зависимостей, где каждая точка кривой рассчитывается физической моделью как (V_i, P_i) для изотермы или (T_i, V_i) для изобары. При этом интерактивные элементы управления (ползунки, селекторы) реализованы стандартными средствами HTML/CSS [3]. Такой подход наглядно демонстрирует, как изменение макроскопических параметров газа влияет на вид термодинамической кривой.

В рассмотренных проектах применяются два подхода к сохранению результатов физических экспериментов.

Клиентское хранение (Web Storage API) достаточно для автономных симуляторов, где требуется сохранить состояние системы между сессиями. В симуляторе изопроцессов в localStorage сохраняются текущие значения параметров (P, V, T) и выбранный тип процесса, что позволяет восстановить виртуальный эксперимент при повторном открытии страницы [1].

Серверное хранение, реализованное в проекте бильярдного симулятора, открывает возможности для глубокого анализа физических процессов. Массив данных о каждом столкновении включает скорости шаров до и после взаимодействия, что позволяет экспериментально верифицировать законы сохранения [1].

Проведенный анализ позволяет сформулировать рекомендации по разработке интерактивных физических симуляторов [2,3]:

1. Физическое ядро должно быть строго отделено от визуализации и реализовано на основе фундаментальных законов (сохранения импульса и энергии, уравнения состояния, закона Ома) с возможностью варьирования параметров модели (коэффициент восстановления, показатель адиабаты, внутреннее сопротивление).

2. Выбор между Canvas и SVG определяется характером визуализируемого процесса: Canvas оптимален для непрерывной динамики (механическое движение, изменение графиков), SVG – для дискретных структур (электрические схемы) [5].

3. Стратегия хранения должна соответствовать целям исследования: локальное хранение – для повторения эксперимента, серверное с сохранением временной развертки – для верификации законов сохранения и фазового анализа [4].

Применение веб-технологий в сочетании с корректными физическими моделями позволяет создавать эффективные образовательные инструменты, превращающие изучение абстрактных законов в наглядный исследовательский процесс [1; 2].

Список литературы

1. Иванов, А. В. Веб-технологии в современном образовании / А. В. Иванов, С. К. Петров // Информационные технологии в образовании. – 2023. – № 2. – С. 45–58.

2. Чирцов, А. С. Новые подходы к созданию электронных конструкторов и виртуальных моделей с простым удаленным доступом / А. С. Чирцов // КиберЛенинка. – 2010.

3. Обзор интерактивных симуляторов: создай метательный аппарат и пробей крепостную стену [Электронный ресурс] // Системный Блокъ. – 2024. – Режим доступа: https://sysblok.ru/education/sozdaj-metatelnyj-apparat-i-probej-krepostnuju-stenu-kak-ponjat-nauku-cherez-simuljatory. – Дата доступа: 09.03.2026.

4. MDN Web Docs. Canvas API – Руководство и справочник [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://developer.mozilla.org/ru/docs/Web/API/Canvas_API. – Дата доступа: 09.03.2026.

5. Браузерная симуляция физики: сравнение движков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.pvsm.ru/javascript/305342. – Дата доступа: 09.03.2026.

The article discusses web programming techniques for creating interactive physical simulators. Based on the analysis of three educational projects, the article systematizes approaches to implementing physical models of varying complexity, from the laws of conservation in mechanics to the equation of state for an ideal gas. Special attention is given to the visualization of a physical system using Canvas and SVG.

Салата Каролина Рышардовна, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, salatak294@gmail.com.

Кедик Егор Андреевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, tishtoto19@gmail.com.

Боровик Максим Дмитриевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, borovikm06@gmail.com.

Научный руководитель – *Белко Александр Витальевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, belko_av@grsu.by.

УДК 537.539

А. А. САТТАРОВА, Ж. У. ИСМОИЛОВ, У. О. КУТЛИЕВ

РАССЕЯНИЯ ИОНОВ Ne^+ С ПОВЕРХНОСТИ СИНЕГО ФОСФОРА

Методом компьютерного моделирования исследована процесс рассеяния ионов Ne^+ с поверхности синего фосфора при бомбардировке под малыми углами падения с начальной энергией E_0 = 1 кэВ. Получены и анализированы зависимости неупругих потерь энергии от коэффициента столкновения рассеянных ионов. Показано, что в характер зависимости неупругих потерь энергии от коэффициента столкновения рассеянных ионов при малых углах ($\psi < 4^o$) наблюдается прямая зависимость. С увеличением угла падения бомбардирующих ионов в этой зависимости наблюдаются то, что к одному значению коэффициента столкновения соответствует 2–3 значениям неупругих потерь энергии. Это объясняется тем, что неупругие потерь энергии связаны с наибольшим приближением иона к поверхностного атома.

В последние годы двумерные материалы заняли важное место в физике конденсированного состояния и материаловедении. Наряду с graphene и black phosphorus активно исследуется аллотроп фосфора – синий фосфор (blue phosphorus), представляющий собой двумерную структуру с гофрированной гексагональной решёткой. Благодаря широкой запрещённой зоне, высокой химической активности поверхности и анизотропии электронных свойств синий фосфор рассматривается как перспективный материал для наноэлектроники и сенсорных устройств. Одним из эффективных методов исследования атомной структуры и динамики поверхностей является процесс рассеяния ионов. При бомбардировке поверхности ускоренными ионами реализуются процессы упругого и неупругого рассеяния, ионного отражения, передачи энергии атомам мишени и возможного распыления. Анализ энергетических и угловых распределений рассеянных частиц позволяет получить информацию о кристаллографической ориентации, дефектах, релаксации поверхностных слоёв и потенциалах межатомного взаимодействия. Особый интерес представляет бомбардировка под малыми углами падения (скользящее рассеяние). В этом режиме ион движется почти параллельно поверхности, взаимодействуя преимущественно с верхним атомным слоем. Это приводит к следующим особенностям: увеличению длины пробега вдоль поверхности; усилению эффектов каналирования; повышенной чувствительности к дефектам и ступеням; снижению глубины проникновения ионов. Для синего фосфора, обладающего гофрированной (buckled) структурой, малые углы падения особенно важны, поскольку даже небольшая вертикальная релаксация атомов влияет на траекторию ионов. В таких условиях наблюдаются эффекты поверхностного каналирования и многократных последовательных столкновений с атомами верхнего слоя. Теоретическое описание процесса рассеяния обычно осуществляется в рамках: приближения парных столкновений (Binary Collision Approximation, BCA); молекулярной динамики (MD);аналитических моделей межатомных потенциалов.

Метод приближения парных столкновений (также известный как приближение бинарных столкновений) – это фундаментальный подход в физической кинетике и статистической механике, используемый для описания систем многих частиц. Основная идея метода заключается в том, что эволюция системы определяется независимыми попарными взаимодействиями частиц, а влияние всех остальных частиц на сталкивающуюся пару считается пренебрежимо малым или усредненным. Теперь приводим подробную информацию об этом методе, его физических основах, математическом выводе, границах применимости и основных приложениях.

В основе метода лежат три ключевых предположения: *разреженность среды*: плотность газа или плазмы достаточно мала. Это означает, что среднее расстояние между частицами значительно превышает радиус действия межчастичных сил (радиус корреляции). В таких условиях вероятность одновременного сближения трех и более частиц в одной точке пространства пренебрежимо мала. *Короткодействующий характер взаимодействия (экранирование)*: в плазме кулоновское взаимодействие является дальнодействующим, что формально делает приближение парных столкновений неприменимым в лобовом смысле. Однако, благодаря эффекту дебаевского экранирования, поле каждой заряженной частицы ослабляется на расстояниях порядка дебаевского радиуса. Таким образом, эффективное взаимодействие становится короткодействующим, и его можно рассматривать как последовательность независимых парных актов. *Молекулярный хаос*: предполагается, что скорости и положения двух частиц, готовящихся столкнуться, статистически независимы и некоррелированы до момента их сближения. Это позволяет выразить двухчастичную функцию распределения через произведение одночастичных функций.

Ключевым элементом моделирования является выбор адекватного потенциала взаимодействия между ионом и атомами мишени. Для описания короткодействующего взаимодействия между быстрым ионом и атомами твёрдого тела широко используется универсальный потенциал экранированного кулоновского взаимодействия, известный как потенциал ЦБЛ (Ziegler – Biersack – Littmark). Данный потенциал корректно описывает:

- короткодействующее отталкивание при высоких энергиях (сотни эВ – кэВ);
- процессы упругого рассеяния;
- передачу энергии при парных столкновениях;
- траектории ионов при малых углах падения.

При бомбардировке синего фосфора ионами неона (Ne^+) потенциал ZBL используется для описания взаимодействия системы Ne–P. В условиях малых углов падения ион испытывает серию последовательных слабых отклонений, что делает потенциал особенно чувствительным к точности описания экранирования.
Для более низких энергий (десятки эВ) к потенциалу ZBL могут добавляться вклад ковалентных взаимодействий (например, потенциалы типа Tersoff для P–P), однако при энергиях порядка сотен эВ и выше вклад кулоновского отталкивания доминирует.

Нами изучена зависимость неупругих потерь энергии от коэффициента столкновения рассеянных ионов. На рис.1.приведена зависимости неупругих потерь энергии от коэффициента столкновения рассеянных ионов Ar^+ с поверхности синего фосфора при разных углах падениях и с начальной энергией 1 кэВ. Видно, что при $\psi = 3^0$ этот зависимость имеет линейную характер. А с увеличением угла падения бомбардирующих частиц прямолинейность не наблюдается. Видно, что учеличения угла падения наблюдается изгиб в зависмости, который показывает сложную траекторую рассеянных ионов.

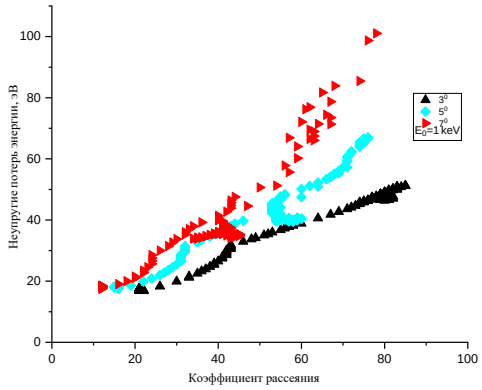


Рисунок 1 – зависимости неупругих потерь энергии от коэффициента столкновения рассеянных ионов Ar^+ с поверхности синего фосфора при разных углах падениях и с начальной энергией 1 кэВ

Таким образом, процесс рассеяния ионов с поверхности синего фосфора при малых углах падения представляет собой чувствительный инструмент исследования его атомной структуры. Теоретическое описание основано на приближении парных столкновений и универсальном потенциале ZBL, корректно описывающем короткодействующее экранированное кулоновское взаимодействие. А Получены и анализированы зависимости неупругих потерь энергии от коэффициента столкновения рассеянных ионов. Установлено, что в характер зависимости неупругих потерь энергии от коэффициента столкновения рассеянных ионов при малых углах ($\psi < 4^0$) наблюдается прямая зависимость, а с увеличением угла падения бомбардирующих ионов в этой зависимости не наблюдаются прямая зависимость.

Список литературы

1. Rabalais, J. W. Principles and Applications of Ion Scattering Spectrometry / J. W. Rabalais. – Wiley-Interscience, 2002. – 336 p.
2. Low Energy Ion-Surface Interactions. Wiley Series in Ion Chemistry and Physics / J. W. Rabalais (ed.). – 1994. – 610 p.
3. Wolfgang Eckstein – Computer Simulation of Ion-Solid Interactions. Springer Series in Materials Science. – 1991. – Vol. 10. – XI + 296 p.
4. Low-energy ion scattering at surfaces. Surface Science Reports. – 1993. – Vol. 17, Issues 4–5. – P. 213–303. – DOI:10.1016/0167-5729(93)90024-J.
5. Garrison, B. J. Theory of ion scattering from single crystals / B. J. Garrison. // Surface Science. – 1979. – Vol. 87, Issue 2. – P. 683–699.

Computer simulation was used to study the scattering of Ne^+ ions from the surface of blue phosphorus bombarded at small angles of incidence with an initial energy of E_0 = 1 keV. The dependences of inelastic energy losses on the collision coefficient of scattered ions were obtained and analyzed. A direct relationship was demonstrated between the inelastic energy losses and the collision coefficient of scattered ions at small angles ($\psi < 40$). As the angle of incidence of the bombarding ions increases, this dependence shows that one value of the collision coefficient corresponds to 2–3 values of inelastic energy losses. This is explained by the fact that inelastic energy losses are associated with the closest approach of the ion to the surface atom.

Исмоилов Жалоладдин Уткир угли, студент Ургенчского государственного университета, Ургенч, Республика Узбекистан, uchkunk@mail.ru.
Саттарова Анахон Абдирасуловна, преподаватель Ургенчского государственного медицинского института, Ургенч, Республика Узбекистан, uchkunk@mail.ru.
Научный руководитель – *Кутлиев Учкун Отобоевич*, доктор физико-математических наук, профессор Ургенчского государственного медицинского института, Ургенч, Республика Узбекистан, uchkunk@mail.ru.

УДК 004.94

А. В. СКОРЯБКИН

ПРИМЕНЕНИЕ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ЛИЦА

Описываются методологические основы и предварительные результаты разработки системы автоматического распознавания базовых эмоций человека по изображению лица с использованием свёрточных нейронных сетей (CNN). Рассматриваются ключевые этапы реализации: от предобработки данных и выбора архитектуры до обучения модели. Разработка ориентирована на применение в психологии, клинической диагностике, адаптивных образовательных системах и человеко-машинном взаимодействии.

Введение. В условиях цифровой трансформации общества возрастает потребность в создании интеллектуальных систем, способных анализировать и интерпретировать человеческое поведение. Одной из ключевых задач в данной области является автоматическое распознавание эмоциональных состояний по визуальным данным, в частности по мимике лица. Традиционные методы оценки, основанные на самоотчетах или экспертной оценке, зачастую субъективны, трудоемки и неприменимы для анализа в реальном времени.

С появлением глубокого обучения, особенно свёрточных нейронных сетей, произошел качественный скачок в возможностях машинного анализа изображений. CNN способны автоматически извлекать иерархические пространственные признаки, что делает их исключительно эффективными для задач классификации, включая распознавание эмоций [2]. Разработка подобных систем открывает новые перспективы для создания адаптивных интерфейсов, инструментов психологической и медицинской диагностики, а также для повышения эффективности дистанционного образования и UX-исследований.

Настоящая работа посвящена разработке основных методов и подходов к проектированию и программной реализации системы распознавания эмоций на основе свёрточных нейронных сетей с последующим внедрением её в исследовательскую и образовательную практику.

Актуальность работы обусловлена следующими факторами:

1. Потребность в объективных и масштабируемых инструментах: существует дефицит автоматизированных решений, позволяющих проводить быстрый и непредвзятый анализ эмоциональных реакций у больших групп людей [2].

2. Развитие персонализированных сервисов: системы, способные распознавать эмоции, являются основой для создания персонализированных образовательных траекторий, терапевтических приложений и интеллектуальных помощников.

3. Доступность технологий: широкое распространение библиотек глубокого обучения (TensorFlow, PyTorch) и вычислительных ресурсов делает разработку сложных CNN-моделей доступной для исследовательских групп.

Современные цифровые технологии, применяемые в исследовании психоэмоциональных состояний и аффективных вычислениях, включают достаточно разнообразный спектр методов и инструментов. Основная задача применения этих технологий – сделать анализ эмоций более точным, объективным и доступным для специалистов в области психологии, медицины и образования, а тем самым повысить эффективность диагностики и взаимодействия. Среди наиболее востребованных цифровых решений можно выделить следующие:

– глубокие нейронные сети, в частности свёрточные (CNN) и рекуррентные (RNN), для автоматического извлечения признаков и классификации эмоций по визуальным и аудиоданным;

– готовые облачные API для распознавания эмоций (например, Microsoft Azure Face API, Amazon Rekognition), предоставляющие быстрый доступ к предобученным моделям;

– цифровые платформы для сбора и разметки датасетов (Labelbox, Supervisely), которые ускоряют подготовку данных для обучения моделей;

– интерактивные инструменты визуализации (TensorBoard, Streamlit, Gradio) для анализа работы моделей и демонстрации результатов;

– методы обработки сигналов и компьютерного зрения (OpenCV, LibROSA) для предобработки изображений, видео и аудиозаписей;

– фреймворки для развёртывания моделей (TensorFlow Serving, ONNX Runtime) в производственной среде.

Все перечисленные решения могут использоваться не только по отдельности, но и сочетаться друг с другом для создания комплексных систем анализа эмоционального состояния, объединяющих мультимодальные данные и работающих в реальном времени.

Важным аспектом разработки исследовательского программного обеспечения является создание удобного и интуитивно понятного пользовательского интерфейса, а также выбор эффективного технологического стека. Для реализации системы распознавания эмоций был выбран язык программирования Python и связанные с ним библиотеки. Данный выбор обусловлен следующими причинами: низкий порог вхождения и богатая экосисте-

ма для машинного обучения; наличие подробной документации и активного сообщества; высокий уровень абстракции в библиотеках, что ускоряет разработку; кроссплатформенность и возможность развёртывания на различных аппаратных платформах. В частности, для построения нейронной сети использовался фреймворк TensorFlow и его высокоуровневая обёртка Keras [3], для обработки изображений – библиотека OpenCV, а для создания веб-интерфейса – фреймворк Streamlit.

Основная часть. Одним из способов повышения точности и объективности в исследовании психоэмоциональных состояний является использование автоматизированных систем анализа, созданных с помощью современных методов машинного обучения и компьютерного зрения. Такие системы способны оказать существенное влияние на приобретение новых знаний в области аффективных вычислений и формирование практических навыков работы с цифровыми инструментами диагностики. Технологии искусственного интеллекта позволяют сделать процесс анализа эмоций быстрым, воспроизводимым и свободным от субъективного фактора, тем самым способствуя повышению качества и достоверности исследований. Современные методы глубокого обучения позволяют автоматизировать и эффективно организовать процесс извлечения значимых признаков из визуальных данных посредством обучения сложных нейросетевых архитектур, их валидации и тестирования, а также получения интерпретируемых результатов в реальном времени. Все это способствует развитию новых подходов в психометрии и позволяет объединить различные источники данных (видео, аудио, физиологические сигналы) для комплексной оценки состояния человека. Системы на основе CNN обладают уникальной способностью выявлять сложные паттерны в мимике, которые часто неочевидны для человеческого глаза [1].

Цель данной работы – создание программного обеспечения для автоматического распознавания базовых эмоций по изображению лица на основе свёрточной нейронной сети. Данная разработка позволит улучшить качество и скорость анализа эмоциональных реакций по сравнению с традиционными методами (наблюдение, самоотчеты), а также создать инструментальную основу для внедрения в образовательный процесс психологических специальностей, клиническую практику и исследования человеко-компьютерного взаимодействия.

Архитектура системы распознавания эмоций предназначена для последовательного выполнения следующих задач: обнаружение лица на изображении, предобработка области лица, извлечение признаков и их классификация. В состав программного комплекса входят следующие основные модули:

– Модуль ввода и предобработки: отвечает за загрузку изображения, обнаружение лица с использованием каскадов Хаара (Haar Cascade) или нейросетевого детектора MTCNN, его выравнивание, изменение размера до 48x48 пикселей и нормализацию значений пикселей.

– Модуль классификации: представляет собой свёрточную нейронную сеть, которая принимает подготовленное изображение и возвращает вектор вероятностей принадлежности к одному из семи классов (гнев, отвращение, страх, радость, грусть, удивление, нейтральное).

– Модуль визуализации и вывода: накладывает на исходное изображение рамку (bounding box) вокруг обнаруженного лица, подписывает результат классификации и отображает гистограмму уверенности модели по всем классам.

Функционал созданного программного обеспечения предполагает как пакетный анализ набора изображений, так и интерактивную работу в режиме реального времени через веб-интерфейс. Работа с приложением осуществляется через интуитивно понятный веб-интерфейс, созданный с помощью фреймворка Streamlit. Пользователь может загрузить изображение в формате JPG или PNG, после чего система автоматически обработает его и отобразит результат. Стоит отметить, что в приложении также реализован функционал, позволяющий отображать промежуточные этапы обработки (например, область обнаруженного лица), а также текстовые пояснения для пользователя. Для программной реализации использовались библиотеки: TensorFlow и Keras для построения и обучения нейронной сети, OpenCV для задач компьютерного зрения, Streamlit для создания веб-интерфейса. Процесс разработки предусматривал работу с такими инструментами, как импорт и аугментация данных из датасета FER, проектирование архитектуры CNN [3], написание скриптов для обучения и валидации модели, а также разработку логики взаимодействия всех модулей системы.

Кратко опишем пользовательский сценарий для созданного программного обеспечения. В ходе исследовательской работы или учебного занятия пользователь (студент, психолог, исследователь) запускает веб-приложение. Для проведения анализа необходимо: загрузить файл с изображением лица или активировать веб-камеру; дождаться автоматической обработки, в ходе которой система обнаружит лицо, предобработает его и пропустит через нейросеть; ознакомиться с результатом, отображаемым на экране: исходное изображение с выделенной областью лица, текстовая метка эмоции (например, «Радость»), а также численный показатель уверенности модели (например, 92%). В ходе демонстрации работы системы целесообразно показать на примерах, как модель реагирует на различные выражения лица, а также обсудить возможные ошибки классификации и их причины (например, схожесть проявлений страха и удивления). Для более глубокого изучения работы модели пользователь может переключаться между разными предобученными архитектурами (например, VGG, ResNet) и сравнивать их результаты на одних и тех же изображениях [3].

В программную реализацию каждого слоя нейронной сети заложена логика, соответствующая принципам извлечения иерархических признаков. Ниже приведено описание работы ключевых компонентов свёрточной сети [1]:

– Свёрточные слои (Convolutional Layers): применяют набор фильтров (ядер) к входному изображению для извлечения локальных признаков (края, текстуры). Используемая функция активации ReLU позволяет сети моделировать нелинейные зависимости.

– Слои пулинга (Pooling Layers): уменьшают пространственные размеры карт признаков, сохраняя наиболее значимую информацию и обеспечивая инвариантность к небольшим смещениям.

– Полносвязные слои (Fully Connected Layers): агрегируют извлеченные высокоуровневые признаки и выполняют окончательную классификацию на 7 эмоциональных категорий.

Для повышения точности и устойчивости модели в процессе обучения были применены методы регуляризации. Аугментация данных осуществлялась с помощью случайных преобразований изображений: поворот на угол до 15 градусов, горизонтальное отражение, случайные сдвиги по высоте и ширине. Это позволяет искусственно увеличить размер обучающей выборки и научить модель быть более крепкой к вариациям во входных данных. Также для предотвращения переобучения использовались техники Dropout (отключение случайных нейронов) и L2-регуляризация весов [1].

В качестве перспектив дальнейшей разработки предполагается расширение функционала для работы с видеопотоком в реальном времени, интеграция аудиомодальности для анализа тона голоса, а также внедрение механизма объяснения решений модели (XAI) для большей прозрачности и доверия со стороны специалистов-психологов. Внедрение в учебный процесс данного программного обеспечения повысит эффективность практических занятий по дисциплинам, связанным с аффективными вычислениями и машинным обучением, обеспечит возможность самостоятельного проведения экспериментов студентами.

Заключение. Созданное программное обеспечение для автоматического распознавания эмоций по изображению лица на основе свёрточной нейронной сети прежде всего позволяет решить следующую актуальную задачу – обеспечить объективный, масштабируемый и экспресс-анализ психоэмоциональных состояний, предоставив исследователям, психологам и педагогам инструмент для изучения эмоциональных реакций в удобной, технологичной и воспроизводимой форме по сравнению с традиционными субъективными методами. Кроме очевидного повышения точности и скорости обработки данных, к преимуществам внедрения данной технологии в исследовательскую и образовательную практику также можно отнести:

1. Ускорение и автоматизацию анализа: система позволяет обрабатывать большие массивы визуальных данных (фото, видео) в реальном времени, что значительно сокращает временные затраты по сравнению с ручной экспертной оценкой и делает возможным проведение масштабных исследований.

2. Повышение объективности и наглядности результатов: анализ строится на количественных данных и алгоритмически извлеченных признаках, что минимизирует влияние человеческого фактора. Визуализация результатов (выделение области лица, гистограмма уверенности) способствует более глубокому пониманию работы модели и интерпретации результатов.

3. Расширение возможностей для обучения и исследований: инструмент предоставляет студентам и исследователям практический доступ к современным методам аффективных вычислений, способствуя формированию компетенций на стыке психологии, нейронаук и data science, а также открывая новые направления для междисциплинарных проектов.

Список литературы

1. Шолле, Ф. Глубокое обучение на Python / Ф. Шолле ; пер. с англ. А. Н. Киселева. – СПб. : Питер, 2018. – 400 с.

2. Li, S. Deep Facial Expression Recognition: A Survey / S. Li, W. Deng // IEEE Transactions on Affective Computing. – 2022. – Vol. 13, No. 3. – P. 1195–1215. – DOI: 10.1109/TAFFC.2020.2981446.

3. Goodfellow, I. J. Challenges in Representation Learning: A Report on Three Machine Learning Contests / I. J. Goodfellow [et al.] // Neural Networks. – 2015. – Vol. 64. – P. 59–63. – DOI: 10.1016/j.neunet.2014.09.005.

The article describes the methodological foundations and preliminary results of the development of an automatic system for recognizing basic human emotions from facial images using convolutional neural networks (CNN). The key stages of implementation are considered, from data preprocessing and architecture selection to model training. The development is focused on applications in psychology, clinical diagnostics, adaptive educational systems, and human-machine interaction.

Скорябкин Артем Валерьевич, магистрант 2 курса факультета математики и информатики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, skorabkinartem@gmail.com.

Научный руководитель – *Шушкевич Геннадий Чеславович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры современных технологий программирования Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

УДК 612.117.6

А. Н. СУХОЦКИЙ, М. С. МАЦКЕВИЧ, Ю. Н. КЕНДЫШ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ КРОВИ НА ВЫХОДЕ ИЗ СОСУДОВ

Используя геометрические и физиологические характеристики артериальных сосудов различных радиусов, представлена зависимость изменения температуры сосуда от его размера, определены температурные показатели человеческого тела в сосудистой системе, с применением модели, описывающая процесс кондуктивной теплоотдачи от крови, циркулирующей в микрососудистом русле кожи.

Человеческое тело постоянно нуждается в энергии для своих функций и активно взаимодействует с окружающей средой в плане теплообмена. Благодаря этому механизму терморегуляции достигается адаптация и поддерживается определенная температура. Внутренние органы и ткани поддерживают стабильную температуру в пределах 37,2–37,5 °C, в то время как температура кожи на разных участках тела может отличаться, причем разница может достигать 9 °C [1; 2]. Кроме того, температура тела подвержена суточным изменениям, на которые влияют пол, возраст и характеристики кожного покрова.

Основной целью настоящего исследования являлось определение температурных показателей человеческого тела в сосудистой системе. Это достигалось путем анализа экспериментально полученных данных о температурных полях в заданных областях. Мы стремились установить корреляцию между градиентом температуры между поверхностью тела и окружающей средой и объемом тепловых потерь, обусловленных конвекцией, для участников экспериментальной группы.

Методы исследования: Измерения были выполнены бесконтактным инфракрасным термометром модели DT-8806S, предназначенным для измерения температуры тела человека. Диапазон рабочих температур от 10 до 400 °C. Согласно инструкции было указано, что нужно соблюдать дистанцию измерения, равную 5–15 см и перед использованием инфракрасный термометр необходимо оставить в помещении на 15–20 минут, эти пункты были соблюдены при проведении измерений. Перед измерением температуры у испытуемых убирали волосы с места измерения, и был удален пот. Прибор позволяет проводить исследования в двух режимах, первый – режим «body» для измерения температуры тела или режим «surface» для измерения температуры поверхности тела человека.

Устройство соответствует стандарту FCC в части 15 параграф B: 2007, требованиям к радиочастотным устройствам ICEC-003: 2004 требованиям к устройствам, являющимся источниками электромагнитных помех – цифровые устройства. Согласно инструкции для достоверности проведенных измерений было выполнено условие, если устройство не используется в течение длительного периода времени, то включение производится с задержкой в 1–2 секунды и предварительно измеряется комнатная температура. В качестве испытуемых для экспериментальной группы были выбраны студенты физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Критериями отбора являлись возраст (18–35 лет) и отсутствие каких-либо диагностированных патологий или дистрофических изменений.

Исходя из полученных результатов отмечено, что нет различия в значении полученных температур для таких областей как: голень, бедро, область паха для здоровых пациентов между левой и правой частью.

В рамках исследования была применена модель, описывающая процесс кондуктивной теплоотдачи от крови, циркулирующей в микрососудистом русле кожи. Для стандартизации условий, начальная температура крови на артериальном конце микрососудов была зафиксирована на уровне 37,2 °C. По мере прохождения крови по сосудам, происходит теплообмен с окружающими тканями, температура которых также была принята постоянной и равной 35 °C. Для количественного анализа этого теплообмена была разработана балансная схема для дифференциального элемента сосуда. В соответствии с законом сохранения энергии, изменение энтальпии крови в данном элементе эквивалентно тепловому потоку, передаваемому через боковую поверхность элемента в окружающую среду. Математическое описание этого явления представлено далее.

$$c \cdot m \cdot (T_2 - T_1) = a \cdot S \cdot (T_2 - T_{\text{тк}}) \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость крови; m – масса крови единичного объема; α – коэффициент теплообмена крови, двигающейся по сосуду; S – площадь боковой поверхности выделенного элемента сосуда; $T_{\text{тк}}$ – температура ткани, окружающей сосуд; T_1 и T_2 – температура крови в выделенном элементе сосуда.

Расчеты затруднены необходимостью точного определения коэффициента теплоотдачи. Этот коэффициент зависит от тепловых свойств тканей, геометрии сосудов и скорости кровотока. На основе имеющихся данных можно оценить эффективный теплообмен крови в сосуде.

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{a_{\text{вн}}} + \frac{1}{a_{\text{внеш}}}}. \quad (2)$$

Коэффициент $a_{\text{вн}}$ отражает эффективность теплообмена между движущейся кровью и внутренней поверхностью сосуда, тогда как $a_{\text{внеш}}$ характеризует скорость рассеивания тепла от внешней стенки сосуда в окружающие биологические ткани. Для целей нашего исследования, мы моделируем движение крови как ламинарное. В условиях ламинарного потока жидкости в трубчатых системах, передача тепла в поперечном направлении к основному вектору движения потока происходит преимущественно за счет теплопроводности.

Процесс решения уравнения (1) включает переход к его дифференциальной форме. В результате этого перехода уравнение будет представлено в следующем виде:

$$c \cdot m \cdot dT = a \cdot S \cdot \left(T - T_{\text{ср}}\right) \cdot dt. \quad (3)$$

Постоянные величины S и m элемента объема можно раскрыть.

$$S = 2 \cdot \pi \cdot R_{\text{ц}} \cdot \Delta l, m = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \Delta l\ , \quad (4)$$

где ρ – плотность крови; Δl – элементарная длина выделенного объема крови. Подставляя эти соотношения в формулу (2) и производя соответствующие преобразования, получим следующее выражение:

$$\frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{T} - \mathrm{T_{ср}}} = \frac{-2\alpha}{\mathrm{c} \cdot \rho \cdot \mathrm{R_{ц}}} \mathrm{dT}\ . \quad (5)$$

Интегральное решение этого уравнения имеет следующее выражение в соответствии с данными авторов.

$$T = \left(T_0 - T_{\text{ср}}\right) \cdot e^{\frac{2a}{c\rho R_{\text{ц}}} t} + \cdot \mathrm{T_{ср}}, \quad (6)$$

где T_0 – температура крови на входе в сосуд; T – температура крови на выходе из сосуда. Время t движения крови по сосуду определяется из соотношения $t = \frac{L}{V}$, где L – длина сосуда, а V – скорость движения крови по сосуду. Исходя из этой формулы и были во многом проведены исследования теплоотдачи из крови артериальных сосудов. На рисунке 1 представлена модель сосудов.

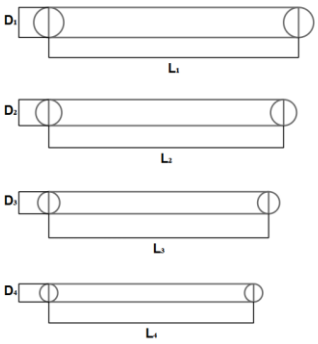


Рисунок 1 – Схематическое изображение сосудов

В таблице представлены основные характеристики для расчета температуры крови на выходе из сосуда, для моделирования изменений температуры крови на выходе из сосудов [3].

Таблица 1 – Геометрические и физиологические характеристики артериальных сосудов

Радиус сосуда R, см	Длина сосуда L, см	Линейная скорость кровотока V, см/с	Время нахождения единицы объема крови в сосуде t, с
0,0051	0,44	1,45	0,32
0,0073	0,53	2,23	0,22
0,012	0,62	3,1	0,23
0,0151	0,74	4,1	0,16

Используя геометрические и физиологические характеристики артериальных сосудов радиусом 0,033 см и радиусом 0,021 см, представим зависимость изменения температуры сосуда от его размера.

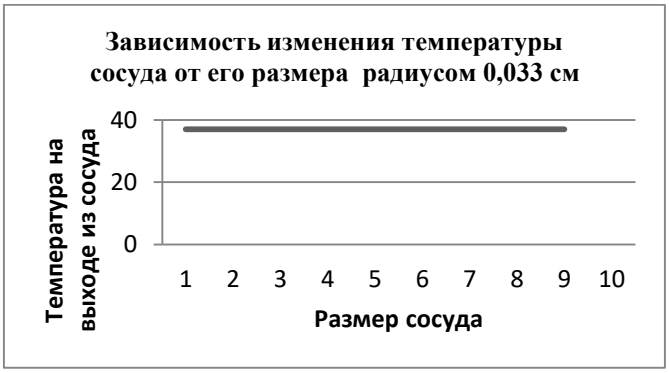


Рисунок 2 – Зависимость изменения температуры сосуда радиусом 0,033 см от его размера

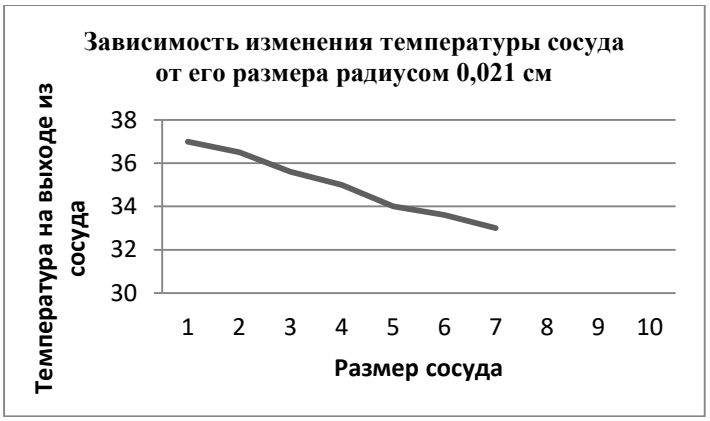


Рисунок 3 – Зависимость изменения температуры сосуда радиусом 0,021 см от его размера

На основе анализа геометрических и физиологических особенностей артериальных сосудов разного диаметра, мы продемонстрировали, как температура сосуда коррелирует с его размером. Были установлены типичные температурные значения в сосудистой системе человека, используя модель, описывающую передачу тепла путем теплопроводности от крови, протекающей в мелких кровеносных сосудах кожи.

Список литературы

1. Лакота, Н. Г. Изучение температурного гомеостаза в реальной и моделируемой невесомости / Н. Г. Лакота, И. М. Ларина // Физиол. человека. – 2002. – Т. 28, № 3. – С. 82–92.

2. Жарнова, О. А. Моделирование теплообмена тела человека с окружающей средой / О. А. Жарнова, Э. А. Быковский, Т. К. Крупская // Культура движения, питания, тела и здоровья в современном обществе : сб. материалов Междунар. науч.-метод. конф., Гродно, 3–4 апр. 2025 г. – Гродно : ГрГМУ, 2025. – С. 30–33.

3. Лучаков, Ю. И. Перенос тепла кровью: сопоставление расчетных и экспериментальных данных / Ю. И. Лучаков, Н. Г. Камышев, П. Д. Шабанов // Научные обзоры. – 2009. – Т. 7, № 4. – С. 3–20.

Сухоцкий Александр Николаевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, sashasukhozky@gmail.com.

Кендыш Юлия Николаевна, студент 6 курса лечебного факультета Гродненского государственного медицинского университета, Гродно, Республика Беларусь, kendyshy03@mail.ru.

Мацкевич Матвей Сергеевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nektoiama@gmail.com.

Научный руководитель – *Жарнова Ольга Александровна*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, zharnova_oa@grsu.by.

Научный руководитель – Крупская Татьяна Константиновна, магистр педагогических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, krupskaya_oa@grsu.by.

УДК 535.37

А. И. СЫТЫЙ

РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИНВЕРСНОЙ СИСТЕМОЙ ИЗ ТРЁХ ЦИЛИНДРОВ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИХ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Изучение закономерностей изменения угловых характеристик в модельной системе, представляющей собой три параллельные цилиндрические поры, расположенные в диэлектрической матрице с показателем преломления $n_{ср}$ = 1.73, при изменении показателя преломления материала заполнения пор в широком диапазоне: от $n_ч$ = 1.0 до $n_ч$ = 2.83. В ходе численного анализа установлено, что переход от «оптически менее плотных» ($n_ч < n_{ср}$) к «оптически более плотным» ($n_ч > n_{ср}$) включениям приводит к существенной трансформации исследуемых характеристик. Исследование актуально для разработки новых композитных материалов и фотонных структур с управляемыми оптическими характеристиками.

Значительные перспективы в развитии элементной базы оптики, лазерной физики и радиофизики связывают в настоящее время с использованием упорядоченных структур, в которых масштаб упорядоченности сравним с длиной волны электромагнитного излучения. Интерес к таким пространственно-организованным системам определяется возможностью управления их функциональными свойствами за счет регулирования коллективных электродинамических взаимодействий, что достигается изменением характеристик пространственной организации. Обычно исследуются бесконечные идеально периодические системы, т.н. фотонные кристаллы [1–3]. В то же время экспериментально реализуются конечные по размерам частично-упорядоченные системы, в которых периодичность расположения элементов не является идеальной [2]. Одним из наиболее интересных объектов такого рода являются ансамбли диэлектрических цилиндров конечной длины.

В данной работе приведены результаты расчета и анализ функций углового распределения индикатрис рассеяния (ФУРИР) планарного мультимера. Под планарным мультимером понимается структура, состоящая из трех линейно расположенных идентичных цилиндров конечной длины L = 1500 нм и диаметра d = 100 нм, на расстоянии L = 100 нм друг от друга (рисунок 1) с азимутальным углом 1-го клона равным $\gamma = 0^o$. Расчеты выполнялись с использованием формализма объемного интегрального уравнения [4]. Диапазон изменения показателя преломления цилиндров изменяется от от $n_ч$ = 1.0 до $n_ч$ = 2.83, а показатель преломления среды $n_{ср}$ = 1.73. Полученные данные могут применяться в оптическом и СВЧ диапазоне, т. к. входными параметрами численного метода являются относительные $\rho_d = \frac{\pi n_0 d}{\lambda}$, $\rho_l = \frac{\pi n_0 l}{\lambda}$, где l – длина цилиндра, d – диаметра цилиндра, n_0 – показатель преломления среды, в которую помещены цилиндры. Это дает возможность использовать полученные результаты в других частотных диапазонах с использованием соответствующего масштабирования.

Использованный формализм объемного интегрального уравнения является эффективным методом учета электродинамических взаимодействий в упорядоченной системе несферических рассеивателей. При проведении расчетов нами предполагалось, инверсная система ориентирована вдоль направления падающего излучения.

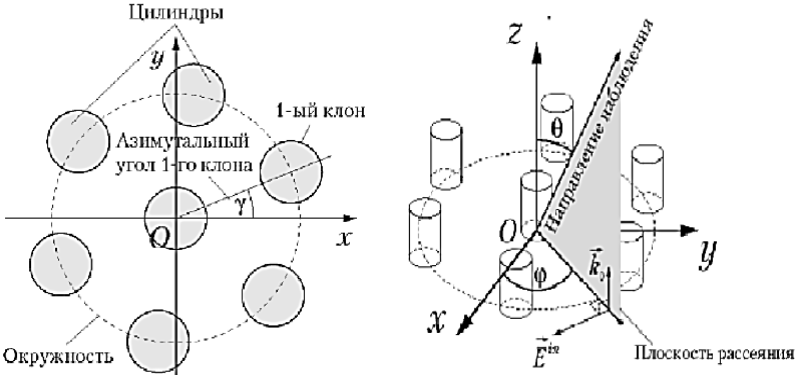


Рисунок 1 – Схематическое изображение мультимера, состоящего из цилиндров конечной длины

На рисунке 2 представлены функции углового распределения интенсивности рассеяния тримера из трех воздушных цилиндров с d = 100 нм, l = 1500 нм, $n_{ср}$ = 1.73, λ = 300 нм при расстоянии между цилиндрами L = 100 нм с заполнением воздушных цилиндрических пор материалами с показателями преломления $n_ч$ = 1.0; 1.33; 1.65; 1.76; 2.83.

Из рисунка видно, что чем ближе показатель преломления материала частиц к показателю преломления среды, тем меньше вытянутость углового распределения интенсивности рассеяния. При показателе преломления $n_ч$ = 1 (поры не заполнены материалом) интенсивность рассеяния $i(\theta)$ = 485. При заполнении поры материа-

лом с показателем преломления 1.65 и 1.76 интенсивность рассеяния уменьшается до 31 и 7 соответственно. Это связано с уменьшением явлений переотражения проходящего излучения внутри материала. При замене материала частиц на оптически более плотный по сравнению со средой интенсивность рассеяния будет увеличиваться. Так при показателе преломления материала $n_ч = 2.0$ $i(\theta) = 952$. Заметим, что изменение интенсивности рассеяния в зависимости от разницы показателей преломления среды и частиц носит немонотонный характер. Так при показателе преломления $n_ч = 2.83$ интенсивность рассеяния становится меньше, чем при показателе $n_ч = 2.0$. Это связано с когерентными эффектами многократного рассеяния волн (кооперативные эффекты) [2]. Эти эффекты делят на 2 группы, это кооперативные эффекты 1 рода и кооперативные эффекты 2 рода. К кооперативным эффектам 1 рода относят интерференцию волн, рассеянных отдельными частицами, находящимися в поле падающего излучения. Кооперативные эффекты второго рода представляют собой когерентное переоблучение между частицами, за счет которого формируется эффективное поле в месте расположения каждой частицы.

Проявление когерентных, или интерференционных, эффектов зависит от различных параметров рассеивающей среды. К ним относятся оптические постоянные вещества частиц и окружающей их среды, форма, размеры и концентрация частиц. Влияют и параметры падающего излучения – длина волны, степень когерентности, поляризация. Важнейшую роль играет топология дискретной рассеивающей системы.

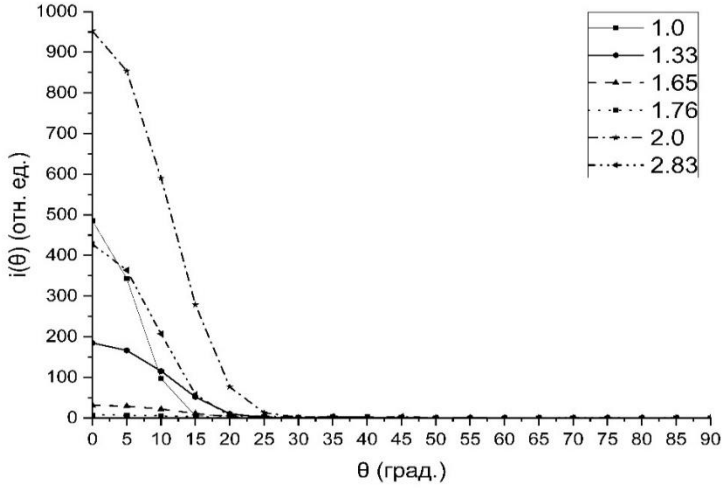


Рисунок 2 – Функции углового распределения интенсивности рассеяния тримера из трёх воздушных цилиндров с d = 100 нм, l = 1500 нм, $n_{ср}$ = 1.73, λ = 300 нм при расстоянии между цилиндрами L = 100 нм

Список литературы

1. Gaponenko, S. V. Introduction to Nanophotonics / S. V. Gaponenko. – Cambridge : Cambridge University Press, 2010. – 465 p.

2. Ковтун-Кужель, В. А. Рассеяние электромагнитных волн в пространственно-упорядоченных структурах диэлектрических цилиндров конечной длины : дис. … канд. физ.-мат. наук : 01.04.05 / В. А. Ковтун-Кужель. – Минск, 2019. – 128 л.

3. Ковтун-Кужель, В. А. Влияние топологии системы конечных диэлектрических цилиндров на диаграммы направленности излучения СВЧ диапазона / В. А. Ковтун-Кужель, Д. В. Хацук, А. П. Самородов // ОПТО-, МИКРО- И СВЧ-Электроника – 2018 : сб. науч. тр. I Междунар. науч.-техн. конф., 22–26 окт. 2018 г. / Нац. акад. наук Беларуси ; редкол.: Н. С. Казак (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Ин-т физики НАН Беларуси, 2018. – С. 214–217.

4. Дынич, Р. А. Моделирование характеристик рассеяния электромагнитного излучения упорядоченным ансамблем диэлектрических цилиндров конечной длины / Р. А. Дынич, В. А. Ковтун-Кужель, А. Н. Понявина // Журнал прикладной спектроскопии. – 2011. – Т. 78 № 6. – С. 874–879

The study investigates the scattering indicatrix variations in a system of three cylindrical pores within a dielectric matrix. It is established that the minimum intensity is achieved when the refractive indices of the media converge, while an increase in dielectric contrast leads to a non-monotonic change in scattering. This effect is attributed to the influence of first- and second-order cooperative effects determined by interference and coherent re-radiation between the structural elements.

Сытый Артем Игоревич, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, sytyj_ai@grsu.by.

Научный руководитель – *Ковтун-Кужель Виктория Александровна*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, vkovtun@grsu.by.

УДК 535

М. А. ЦИДИК, А. Л. СИТКЕВИЧ

ХАРАКТЕР ДЕСТРУКЦИИ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

Описано изучение полиметилметакрилата (ПММА), а именно разрушения его образца под воздействием кратковременных импульсов рубинового лазера ГОР-100М в окружении трёх различных сред: атмосферного воздуха, зоны высокого вакуума, и воды. Для изучения образца использовалась экспериментальная установка на основе интерферометра Маха-Цендера. Для автоматизации обработки теневых картин разработана программа на языке Python.

Объектом работы являются теневые картины образца ПММА, снятые скоростной камерой СФР-1М, отображающие изменения и дефекты, образовавшиеся при облучении образца лазерными импульсами. Цель работы – с помощью полученных теневых картин (рисунок 1) проанализировать процесс разрушения образцов в средах воздуха, воды и вакуума, сделать выводы о характере образования дефектов, предположить возможные методы минимизации или устранения появляющихся повреждений материала.

Прозрачные диэлектрики, в частности полиметилметакрилат (ПММА), находят широкое применение в лазерной технике в качестве активных сред, оптических волноводов и элементов систем формирования пучка [1]–[3]. Это обусловлено их хорошими оптическими свойствами и относительной простотой изготовления. Однако существенным ограничением их практического использования является низкая лучевая стойкость. В связи с этим выявление особенностей и механизмов разрушения прозрачных полимеров в различных средах является важной научной и практической задачей.

Эксперимент проводился на установке, подробно описанной в работе [4]. Исследуемый образец помещался в плечо интерферометра Маха-Цендера, который был состыкован со скоростной фоторегистрирующей камерой СФР-1М 14, плоскость фотопленки в которой была сопряжена с меридиональным сечением воздействующего на образец лазерного луча при помощи объектива 15. Скоростная камера работала в режиме лупы времени и обеспечивала пространственное разрешение по полю объекта ~ 50 мкм. Временное разрешение составляло ~ 1 мкс.

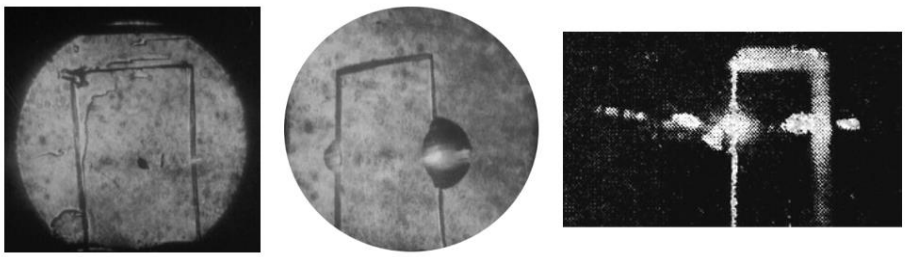


Рисунок 1 – Теневые картины образца ПММА в вакууме (слева), воде (центр) и в воздухе (справа)

Представим анализ полученной динамики разрушений ПММА в упомянутых условиях. Наиболее характерный случай эксперимента – окружение образца атмосферным воздухом – показывает ожидаемые результаты: при фокусировке на тыловую грань образца уже через 54 микросекунды начинается термическое разрушение, расходящееся от точки фокусировки к внешней грани. Вскоре развивается горение материала при наличии кислорода с выделением пароплазменных образований (рисунок 2 – верхний ряд). Эти пароплазменные образования затем играют роль в экранировке излучения и замедлении деструкции.

Особенным случаем является эксперимент в тех же условиях, но при фокусировке лазерного излучения не на поверхности образца, а в его объёме (рисунок 2 – нижний ряд). Хотя процессы деструкции повторяют уже описанные, меняется размер выносимой жидко-капельной фазы. При воздействии на объём происходит поглощение энергии внутренним материалом и образуется зона повышенного давления, что приводит к резкому выбросу разогретого ПММА. По сравнению с поверхностным облучением, количество выносимого таким образом материала при фокусировке в объём увеличивается почти в два раза.

Таким образом, в условиях атмосферного давления основным механизмом кратерообразования является комбинация термического разложения и последующего горения материала при наличии кислорода.

При погружении образца в вакуум давлением 10^{-3} Па возникают особенные закономерности. Так как вокруг образца отсутствует кислород, процесс горения не начинается и поверхностный кратер не образуется вовсе. В таком случае лазерное излучение свободно проходит внутрь образца и поглощается микроскопическими неоднородностями самого ПММА. Поглощаемое излучение затем приводит к образованию областей разрушения – полых каверн. С поглощаемой энергией растёт и объём каверн, при чём те, что находятся позади других, замедляются в росте из-за экранирования излучения другими кавернами. Таким образом, поверхностный кратер развивается только в том случае, если расширяющаяся каверна достигает поверхности образца.

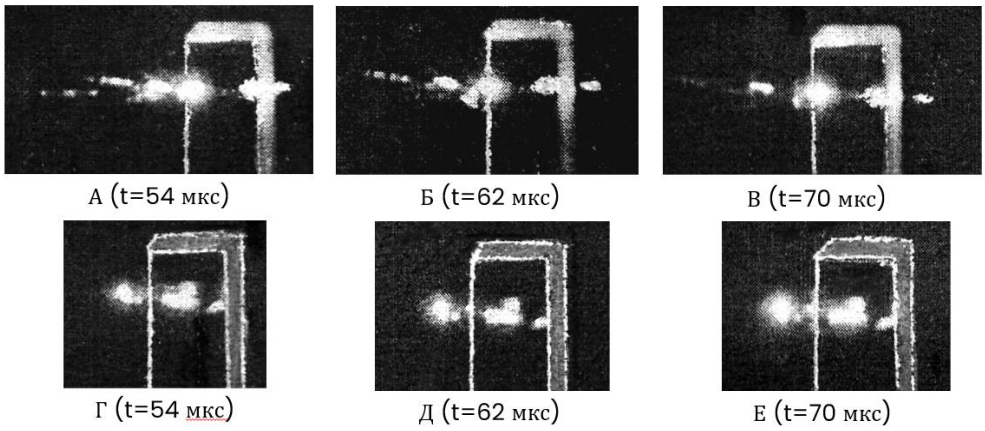


Рисунок 2 – Облучение образца в воздухе с фокусировкой на поверхность (А, Б, В) и в объём материала (Г, Д, Е)

В водной же среде облучение ПММА становится похожим на облучение металла [4–5]. После начала облучения на поверхности образца мгновенно формируется парогазовый пузырь, экранирующий излучение и не дающий ему проникнуть вглубь материала. Поверхностный кратер не успевает развиться и горение пресекается, подобно опыту в вакууме.

Для последующего автоматизированного анализа геометрических характеристик пузырей на теневых картинах, полученных при лозерном облучении ПММА в воде, была разработана программа обработки изображений на языке Python с использованием библиотек компьютерного зрения **OpenCV** и численных методов **NumPy.** Алгоритм работы программы включал следующие этапы:

На первом этапе происходит загрузка и препроцессинг исходной теневой картины с использованием библиотек **OpenCV** и **NumPy.** Изображение в градациях серого фильтруется медианным фильтром cv2.medianBlur для подавления шума. Следующим шагом происходит сегментация изображения. Для этого применяется детектор границ Канни и преобразование Хафа для поиска окружностей, соответствующих границам пузырей (листинг 1). Затем происходит измерение метрик с использованием инструментов библиотеки **OpenCV**. Для каждого пузыря строится ограничивающий прямоугольник **cv2.boundingRect**; диаметр вдоль поверхности равен ширине прямоугольника, радиус перпендикулярно поверхности – половине высоты. Еще один этап – калибровка средствами библиотеки **NumPy**. Пиксельные значения умножаются на масштабный коэффициент (мм/пиксель), полученный калибровкой по эталонному объекту. И, наконец, экспорт данных: результаты измерений для всех пузырей (номер кадра, диаметр, радиус, координаты центра) сохраняются в текстовый файл формата CSV для последующего статистического анализа.

Листинг 1: Сегментация через пороговую обработку и поиск контуров

```
# Адаптивная пороговая бинаризация
thresh = cv2.adaptiveThreshold(
    blurred,
    255,
    cv2.ADAPTIVE_THRESH_GAUSSIAN_C,
    cv2.THRESH_BINARY_INV,
    11,
    2
)

# Морфологические операции для очистки
kernel = np.ones((3, 3), np.uint8)
cleaned = cv2.morphologyEx(thresh, cv2.MORPH_OPEN, kernel, iterations=2)

# Поиск контуров
contours, hierarchy = cv2.findContours(
    cleaned,
    cv2.RETR_EXTERNAL,
    cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE
```

```
)

# Фильтрация контуров по площади
min_area = 50
bubble_contours = []
for contour in contours:
    area = cv2.contourArea(contour)
    if area > min_area:
        bubble_contours.append(contour)

        # Получение ограничивающего прямоугольника
        x, y, w, h = cv2.boundingRect(contour)

        # Проверка на округлость (опционально)
        perimeter = cv2.arcLength(contour, True)
        if perimeter > 0:
            circularity = 4 * np.pi * area / (perimeter * perimeter)
            if circularity > 0.6:  # Порог округлости
                print(f»Пузырь: центр ({x + w//2}, {y + h//2}), «
                    f»ширина {w}, высота {h}, округлость {circularity:.2f}»)
```

На основе полученных линейных размеров пузырей проводился анализ динамики роста парогазового образования на поверхности ПММА по методике. Подробно описанной в работе [4].

Подводя итоги, отметим, что разрушение ПММА под действием лазерного излучения инициируется тепловым нагревом поглощающих включений, а его характер определяется условиями среды: в вакууме деструкция носит объемный характер, в воде локализуется на поверхности вследствие экранирования, на воздухе сопровождается горением. Образование же кратера на поверхности ПММА происходит исключительно в присутствии кислорода и обусловлено горением полимера.

На основе этих выводов можно построить несколько практических рекомендаций. Для повышения лучевой прочности объемных элементов (активных сред) необходимо минимизировать содержание включений и проводить эксплуатацию в вакууме или инертной среде, а для защиты поверхностных элементов (линз, окон) от кратерообразования требуется исключить контакт с кислородом, подавляя тем самым механизм горения.

Полученные результаты создают основу для разработки полимерных материалов с повышенной стойкостью и оптимизации режимов лазерной обработки.

Список литературы

1. Кунижев, Б. И. Влияние лазерного облучения на процессы диэлектрической релаксации полиметилметакрелита / Б. И. Кунижев, А. Х. Цечоева, С. Л. Кушхатлоков, М. Х. Кадыкоева // Научные известия. – 2015. – №1. – С. 86–88.

2. Хебоян, А. Взгляды на полимерные материалы для протезирования и стоматологической имплантологии / А. Хебоян, М. С. Зафар, М. И. Каробари, Дж. П. М. Трибст // Материалы. – 2022 – № 15 – С. 53–83.

3. Тигмеану, С. В. Полимеры, произведенные аддитивным методом в стоматологии, текущее состояние и будущие перспективы / С. В. Тигмеану, Л. Ц. Арделеан, Л.-Ц. Русу, М.-Л. Негрутиу // Полимеры. – 2022. – № 14. – С. 36–58.

4. Васильев, С. В. Особенности модификации кристаллической структуры кадмия лазерным излучением / С. В. Васильев, А. Л. Ситкевич // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2025. – Т.15, № 1. – С.114–124

5. Цидик, М. А. Автоматическая обработка интерферограмм моделирование на их основе полей плотности концентрации электронов / М. А. Цидик, А. Л. Ситкевич // Физика конденсированного состояния : материалы XXXIII Междунар. науч.-практ. конф. аспир., магистр. и студ. (Гродно, 3–4 апреля 2025 г.) / ГрГУ им. Янки Купалы, физ.-техн. фак. ; редкол.: Г. А. Гачко (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2025. – С. 190–193.

This paper describes the study of polymethylmethacrylate (PMMA), namely, the destruction of its sample under the influence of short-term pulses of a GOR-100M ruby laser surrounded by three different media: atmospheric air, a high vacuum zone, and water. An experimental setup based on a Mach-Zehnder interferometer was used to study the sample.

Цидик Матвей Артурович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, 07matvej@gmail.com.

Научный руководитель – *Ситкевич Анастасия Леонидовна*, магистр физико-математических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, girl-physicist@mail.ru.

УДК 53.072

Н. М. ЧЕРНЕЦКИЙ, П. А. ЯНУЛЕВИЧ

МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ

Рассматривается компьютерное моделирование квантовой системы «частица в потенциальном ящике с бесконечно высокими стенками». Получено аналитическое решение стационарного уравнения Шрёдингера для одномерного, двумерного и трёхмерного случаев. Разработано программное обеспечение на языке C#, позволяющее визуализировать волновые функции, распределение плотности вероятности и особенности стационарных состояний. Проведено сравнение квантового и классического описаний движения частицы.

Согласно вероятностной интерпретации квантовой механики, волновая функция сама по себе не является непосредственно наблюдаемой величиной, однако квадрат её модуля определяет плотность вероятности обнаружения частицы в заданной области пространства [2, с. 21–22]. Для стационарных состояний частицы внутри потенциального ящика, где потенциальная энергия равна нулю, используется стационарное уравнение Шрёдингера:

$$-\frac{\hbar^2}{2\mathrm{m}}\nabla^2\psi = \mathrm{E}\psi.$$

В такой постановке задача сводится к нахождению собственных функций и собственных значений энергии, удовлетворяющих граничным условиям на стенках ящика [2, с. 66–69; 3, с. 60–61].

Для прямоугольного трёхмерного ящика с размерами L_x, L_y, L_z решение получается методом разделения переменных. Волновая функция в этом случае представляется произведением одномерных решений и имеет вид:

$$\psi_{\mathrm{n}x\mathrm{n}y\mathrm{n}z}(x,y,z) = \sqrt{\frac{8}{\mathrm{L}_x\mathrm{L}_y\mathrm{L}_z}}\,sin\left(\frac{\mathrm{n}_x nx}{\mathrm{L}_x}\right)sin\left(\frac{\mathrm{n}_y ny}{\mathrm{L}_y}\right)sin\left(\frac{\mathrm{n}_z nz}{\mathrm{L}_z}\right).$$

где n_x, n_y, n_z – натуральные квантовые числа [1, с. 4–5]. Из этого следует, что допустимые состояния системы дискретны, а изменение квантовых чисел приводит к усложнению пространственной структуры волновой функции и к появлению узловых поверхностей, в которых вероятность нахождения частицы равна нулю [1, с. 4–5; 3, с. 61–62].

В одномерном случае бесконечной потенциальной ямы граничные условия требуют обращения волновой функции в нуль на границах области. Это приводит к синусоидальному виду решения и к дискретному спектру состояний. При бесконечных стенках волновая функция вне ямы равна нулю, а внутри принимает синусоидальный вид; из граничных условий следует квантование волнового числа и, следовательно, квантование энергии [3, с. 60–62]. Именно это свойство делает модель «частица в ящике» удобной для учебного и вычислительного моделирования.

Рисунок 1 – Общий вид интерфейса программы

На основе указанных теоретических соотношений было разработано программное обеспечение для визуализации квантовых состояний частицы в ящике. Программа реализована на языке **C#** на платформе **.NET Framework** и использует графический интерфейс с отдельными областями для задания параметров, построения графиков и пространственной визуализации распределения вероятности. В структуре интерфейса предусмотрены поля ввода квантовых чисел n_1, n_2, n_3, переключение размерности задачи, а также кнопки управления моде-

лированием. Визуализация включает построение графиков волновых функций и трёхмерное отображение распределения точек, соответствующих плотности вероятности (рис. 1).

Для численного представления распределения вероятности в программе используется метод Монте-Карло. Как следует из вашей реализации, в объёме ящика генерируются случайные точки, после чего точка отображается с вероятностью, пропорциональной величине $|\psi|^2$. Такой подход позволяет перейти от аналитического выражения волновой функции к наглядной пространственной картине квантового состояния. Кроме того, в программе реализовано построение одномерных графиков, показывающих изменение волновой функции при варьировании квантовых чисел, что делает модель удобной для демонстрации различия между основным и возбуждёнными состояниями.

Анализ результатов моделирования показывает, что для основного состояния (1,1,1) распределение вероятности имеет максимум в центральной части ящика. При переходе к состоянию (2,1,1) пространственная картина изменяется: возникает узловая область, разделяющая объём на две части с повышенной вероятностью нахождения частицы (рис.2). Эти результаты согласуются с аналитической формой трёхмерной волновой функции, поскольку увеличение хотя бы одного квантового числа ведёт к появлению дополнительной синусоидальной модуляции вдоль соответствующей координаты [1, с. 4–5].

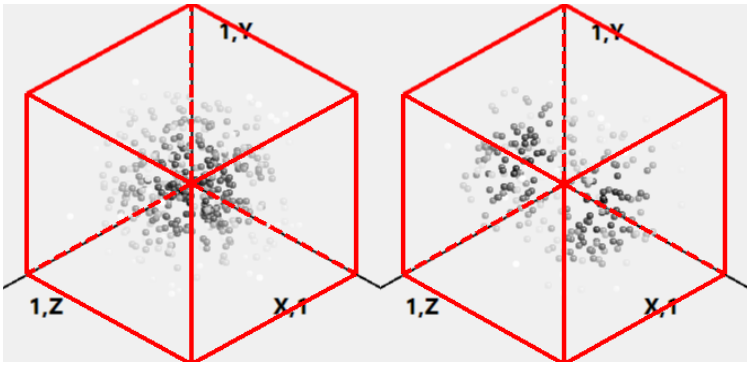


Рисунок 2 – Распределение плотности вероятности частицы в кубическом ящике для различного значения квантового числа

Сравнение квантового и классического описаний показывает их принципиальное различие *рис.3*. В классической механике частица в замкнутом объёме при отсутствии потерь энергии может находиться в любой точке с одинаковой вероятностью, тогда как в квантовом случае распределение вероятности определяется видом волновой функции и не является равномерным. Кроме того, в квантовой модели энергия принимает лишь дискретные значения, тогда как в классическом описании она изменяется непрерывно. Поэтому даже простейшая задача о частице в ящике наглядно демонстрирует фундаментальные особенности квантовой механики: квантование, наличие узлов и вероятностный характер описания состояния [1, с. 1–5; 2, с. 66–69].

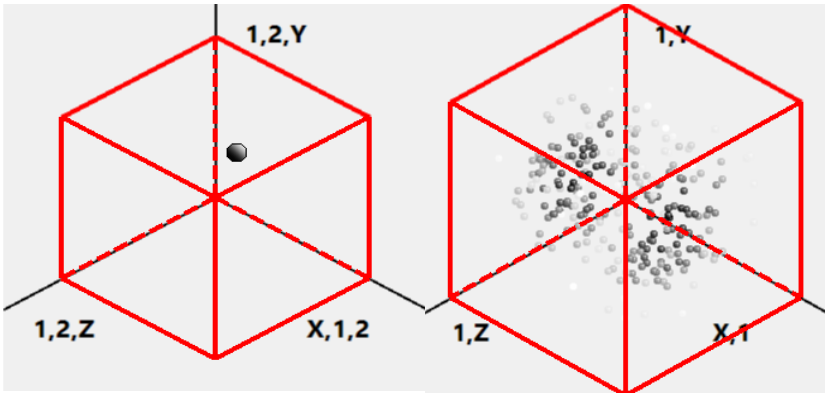


Рисунок 3 – Сравнение классического и квантового описания движения частицы в ящике

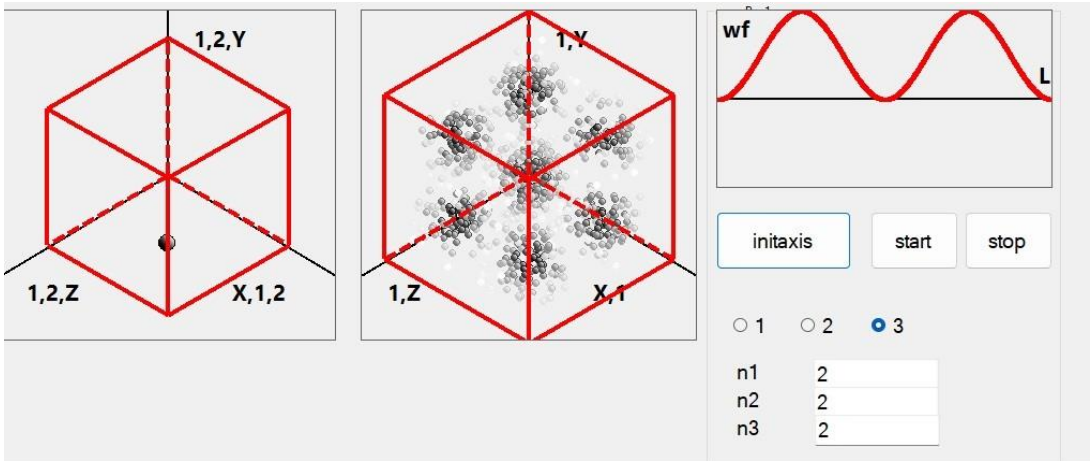


Рисунок 4 – Визуализация волновой функции частицы в потенциальном ящике

Представлена визуализация волновой функции частицы в потенциальном ящике для состояния (2,2,2) (рис. 4). Данное состояние относится к возбужденным и характеризуется более сложной пространственной структурой по сравнению с основным состоянием. По каждому из направлений наблюдается изменение формы волновой функции, обусловленное значениями квантовых чисел $n_1 = 2$, $n_2 = 2$, $n_3 = 2$. Это приводит к появлению узловых областей и симметричному распределению вероятности внутри ящика. На интерфейсе программы отображаются геометрическая модель системы, пространственная картина распределения и график волновой функции, что позволяет наглядно проследить связь между аналитическим решением задачи и его графической интерпретацией.

Разработанный программный комплекс может использоваться в учебном процессе при изучении квантовой механики, математического моделирования и методов научной визуализации. Его достоинством является сочетание аналитической основы и интерактивной компьютерной реализации: пользователь может изменять квантовые числа, наблюдать изменение формы волновой функции и сразу сопоставлять формульное описание с графическим представлением. Это повышает наглядность изучения квантовых явлений и позволяет использовать программу как демонстрационный инструмент при объяснении темы стационарных состояний и пространственного распределения вероятности.

Таким образом, компьютерное моделирование системы «частица в потенциальном ящике» позволяет не только воспроизвести основные результаты квантовой механики, но и сделать их доступными для визуального анализа. Полученная программа подтверждает дискретность спектра состояний, зависимость распределения вероятности от квантовых чисел и наличие узлов в возбуждённых состояниях.

Список литературы

1. Drobny, G. P. Lecture 12: A. Particle in a Box / G. P. Drobny. – University of Washington, Chemistry 453, 2013. 6 p.

2. Давыдов, А. С. Квантовая механика : учеб. пособие / А. С. Давыдов. – 3-е изд., стереотип. – СПб. : БХВ-Петербург, 2011. – 704 с.

3. Савельев-Трофимов, А. Б. Введение в квантовую физику : электрон. конспект лекций / А. Б. Савельев-Трофимов. – М. : Teach-In, 2009. – 132 с.

The paper considers computer modeling of the quantum system «particle in an infinite potential box». An analytical solution of the stationary Schrödinger equation is obtained, and software in C# is developed for visualization of wave functions and probability density distributions. The results demonstrate the discreteness of the energy spectrum, the dependence of probability density on quantum numbers, and the differences between quantum and classical descriptions of particle motion.

Чернецкий Никита Михайлович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, walter.mcqeen@gmail.com.

Янулевич Павел Анатольевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, pashokyan@mail.ru.

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nik@grsu.by.

УДК 004.94:66.045

М. Д. ШИНКЕВИЧ, К. О. ШТОП

РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНОГО СИМУЛЯТОРА ТЕПЛООБМЕНИКОВ ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ» С 3D-ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ

Рассматриваются методы и решения по созданию приложения, нацеленного на симуляцию теплообменных аппаратов. Статья охватывает темы о программной структуре симулятора (язык программирования, библиотеки и т. д.), физическую основу, заложенную в нем, и способах применения в образовательных целях. Основное внимание будет уделено целесообразности разработки такого приложения, его роли в промышленности, лабораторных работах, технической реализации генерации моделей и физическим расчетам.

Теплообменные аппараты типа «труба в трубе» повсеместно используются в энергетике, нефтехимической промышленности и системах теплоснабжения благодаря простоте конструкции и высокой эффективности теплообмена при сравнительно малых расходах теплоносителей. Их проектирование требует решение сопряженной задачи теплообмена, включающей расчёты гидродинамики потоков и теплопередачи через разделяющую стенку. Однако экспериментальное исследование влияния геометрических параметров и прочих характеристик на эффективность работы таких аппаратов в лабораторных условиях довольно сложная и ресурсозатратная задача. В свою очередь, данное приложение предлагает набор инструментов для генерации модели теплообменника по вводимым значениям.

Стоит подчеркнуть, что отечественных аналогов приложений, работающих с данными аппаратами теплотехники не существуют. А имеющиеся Aspen HYSYS, HTRI Xchanger Suite, ANSYS Fluent и COMSOL Multiphysics не могут продемонстрировать нужной гибкости и реализованы с упором на коммерческую деятельность, нежели на образовательную. Так же их использование ограниченно в следствии отсутствия локализации, а также с введенной санкционной политикой в отношении нашего государства. Что усложняет их освоение как для промышленных, так и для образовательных целей.

Объектом симуляции является водо-водяной теплообменник типа «труба в трубе», представляющий из себя две и более коаксиально расположенные трубы. Горячий теплоноситель движется по внутренней трубе, холодный в свою очередь по кольцевому каналу между внутренней и внешней трубой. Поддерживаются две схемы движения: прямоток и противоток.

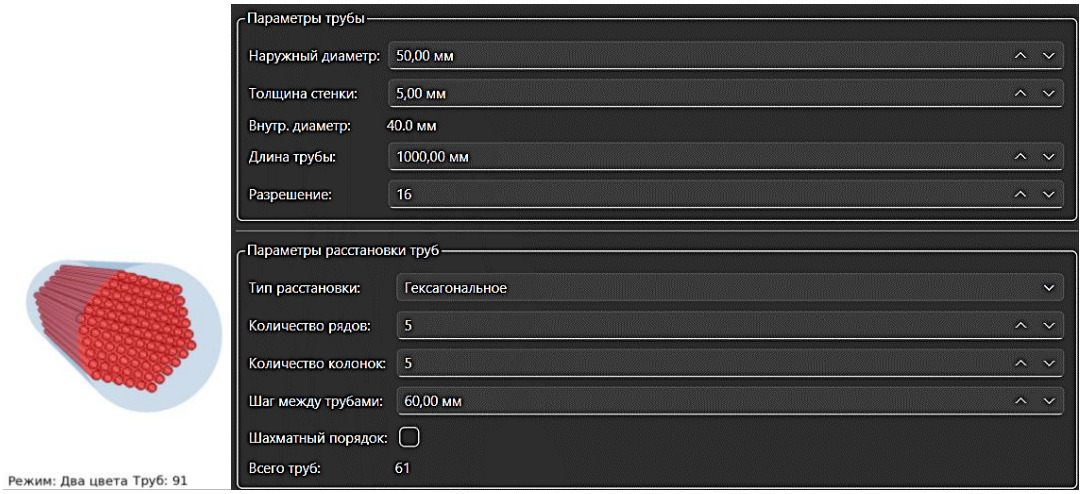


Рисунок 1 – Пример генерации 3D-модели теплообменника (а) по заданным параметрам (б)

Физическая симуляция базируется на следующем уравнении:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp},$$

где Q – тепловой поток,

K – коэффициент теплопередачи,

F – площадь поверхности теплообмена,

Δt_{cp} – среднелогарифмическую разность температур.

Коэффициент K для тонкостенной трубы определяется через сумму термических сопротивлений:

$$K = 1 / (1/\alpha_1 + \delta/\lambda_{ст} + 1/\alpha_2),$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю.

δ – толщина стенки трубы

$\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала стенки.

Коэффициенты теплоотдачи определяются через критериальное уравнения в зависимости от режима течения, которое характеризуется числом Рейнольдса. Для турбулентного режима используется формула Михеева, а для переходного – линейная интерполяция между значениями *Re* = 2300 и *Re* = 10000 с поправочным коэффициентом η.

Рассмотренная физическая модель требует численного решения, поскольку коэффициенты теплоотдачи зависят от температур стенок, которые изначально неизвестны. Это приводит к необходимости осуществления итерационного алгоритма.

Он находиться в модуле calcs. Сперва модуль собирает данные такие как параметры трубы (диаметр, толщина стенки, длинна), тип материала, режимные параметры (расходы, температура на входе), а также схему движений (прямоток / противоток). Настройка вводимых в расчет данных находиться в вкладке «Параметры расчета» (рисунок 2*а*).

Далее начинается основной расчет на основе полученных данных. Первым делом программа делает предположение о температурах стенок трубы. В самом простом случае они принимают значение средней температуры потоков:

$$tcm_1 = tcm_2 = (t_1 + t_2)/2.$$

На основе средних температур потоков и температур стенок с помощью эмпирических зависимостей рассчитываются плотность, кинематическая вязкость и число Прандтля для воды. Далее идут расчеты гидравлики, где вычисляются скорости потоков в трубе и кольцевом канале, число Рейнольдса для определения режима течения. На основе *Re* и геометрии канала выбирается критериальное уравнения для расчета числа Нуссельта.

Из числа Нуссельта вычисляются коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2:

$$\alpha_i = Nu_i \cdot \lambda_i / d_{э_i}.$$

После определяется коэффициент теплопередачи *K*, а затем и плотность теплового потока $q = k \cdot \Delta t_{ср}$.

Далее происходит уточнение температуры стенки, которую программа ранее предположила. Используя найденные значения α и q

$$t_{ст1} = t_1 - q/\alpha_1.$$

$$t_{ст2} = t_2 + q/\alpha_2.$$

Новые значения сравниваются с предыдущими. Если расхождение превышает заданную точность, алгоритм возвращается к определению теплофизических свойств, применяя уже уточненные температуры стенок. Итерации повторяются до достижения сходимости. После сходимости итераций определяются итоговые параметры: необходимая площадь поверхности теплообмена и расчетная длинна аппарата, а также потери давления в трактах на основе гидравлического расчета. Такой подход с последовательными приближениями соответствует классическим численным методам решения задач теплообмена [1; 2]. А исследования сходимости подобных итерационных процессов при решении сопряженных задач теплообмена подтверждают эффективность данного подхода [3]. Результаты алгоритма вычисления выводятся на правой панели в вкладке «Результаты» (рисунок 2*б*).

Описанный метод был реализован в программном комплексе, архитектура которого построена на взаимодействиях четырёх основных модулях: mesh_generator, tube_layout, right_panel, gui. Языком реализации выбран Python, для построение пользовательского интерфейса использована библиотека PySide6, а для 3D визуализации – PyVista.

mesh_generator является ядром построения компонентов модели. Он содержит функцию create_pipe(), которая на основе параметров из right_panel (толщина стенки диаметр, длина, разрешение) строит сетку отдельной трубы. По тому же принципу генерируются и другие меши

tube_layout_generator отвечает за расположения множества труб в пучки. Импортируя функцию create_pipe из mesh_generator, он во время действия цикла создает необходимое количество труб и располагает их в соответствии с параметрами, вводимыми пользователем в правой панели.

right_panel это пользовательский интерфейс построенные на библиотеке PySide6. Каждый виджет ввода связан с объектом GenerationData. Любое изменение вызывает соответствующие метода, который изменяет данные, в связи с чем сообщает окну о необходимости перестроить сцену. Все параметры генерации находится в вкладке «Геометрия» (рисунок 2*б*).

gui (главное окно) интегрирует все компоненты, он же и содержит виджет, который отображает 3D-сцену из библиотеки PyVista. Является ключевой запрашивает актуальные параметры, вызывает функции для получения списка труб и других компонентов, очищает сцену и заново отображает все компоненты итоговой модели.

Такой подход позволяет изучить влияние каждого параметра (расхода, диаметра, температуры) на итоговую эффективность теплообменника, понять необходимость итерационного процесса при решении задач сопряженного теплообмена. В отличии от других программ, где для изменения геометрии требуется перестроение расчетной сетки и многочасовые расчеты, разработанное приложение позволяет получать результат сразу с оценкой характеристик теплообменного аппарата. Исследования показывают, что использование специализированного программного обеспечения позволяет студентам экономить время на рутинных расчетах и сосредоточиться на анализе влияния различных параметров на эффективность работы аппарата [2]. Что делает программу идеальным инструментом для первого этапа проектирования и образовательных целей, помогая сформировать у студентов понимание основ теплотехник без изучения сложных коммерческих систем с высоким порогом входа.

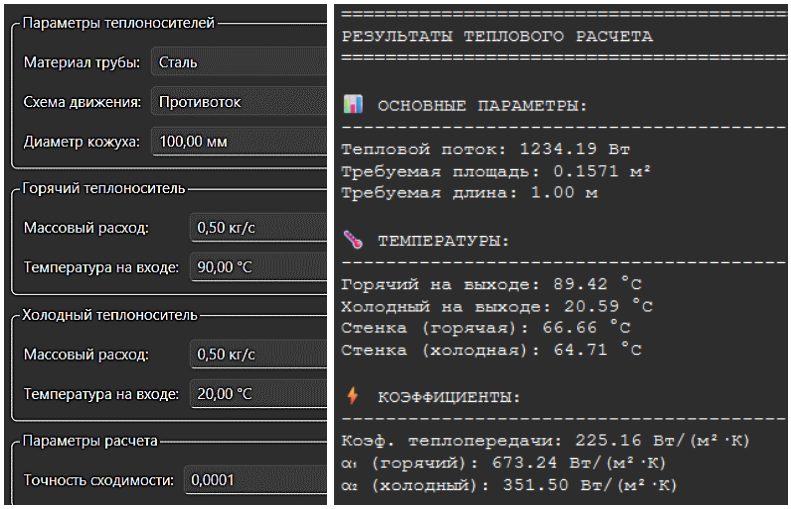


Рисунок 2 – Панели «Параметры расчета» (а) и «Результаты» (б)

Список литературы

1. Левицкий, И. А. Численные методы решения задач теплообмена : практикум / И. А. Левицкий. – М. : Изд. дом НИТУ «МИСиС», 2021. – 90 с.

2. Lona, L. M. F. Developing an educational software for heat exchangers and heat exchanger networks projects / L. M. F. Lona, F. A. N. Fernandes, M. L. Roque, S. Rodrigues // Computers & Chemical Engineering. – 2000. – Vol. 24, Issues 2–7. – P. 1247–1252.

3. Якимов, А. С. Об одном методе решения сопряженной задачи теплообмена. Часть 2 // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 3. – С. 464.

This article discusses methods and solutions for creating an application aimed at simulating heat exchangers. It covers the simulator's software structure (programming language, libraries, etc.), its underlying physics, and its educational applications. The focus will be on the feasibility of developing such an application, its role in laboratory work for the Thermal Engineering course, the technical implementation of model generation, and physical calculations.

Шинкевич Марк Дмитриевич, студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, jjin05748@gmail.com.

Штоп Кирилл Олегович, студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, shtp.hiro@gmail.com.

Научные руководители – *Ситкевич Анастасия Леонидовна*, магистр физико-математических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, girl-physicist@mail.ru.

Ходор Василий Григорьевич, магистр физико-математических наук, ведущий инженер-электроник студенческого проектно-конструкторского бюро практической электроники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь,xodor_vg@grsu.by.

УДК 53.072

П. А. ЯНУЛЕВИЧ, Н. М. ЧЕРНЕЦКИЙ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ ИЗИНГА

Представлена разработка компьютерной модели для исследования магнитных свойств материалов на основе двумерной модели Изинга. Модель позволяет изучать поведение спиновой системы при различных значениях температуры и параметров взаимодействия между частицами. Для численного моделирования используется метод Монте-Карло с применением алгоритма Метрополиса, который обеспечивает статистически корректное моделирование тепловых флуктуаций и процессов установления термодинамического равновесия.

Магнитные системы являются важным объектом исследования в статистической физике. Коллективное поведение большого числа взаимодействующих частиц приводит к возникновению различных физических явлений, таких как ферромагнетизм, антиферромагнетизм и фазовые переходы. Изучение таких систем позволяет глубже понять природу упорядоченных состояний вещества и механизмы их разрушения под действием тепловых флуктуаций. Одной из наиболее известных моделей, используемых для описания подобных процессов, является модель Изинга. В рамках данной модели каждому узлу кристаллической решётки сопоставляется спиновая переменная, принимающая два возможных значения: +1 или –1, что соответствует двум возможным ориентациям магнитного момента.

Энергия системы спинов определяется взаимодействием между ближайшими соседями и может быть записана в виде

$$E = -J \sum_{i,j} s_i s_j.$$

В данной формуле s_i и s_j – спиновые переменные, принимающие значения +1 или –1 [1]. Суммирование производится по всем ближайшим соседям решётки. Коэффициент взаимодействия определяет характер взаимодействия между спинами и влияет на формирование упорядоченных или разупорядоченных конфигураций системы.

При низких температурах система стремится к состоянию минимальной энергии, при котором спины ориентированы одинаково, что соответствует ферромагнитному состоянию. В этом случае в системе возникает спонтанная намагниченность и формируются области с одинаковой ориентацией спинов – магнитные домены. При увеличении температуры тепловые флуктуации приводят к разрушению упорядоченной структуры, и система постепенно переходит в разупорядоченное состояние.

Актуальность разработки компьютерных моделей магнитных систем обусловлена тем, что аналитическое решение возможно только для простейших случаев. При увеличении числа частиц и усложнении взаимодействий возникает необходимость использования численных методов исследования. Компьютерное моделирование позволяет исследовать поведение системы при различных параметрах и наблюдать процессы формирования магнитных доменов, а также анализировать динамику изменения основных физических характеристик системы.

Разработанная программа реализована на языке программирования C# с использованием технологии Windows Forms. На рисунке 1 изображён интерфейс программы, который позволяет задавать основные параметры моделирования, такие как размер спиновой решётки, температура системы, коэффициент взаимодействия и величина внешнего магнитного поля. Пользователь может изменять параметры модели и наблюдать, как изменяется поведение системы в процессе численного эксперимента.

Эволюция системы моделируется методом Монте-Карло с использованием алгоритма Метрополиса [2]. На каждом шаге случайным образом выбирается спин решётки и производится попытка его переворота. Если при этом энергия системы уменьшается, новое состояние принимается. В противном случае переворот принимается с вероятностью, определяемой распределением Больцмана. Такой подход позволяет корректно учитывать влияние тепловых флуктуаций. В процессе моделирования вычисляются основные характеристики системы - энергия и намагниченность. Их динамика отображается в виде графиков, что позволяет анализировать процесс установления динамического равновесия.

В процессе моделирования вычисляются основные характеристики системы – энергия и намагниченность. Их динамика отображается в виде графиков, что позволяет анализировать процесс установления динамического равновесия и наблюдать изменение физических параметров системы во времени.

Разработанная компьютерная модель позволяет наглядно исследовать поведение магнитных систем и демонстрирует основные закономерности статистической физики. Программа может применяться как инструмент для проведения численных экспериментов и демонстрации методов компьютерного моделирования физических процессов.

Кроме того, разработанная модель может использоваться в образовательных целях при изучении курсов статистической физики, магнетизма и компьютерного моделирования [3]. Программа позволяет студентам изменять параметры системы, такие как температура, размер решётки и коэффициент взаимодействия, и наблюдать влияние этих параметров на поведение спиновой системы. Благодаря интерактивности и наглядной визуализации модель может использоваться при выполнении виртуальных лабораторных работ, позволяя исследовать процессы фазовых переходов и формирования магнитных структур без необходимости проведения сложных физических экспериментов. Это делает разработанную программу удобным учебным инструментом для углублённого изучения физических процессов и методов численного моделирования.

Рисунок 1 – Общий вид интерфейса программы

Список литературы

1. Устойчивость и фазовые переходы / Ф. Дайсон [и др.]. – М. : Мир, 1973, – 368 с.

2. Биндер, К. Моделирование методом Монте-Карло в статистической физике / К. Биндер, Д. Хеермант. – М. : Физматлит, 1995. – 146 с.

3. Зейликович, И. С. Явление электромагнитной индукции и его применение в лабораторном практикуме / И. С. Зейликович, А. В. Никитин // Физическое образование в вузах. – 2018. – Т. 24, № 4. – С. 122–136.

The paper considers computer modeling of magnetic systems based on the two-dimensional Ising model. A mathematical description of spin interactions in a lattice is presented, and software developed in C# is used for numerical simulation of the system using the Monte Carlo method with the Metropolis algorithm. The program provides visualization of spin configurations as well as graphs of the system energy and magnetization during the simulation. The results demonstrate the process of reaching thermodynamic equilibrium, the formation of magnetic domains, and the dependence of magnetization on the parameters of the system.

Янулевич Павел Анатольевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, pashokyan@mail.ru.

Чернецкий Никита Михайлович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, walter.mcqeen@gmail.com.

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nik@grsu.by.

СЕКЦИЯ 3.
ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 538.9

Е. А. БОЛБАТ

ЭЛЕКТРОМИОГРАФИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЛЯ ОЦИФРОВКИ УРОВНЯ СОКРАЩЕНИЙ ЧЕЛОВЕЧЕСКИХ МЫШЦ

Рассматриваются принципы работы электромиографического (EMG) датчика. Описываются особенности регистрации биопотенциалов мышц, методы фильтрации и усиления сигнала, а также подходы к выделению информативных признаков. Анализируются параметры датчика, влияющие на точность и стабильность распознавания мышечной активности, и оценивается его пригодность для применения в протезировании кисти. Представленные результаты подтверждают, что корректно настроенный EMG-датчик обеспечивает надёжный интерфейс между пользователем и протезом, позволяя реализовать естественные и функциональные движения.

Современные протезы верхних конечностей стремительно развиваются в направлении повышения функциональности, точности движений и удобства использования. Одним из ключевых элементов таких систем становится электромиографический (EMG) датчик, позволяющий преобразовывать биопотенциалы мышц в управляющие сигналы для привода протеза. Использование EMG-технологий обеспечивает более естественное взаимодействие пользователя с устройством, поскольку управление осуществляется за счёт собственных мышечных сокращений, а не внешних механических переключателей.

Динамический диапазон биоэлектрических сигналов для ЭМГ составляет 0,05–1 мВ, предполагается, что наличие различные неблагоприятных факторов (чистота места регистрации, качество электрода, усталость мышцы) влияют на амплитуду, тем самым уменьшая её. Основная энергия ЭМГ сигнала небольших мышц, как например мышцы отводящей большой палец не превышает 500 Гц. Схема разработанного датчика изображена на рис. 1.

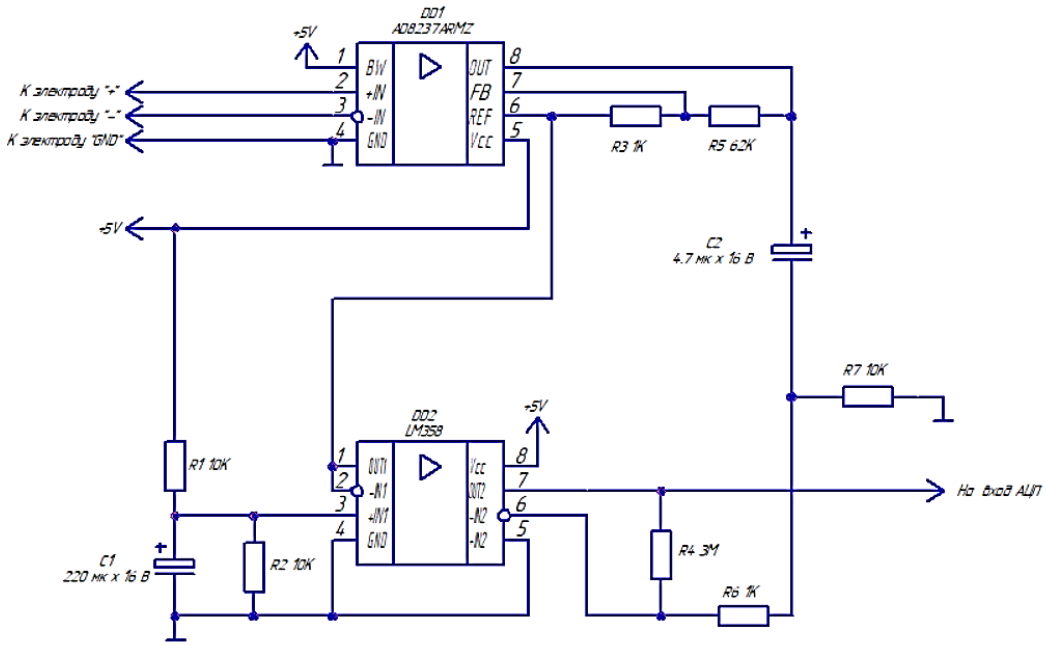


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная EMG-датчика

Датчик регистрирует слабые биопотенциалы мышц с электродов и последовательно преобразует их в устойчивый и пригодный для управления протезом сигнал. Основную роль выполняет инструментальный усилитель **AD8237**, который принимает дифференциальный сигнал с электродов и усиливает его, подавляя синфазные помехи благодаря высокому коэффициенту подавления (до 106 дБ). Встроенная технология **ALS** (Adaptive Level Shifting) автоматически смещает общий уровень входного сигнала в оптимальную область, сохраняя полезную дифференциальную составляющую и обеспечивая работу в режиме *rail-to-rail*.

Для корректной работы усилителя используется схема смещения: первый операционный усилитель **LM358** вместе с резисторами формирует опорное напряжение **+2,5 В**, относительно которого AD8237 усиливает сигнал. Это необходимо, потому что LM358 при питании +5 В корректно обрабатывает только диапазон 0…3,5 В. Конденсатор C1 сглаживает пульсации питания, а резисторы R3 и R5 задают коэффициент усиления AD8237.

После первичного усиления сигнал поступает на второй каскад LM358, который усиливает его уже относительно земли, что облегчает дальнейшее управление сервоприводом протеза. На выходе установлен фильтр высоких частот (C2 и R7) с частотой среза около 3,4 Гц, который удаляет медленные дрейфующие компоненты и постоянную составляющую, не влияя на информативную часть EMG-сигнала.

Для вывода информации о сигнале использовалась готовая плата Arduino Uno. Был написан небольшой тестовый код для проверки работы разработанного датчика. Получаемый с выхода датчика сигнал поступал на вход АЦП Arduino Uno.

Алгоритм обработки EMG-сигнала с датчика представляет собой многоступенчатую систему фильтрации и стабилизации данных, поступающих с АЦП Arduino.

Сначала контроллер считывает сырое аналоговое значение, представляющее усиленный и предварительно отфильтрованный сигнал. Далее сигнал фильтруется скользящим окном длинной в 60 отсчетов, т. е. 60 полученных точек сигнала приводятся к общему среднему. Это убирает одиночные выбросы, цифровой шум, дрожание АЦП и делает сигнал более гладким. сглаживанию с помощью корня из среднего квадратичного значения сигнала.

После этого рассчитывается RMS (RMS – Root Mean Square, среднеквадратичное значение), позволяющее оценить реальную мощность сигнала и выделить информативную амплитуду мышечной активности. RMS вычисляет корень из среднего квадрата последних значений. RMS усиливает вклад больших амплитуд. Далее применяется экспоненциальное сглаживание, которое подавляет высокочастотные колебания, сохраняя при этом динамику изменения сигнала.

Экспоненциальный фильтр берёт текущее значение RMS и смешивает его с предыдущим результатом. Коэффициент сглаживания определяет, насколько быстро система реагирует на изменения. Этот фильтр делает RMS более плавным, убирает дрожание и делает реакцию более предсказуемой. Полученный результат проходит через дополнительное скользящее среднее, формируя максимально стабильный профиль активности.

Следующим этапом используется фильтр Калмана, который адаптивно корректирует оценку сигнала, снижает влияние случайных шумов и обеспечивает плавность изменения выходного значения. В алгоритм встроена логика обнаружения отсутствия активности: если RMS-значение длительное время остаётся ниже порога, оценка сбрасывается к нулю. Такой каскад фильтров и адаптивных методов обеспечивает высокую устойчивость к шумам, плавность реакции и точность управления протезом на основе EMG-сигнала.

Обработанный сигнал передается по COM-порту в программу BiTronics Studio для визуализации. Результат работы датчика, сигнал с которого получен при сокращении мышцы предплечья поверхностного сгибателя пальцев, изображен на рис. 2.

Рисунок 2 – Сигнал с датчика после обработки

Разработанный EMG-датчик демонстрирует устойчивую и точную работу благодаря продуманной архитектуре, основанной на инструментальном усилителе AD8237 и операционном усилителе LM358. Использование дифференциального входа, адаптивного смещения уровня и высоких коэффициентов подавления помех позволяет уверенно выделять слабые биопотенциалы мышц даже в условиях значительных шумов. Реализованная схема смещения и фильтрации обеспечивает корректную работу при однополярном питании и формирует стабильный сигнал. Программная часть дополняет аппаратную обработку, превращая поступающий на Arduino сигнал в надёжный и устойчивый показатель мышечной активности. Последовательное применение скользящего среднего, RMS, экспоненциального сглаживания и фильтра Калмана позволяет значительно снизить шум, устранить дрейф, выделить реальную амплитуду сокращений мышцы и адаптивно корректировать оценку сигнала в реальном времени. Датчик формирует чистый и информативный выходной сигнал, обеспечивая надёжный интерфейс между пользователем и протезом и подтверждая свою эффективность как ключевой элемент системы управления.

Список литературы

1. Петрова, М. А. Структура мышцы и биомеханика мышечного сокращения / М. А. Петрова // Вестник науки : междунар. науч. журн . – 2021. – Т. 4, № 11 (44). – С. 114–119.

2. Осипов, А. Н. Синтез сигналов электростимуляции на основе частотно-временного анализа электромиограмм / А. Н. Осипов, И. О. Хазановский, Д. А. Котов, П. И. Балтрукович // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 1 (50). – С. 33–36. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_1_50_33

3. AD8237. Datasheet [Электронный ресурс.] – Режим доступа: https://www.micro-semiconductor.com/datasheet/86-AD8237ARMZ-R7.pdf. – Дата доступа: 02.03.2026.

4. ON Semiconductor. LM358 Operational Amplifier Datasheet [Электронный ресурс.] – Режим доступа: https://www. onsemi.com/pdf/datasheet/lm358-d.pdf. – Дата доступа: 02.03.2026.

This article examines the operating principles of an electromyographic (EMG) sensor. It describes the recording of muscle biopotentials, methods of signal filtering and amplification, and approaches to extracting informative features. The sensor's parameters affecting the accuracy and stability of muscle activity recognition are analyzed, and its suitability for use in hand prosthetics is assessed. The presented results confirm that a properly configured EMG sensor provides a reliable interface between the user and the prosthesis, enabling natural and functional movements.

Болбат Егор Анатольевич, студент 4 курса Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, egorbol3364@gmail.com.

Научный руководитель – *Ассанович Борис Алиевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, bas@grsu.by.

УДК 372.853:004

Ю. Д. ВОЕВОДА

МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ

Представлена методика спектрального анализа композиционных углеродных покрытий с использованием лазерного спекрометра SENTERRA и программы OPUS. Детально описан алгоритм обработки данных: коррекция базовой линии, аппроксимация кривых и расчет отношений интенсивностей D- и G-пиков. Показано влияние легирующих элементов (Ti, Si) на структурные характеристики материалов.

Современный этап развития экспериментальной физики характеризуется широким внедрением цифровых технологий в измерительные процедуры [1]. Сложность и высокая стоимость научного оборудования зачастую ограничивают доступ студентов к передовым методам исследования. Это создает разрыв между теоретической подготовкой и реальными задачами, стоящими перед специалистами в области приборостроения.

Ключевым элементом современных спектральных комплексов являются источники когерентного излучения. В Рамановской спектроскопии, которая легла в основу данной работы, применяются лазерные системы, обеспечивающие монохроматичность и высокую плотность мощности на образце [2]. В исследовании используется спектрометр комбинационного рассеяния SENTERRA. Его конструкция предусматривает применение твердотельного лазера с длиной волны 532 нм, обладающего стабильными частотными характеристиками. Мощность излучения на уровне 10 мВт позволяет инициировать неупругое рассеяние в углеродных покрытиях без их термического разрушения. Важной особенностью прибора является наличие системы прецизионный фокусировки лазерного пучка, управляемой через программный модуль StartVideoWizard, что критически важно для работы с тонкими пленками. Помимо источника возбуждения, аппаратная часть включает термоэлектрически охлаждаемый детектор (до –64 ℃), что позволяет минимизировать шумы и регистрировать слабые сигналы.

Таким образом, комплекс «лазер – детектор» образует единую измерительную систему, работа которой невозможна без синхронизации с цифровыми алгоритмами управления. Важно отметить, что современные лазерные системы с диодной накачкой, используемые в подобных приборах, обеспечивают высокую стабильность частоты и низкий уровень шумов, что критически важно для прецизионных измерений.

Полученные в ходе лазерного зондирования спектры представляют собой сложную суперпозицию сигналов, требующую математической деконволюции. В работе применяется программа OPUS – профессиональный пакет для обработки спектральной информации. Ее использование в учебных целях позволяет перенести акцент с рутинных вычислений на физическую интерпретацию [3].

Методика обработки включает несколько этапов. Первоначально выполняется коррекция базовой линии, что позволяет устранить вклад флуоресценции подложки. Далее применяется инструмент аппроксимации кривых. Программа позволяет разложить экспериментальный контур на составляющие, используя функции Гаусса и Лоренца. В случае углеродных покрытий это дает возможность выделить D-пик (дефекты структуры, 1350 $см^{-1}$) и G-пик (sp^2-гибридизированные атомы, 1580 $см^{-1}$) [4]. Автоматизация расчета площадей пиков и их интенсивностей, реализованная в OPUS, высвобождает время исследователя для анализа. Например, расчет отношения интенсивностей I_D/I_G, которое является маркером степени графитизации материала, выполняется программой мгновенно после подбора кривых. Это превращает программу не просто в регистратор сигнала, а в полноценный аналитический инструмент, позволяющий наблюдать влияние легирующих элементов (Ti, Si, Zr) на структуру углеродной матрицы.

Для эффективного освоения методики студентами необходимо детальное описание последовательности действий в программе OPUS. Рассмотрим пошаговый алгоритм обработки спектра углеродного покрытия.

Шаг 1. Предобработка и коррекция базовой линии.

После загрузки спектра студент переходит в меню Manipulate, выбирает пункт Baseline Correction. Программа автоматически предлагает полиномиальную аппроксимацию фона, но опытный пользователь может задать опорные точки вручную в областях, заведомо свободных от пиков (например, 800–1000 $см^{-1}$ и 1800–2000 $см–^{1}$). Коррекция базовой линии критически важна, так как флуоресценция подложки может достигать 30 % от общего сигнала и искажать истинные значения интенсивностей.

Шаг 2. Выбор модели аппроксимации.

В меню Curve Fit пользователь задает количество модельных пиков (в данном случае два – D и G) и выбирает тип функции. Для аморфных углеродных структур оптимальным является использование смеси функций Гаусса (описывает неупорядоченную компоненту) и Лоренца (описывает колебания кристаллической решетки) [4]. Программа позволяет задать начальные приближения для положения пиков (1350 и 1580 $см^{-1}$).

Шаг 3. Итеративный подбор параметров.

OPUS выполняет минимизацию невязки между экспериментальной кривой и суммой модельных пиков методом наименьших квадратов. Студент наблюдает в реальном времени, как изменение положения или ширины пика влияет на качество фитинга (визуально оценивается по остаточной кривой в нижней части экрана). Этот этап наглядно демонстрирует, что спектр является суперпозицией нескольких физических процессов.

Шаг 4. Расчет и экспорт результатов.

После достижения приемлемого совпадения (коэффициент детерминации $R^2 > 0.98$) студент нажимает кнопку «Сохранить пики и отчет». Программа автоматически генерирует таблицу, содержащую положения пиков, их интенсивности, площади и полуширины. Эти данные экспортируются в текстовый формат для последующего анализа. Ключевой расчетный параметр – отношение интегральных интенсивностей, которое коррелирует с размером sp^2-кластеров в пленке.

Одним из перспективных направлений развития техники эксперимента является создание виртуальных лабораторных практикумов. В рамках предлагаемой методики разработана модель виртуальной лаборатории, полностью воспроизводящая логику работы спектрометра SENTERRA в среде OPUS. Студент в цифровом пространстве осваивает последовательность операций: выбор разрешения (9–15 $см^{-1}$), установка спектрального диапазона (50–4400 $см^{-1}$) и юстировка лазерного луча. Такой тренажер позволяет безопасно изучить влияние параметров съемки на качество спектра.

Особое внимание в виртуальной лаборатории уделяется моделированию типичных ошибок. Например, при неправильной фокусировке лазера программа генерирует спектр с пониженным отношением сигнал/шум и уширенными пиками. При превышении пороговой мощности лазера (более 15 мВт) виртуальный образец «прогорает», и спектр становится неинформативным. Это формирует у студентов культуру работы с дорогостоящим оборудованием еще до допуска к реальным приборам. Виртуальная среда также дает возможность оперативно исследовать различные типы образцов – от чистого графита до многокомпонентных систем C+Si+Zr и C+Ti+Si. Студент может наблюдать, как изменение состава мишени влияет на положение и интенсивность характеристических пиков. Например, легирование кремнием вызывает высокочастотный сдвиг G-пика. Что свидетельствует об образовании карбидных фаз. Такой подход снимает временные и материальные ограничения реального эксперимента.

Для эффективного внедрения описанного подхода в образовательную программу разработана трехэтапная методика, учитывающая уровень подготовки студентов и материально-техническую базу лаборатории:

Этап 1. Ознакомительный.

На данном этапе студенты работают исключительно с виртуальной лабораторией. Изучается интерфейс программы OPUS, осваиваются базовые операции коррекции базовой линии. В качестве данных используются готовые спектры из библиотеки. Цель этапа – снять психологический барьер перед сложным программным обеспечением и сформулировать первичные навыки обработки.

Этап 2. Тренировочный.

Студенты допускаются к работе с реальным спектрометром SENTERRA, но под контролем преподавателя. Они самостоятельно выполняют юстировку лазера, установку образца и съемку спектров эталонных материалов (кремниевая пластина, графит). Полученные данные обрабатываются в OPUS и сравниваются с библиотечными. На этом этапе отрабатывается связь между действиями с прибором и изменениями в спектре.

Этап 3. Исследовательский.

Студентам выдается индивидуальное задание по исследованию неизвестного образца. Они самостоятельно планируют эксперимент, выбирают режимы съемки, проводят обработку в OPUS и интерпретируют результаты. Завершается этап защитой отчета, в котором студент обосновывает свои выводы о структуре материала, опираясь на рассчитанные параметры I_D/I_G и положение пиков.

Данная методика стирает грань между учебной задачей и научным исследованием. Студент не просто знакомится с устройством прибора, но и осваивает полный цикл работы экспериментатора: от настройки источника излучения до физической интерпретации цифровых данных. Внедрение в практикум профессионального ПО, такого как OPUS, готовит выпускников к работе в современных научных и промышленных лабораториях, оснащенных сложными лазерно-оптическими комплексами.

Список литературы

1. Роберт, И. В. Теория и методика информатизации образования (психолого-педагогический и технологический аспекты) / И. В. Роберт. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 398 с.

2. Ким, А. В. Рамановская спектроскопия: теория и практика / А. В. Ким. – М. : Техносфера, 2018. – 174 с.

3. Андреев, А. А. Виртуальные лаборатории в инженерном образовании : моногр. / А. А. Андреев, С. В. Панюкова. – М. : Изд-во МЭИ, 2019. – 215 с.

4. Кузнецов, В. Л. Углеродные наноматериалы / В. Л. Кузнецов, А. И. Романенко. – Новосибирск : Наука, 2016. – 240 с.

This paper presents a method for the spectral analysis of composite carbon coatings using a SENTERRA laser spectrometer and OPUS software. The data processing algorithm is described in detail, including baseline correction, curve fitting, and calculation of the intensity ratios of the D and G bands. The influence of dopant elements (Ti, Si) on the structural characteristics of the materials is demonstrated.

Воевода Юлия Дмитриевна, магистрант Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины, Гомель, Республика Беларусь, julia.trondina@icloud.com.

Научный руководитель – *Купо Александр Николаевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры общей физики, Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины, Гомель, Республика Беларусь, kupo@gsu.by.

УДК 535.373

Я. И. ГРИГОРОВ, Е. Ф. МАРТЫНОВИЧ

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛИТЕЛЬНОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПРИ НАЛИЧИИ ИНТЕНСИВНЫХ КРАТКОВРЕМЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ

Разработан простой и недорогой в реализации метод измерения характеристик долговременной, в том числе задержанной, люминесценции различных сред. Создана и испытана лабораторная установка для реализации предлагаемого метода. Этим методом возможно измерить спектры и кинетику длительной люминесценции даже при наличии высокоинтенсивных кратковременных компонентов, способных вызвать значительные нелинейные искажения сигнала.

В последние годы для измерения времени затухания люминесценции широкое распространение получили методы счета фотонов. Метод время коррелированного счета фотонов, который считался самым перспективным [1], ввиду своих особенностей хорошо работает лишь в области пико- и наносекунд, но диапазон измеряемых значений времени затухания со стороны больших величин, как правило, ограничен единицами микросекунд. Более требовательный к аппаратному обеспечению метод многоканального счета фотонов начал развиваться несколько позже, однако сейчас существует оборудование для реализации данного метода [2]. Данный метод не теряет возможность измерять малые времена и расширяет диапазон до сотен миллисекунд [3]. Однако данное оборудование имеет высокую стоимость. Вместе с тем, во временных диапазонах от микросекунд до

секунд успешно применяется классический метод прямого осциллографирования при импульсном возбуждении люминесценции. Основной проблемой измерения люминесценции с большими значениями времени затухания является то, что, как правило, помимо изучаемого длительного компонента, в реальных средах одновременно присутствуют и высокоинтенсивные быстрозатухающие компоненты. В книге [4] рассмотрены некоторые классические способы измерения характеристик послесвечения, в том числе дисковые фосфороскопы. Способ заключается в том, что источник излучения возбуждает образец, находящийся на вращающемся диске. При дальнейшем вращении диска образец приближается к области регистрации, где измеряется люминесценция. Поскольку между возбуждением и измерением существует задержка, быстро затухающий компонент успевает затухнуть, а фотоприемник измеряет только послесвечение. Недостатком данного способа является громоздкость устройства, а также то, что измерение характеристик люминесценции ограничено со стороны больших времен обычно единицами секунд.

В данной работе предлагается новый способ измерения характеристик послесвечения люминесценции, основанный на принципе временной селекции люминесценции, как и в описанном выше способе. Этот принцип заключается в том, что люминесценция образца регистрируется с некоторой задержкой во времени, которая обеспечивает устранение кратковременных компонентов люминесцентного излучения. Эта задержка осуществляется относительным перемещением образца и фотоприёмного устройства. При этом перемещение образца, относительно фотоприемника и источника возбуждающего излучения, осуществляют по прямой линии. Таким образом, время, в течении которого обеспечивается затухание кратковременных компонентов люминесцентного излучения, можно регулировать двумя путями: изменением скорости движения образца относительно люминесцентного и возбуждающего лучей, или изменением расстояния между ними. Таким образом, данный способ позволяет измерять характеристики люминесцентного послесвечения с величиной времени затухания от нескольких миллисекунд до часов и более. Нижний предел обусловлен временем, в течение которого образец перемещается от источника возбуждающего излучения к точке сбора люминесцентного послесвечения. Верхний предел измеряемого времени ограничен свойствами фотоприемного устройства, например, если в качестве фотоприемника использовать ФЭУ, с которого снимать сигнал на осциллограф, то верхний предел измеряемого времени ограничен разверткой осциллографа. Схема устройства для реализации данного способа представлена на рис. 1, где: *1* – источник излучения, возбуждающего люминесценцию (лазер); *2* – фотоприемник; *3* – образец; *4* – световод, транспортирующий возбуждающее люминесценцию излучение к исследуемому образцу, *5* – световод, собирающий люминесцентное излучение и транспортирующий его к фотоприемнику; *6* – механизм передвижения световодов или образца.

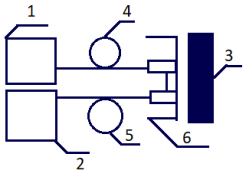


Рисунок 1 – Схематичное изображение устройства для реализации описываемого способа

Данным способом были измерены характеристики люминесцентного послесвечения кристалла лейкосапфира. Измерены спектры послесвечения в секундном временном диапазоне. Такой спектр представлен кривой *1* на рис. 2. Кривая *2* соответствует полному спектру стационарного свечения.

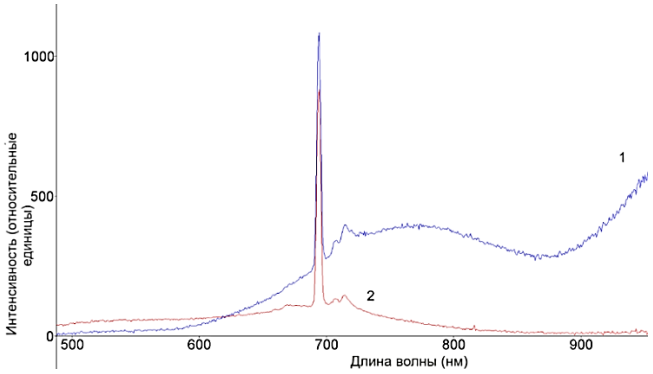


Рисунок 2 – Измеренный предлагаемым методом спектр послесвечения сапфира (график 1) и стационарная люминесценция (для масштаба ослабленная примерно в 100 раз) (график 2). Длина волны возбуждающего излучения – 405 нм

Также предлагаемым способом была измерена кинетика затухания длительной люминесценции данного образца, представленная на рис. 3.

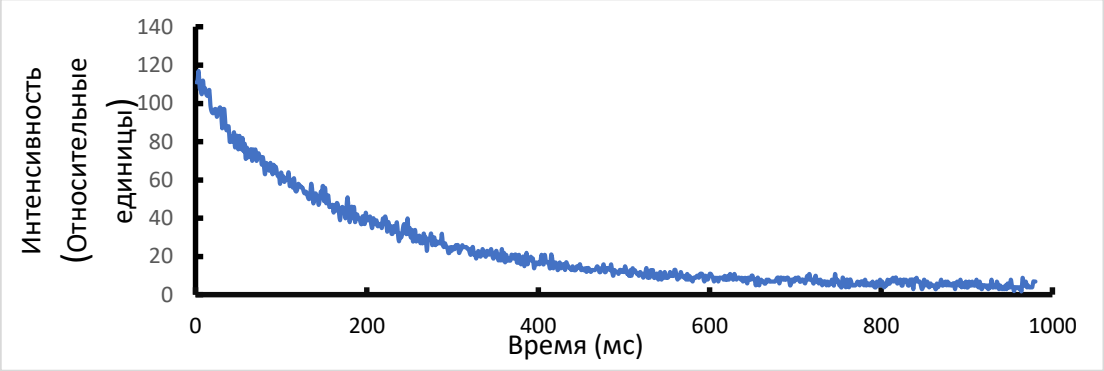


Рисунок 3 – Измеренная предлагаемым методом кинетика затухания интенсивности люминесценции послесвечения сапфира. Длина волны возбуждающего излучения – 405 нм

Предлагаемым методом возможно измерять кинетику и спектр длительной люминесценции, в том числе задержанной люминесценции. Данный метод работает даже при наличии многократно более интенсивных компонент, которые при прямом осциллографировании перегрузят фотоприемник.

Список литературы

1. Becker, W. Advanced Time-Correlated Single Photon Counting Techniques / W. Becker // Springer Series in Chemical Physics. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. – URL: https://doi.org/10.1007/3-540-28882-1

2. URL: https://www.edinst.com/product/fls1000-photoluminescence-spectrometer/

3. URL: https://www.edinst.com/blog/what-is-multichannel-scaling-mcs // What is Multichannel Scaling. – July 20, 2023.

4. Лёвшин, В. Л. Фотолюминесценция жидких и твёрдых веществ / В. Л. Лёвшин. – М. : Гос. изд-во технико-теоретической лит., 1951.

A simple and inexpensive method for measuring the characteristics of long-term luminescence, including delayed luminescence, in various media has been developed. A laboratory setup for implementing the proposed method has been created and tested. This method can measure the spectra and kinetics of long-term luminescence even in the presence of high-intensity short-term components that can cause nonlinear signal distortions.

Григоров Ярослав Иванович, магистрант 2 курса Иркутского государственного университета, Иркутск, Российская Федерация, grigorov.ja.i@mail.ru.

Научный руководитель – *Мартынович Евгений Федорович*, доктор физико-математических наук, профессор Иркутского государственного университета, Иркутский филиал института лазерной физики СОРАН, Иркутск, Российская Федерация, femto@bk.ru.

УДК 53.087

И. Ю. ОМЕЛЮСИК, Е. С. ВОРОПАЙ

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ПЗС-ЛИНЕЙКИ И МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Представлена разработка программно-аппаратного комплекса управления многоканальным фотодетектором для малогабаритного спектрометра. На базе микроконтроллера STM32F103C8T6 реализованы формирование управляющих сигналов, оцифровка и передача данных ПЗС-линейки. Разработано программное обеспечение для визуализации и калибровки спектра, подтверждающее эффективность применения микроконтроллерных систем в компактной спектроскопии.

Современные спектрометрические системы широко применяются в аналитических и прикладных задачах, требующих регистрации спектрального распределения излучения. Актуальной задачей является разработка компактных и энергоэффективных устройств на основе микроконтроллеров и многоканальных фотодетекторов.

В работе рассматривается реализация малогабаритного спектрометра с использованием ПЗС-линейки TCD1304 в качестве регистрирующего элемента. Управление режимами работы детектора, аналого-цифровое преобразование и передача данных реализованы на базе микроконтроллера STM32F103C8T6.

Разработанная система обеспечивает регистрацию спектрального распределения интенсивности и его визуализацию в реальном времени. Целью работы является создание функционального программно-аппаратного комплекса с использованием доступной элементной базы при обеспечении требуемой точности измерений.

1. Постановка задачи и принципы функционирования системы.

Современные методы спектрального анализа предъявляют высокие требования к точности регистрации распределения интенсивности электромагнитного излучения, а также к временной согласованности процессов измерения. В этой связи разработка компактных и энергоэффективных спектрометров на основе микроконтроллеров представляет значительный практический интерес, обусловленный их низкой стоимостью, простотой интеграции и возможностью применения в переносных измерительных системах.

Целью настоящей работы является создание программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего управление многоканальным фотодетектором – ПЗС-линейкой TCD1304 – и последующую цифровую обработку получаемых данных. Основной задачей является реализация синхронного формирования управляющих сигналов, корректной регистрации аналогового выхода и передачи массива данных на персональный компьютер для последующей интерпретации.

ПЗС-линейка TCD1304 представляет собой линейный фоточувствительный массив, содержащий 3648 элементов размером порядка 8×200 мкм, функционирующих на основе интеграции заряда. При воздействии светового потока в каждом элементе происходит генерация носителей заряда, величина которых пропорциональна интенсивности падающего излучения.

Считывание накопленного заряда осуществляется посредством последовательного переноса по сдвиговому регистру под действием синхронизирующих сигналов. Сигнал ICG (Integration Clear Gate) определяет момент сброса заряда и начала нового цикла, сигнал SH (Sample and Hold) инициирует перенос накопленного заряда в регистр, а тактовый сигнал CLK обеспечивает последовательное считывание информации с каждого пикселя. Корректность функционирования системы определяется точностью временного согласования этих сигналов, что требует использования аппаратных средств генерации с высокой стабильностью.

2. Реализация микроконтроллерного модуля.

В качестве управляющего элемента используется микроконтроллер STM32F103C8T6, основанный на архитектуре ARM Cortex-M3. Его периферийные возможности, включая 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь, развитую систему таймеров и встроенный интерфейс USB, позволяют реализовать полный цикл регистрации и передачи спектральной информации без применения специализированных внешних контроллеров.

Формирование управляющих сигналов для работы ПЗС-линейки осуществляется аппаратными таймерами микроконтроллера, что обеспечивает высокую точность временных интервалов и минимизацию джиттера. Тактовый сигнал CLK генерируется с частотой порядка 1–2 МГц и обеспечивает последовательный сдвиг зарядов в регистре. Сигналы SH и ICG формируются с заданной временной структурой, определяющей длительность интеграции и момент считывания, что напрямую влияет на уровень регистрируемого сигнала.

Аналоговый сигнал, формируемый на выходе линейки, характеризуется малой амплитудой и требует предварительного усиления. Для согласования уровней используется малошумящий операционный усилитель, обеспечивающий увеличение амплитуды сигнала и снижение влияния паразитных шумов. Усиленный сигнал поступает на вход аналого-цифрового преобразователя, где выполняется его дискретизация с разрешением 12 бит.

Оцифрованные данные записываются в буфер памяти с использованием механизма прямого доступа к памяти (DMA), что позволяет исключить участие центрального процессора в процессе передачи данных и повысить устойчивость работы системы. Передача информации на персональный компьютер осуществляется через интерфейс USB в режиме виртуального последовательного порта (CDC), что обеспечивает совместимость с различными операционными системами и упрощает процесс обмена данными.

3. Программная обработка и визуализация данных.

Программное обеспечение, разработанное для персонального компьютера, выполняет приём, обработку и визуализацию спектральных данных. Для реализации использован язык Python и библиотеки pySerial, NumPy и Matplotlib, что обеспечивает кроссплатформенность и гибкость модификации.

Программа инициирует обмен с микроконтроллером по USB-интерфейсу, принимает массивы данных и интерпретирует их как значения интенсивности света, зарегистрированные отдельными пикселями линейки. Для приведения данных к физической шкале длин волн используется калибровочная функция, устанавливающая соответствие между номером пикселя и длиной волны. Калибровка проводится с помощью эталонных источников излучения и аппроксимируется линейной или полиномиальной зависимостью.

Полученные данные могут быть дополнительно обработаны цифровыми методами – сглаживанием, фильтрацией или нормализацией – с целью уменьшения шумов и повышения наглядности спектра. Графическое отображение результатов реализовано в интерактивном виде: спектр обновляется в реальном времени и может быть зафиксирован пользователем для дальнейшего анализа.

Таким образом, реализованный программный модуль обеспечивает замкнутый цикл – от регистрации сигнала фотодетектором до получения визуализированного спектра, готового к интерпретации или количественной обработке.

Заключение.

Разработанный программно-аппаратный комплекс демонстрирует возможность создания компактного спектрометрического устройства на базе микроконтроллера общего назначения. Использование STM32F103C8T6 позволяет реализовать синхронное управление детектором, аналого-цифровое преобразование и передачу данных в рамках единой системы.

Применение аппаратных таймеров и механизма DMA обеспечивает стабильность временных характеристик и высокую точность регистрации сигнала. Предложенная архитектура обладает гибкостью и может быть адаптирована для использования с различными типами фотодетекторов и расширена за счёт внедрения более высокоразрядных преобразователей и алгоритмов цифровой обработки.

Таким образом, разработанная система представляет собой основу для создания доступных спектрометрических приборов, пригодных для применения в научных и прикладных задачах.

Список литературы

1. Skoog, D. A. Principles of instrumental analysis / D. A. Skoog, F. J. Holler, S. R. Crouch. – 7th ed. – Boston : Cengage Learning, 2018. – 1056 p.

2. Райхбаум, Я. Д. Физические основы спектрального анализа / Я. Д. Райхбаум. – М. : Наука, 1980.

3. Knoll, G. F. Radiation Detection and Measurement / G. F. Knoll. – 4th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2010. – 860 p.

4. STMicroelectronics. STM32 step-by-step: Getting started with STM32 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/STM32StepByStep:Getting_started_with. – Дата доступа: 25.04.2025.

5. STM32_:_STM32_step_by_step / Noviello, C. Mastering STM32 / C. Noviello [Электронный ресурс]. – Leanpub, 2017. – Режим доступа: https://leanpub.com/mastering-stm32. – Дата доступа: 25.04.2025.

6. Тарасов, К. И. Спектральные приборы / К. И. Тарасов. – Л. : Машиностроение, 1977.

7. Спектральные приборы для аналитических применений Перспективные разработки / под ред. Е. С.Воропая. – Минск: БГУ, 2005. – 196 с.

8. Зайдель, А. Н. Техника и практика спектроскопии / А. Н. Зайдель, Г. В. Островская, Ю. И. Островский. – М. : Наука, 1976.

Омелюсик Иван Юрьевич, студент 4 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, ivanom0505@gmail.com.

Научный руководитель – *Воропай Евгений Семенович*, доктор физико-математических наук, профессор, физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, voropay@bsu.by.

УДК 681.586.57

В. Э. ПАШКЕВИЧ, Г. И. ГРИЦКЕВИЧ, Ю. А. СМОЛКИН, Р. С. ЖУК, А. С. ЛЕШКО

АБСОЛЮТНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ЛИНЕЙНЫЙ ЭНКОДЕР ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрена архитектура абсолютного оптического линейного энкодера с гибридной шкалой, сочетающей 8-битный код Грея для грубого позиционирования и синусно-косинусные дорожки для точной интерполяции. Выполнен расчет параметров, показана возможность достижения разрешения 0,8 мкм при рабочем ходе 200 мм. Для экспериментальной проверки разработан тестовый шаблон 100×100 мм с 4-битным кодом Грея и sin/cos-дорожками с периодом 500 мкм. Определены требования к технологии изготовления шкалы. Актуальность работы обусловлена потребностью в доступных прецизионных средствах обратной связи электроприводных устройств с программным управлением, в том числе зондовых установок и лабораторного оборудования линейного перемещения.

Современные зондовые установки для тестирования микроэлектронных компонентов требуют высокой точности позиционирования, достигающей 10 мкм и лучше. В современных прецизионных системах позиционирования наибольшее распространение получили два типа приводов: шаговые двигатели и серводвигатели. Использование шаговых двигателей в разомкнутом контуре не обеспечивает требуемой точности, поскольку пропуски шагов приводят к накоплению погрешности позиционирования. Серводвигатели с обратной связью решают эту проблему, но существенно дороже. Оптимальным решением является применение шаговых двигателей с внешней обратной связью по положению, реализуемой на базе линейного энкодера. Разрабатываемый энкодер предназначен для использования в системе обратной связи зондовой установки, обеспечивающей прецизионное тестирование микроэлектронных компонентов с требуемой точностью 10 мкм.

Энкодер – это электромеханическое устройство, преобразующее механическое перемещение (вращение или линейное движение) в электрический сигнал, позволяющий определить положение, направление и скорость движения объекта. По принципу действия датчики перемещений разделяются на: потенциометрические, емкостные, магнитострикционные, оптические, ультразвуковые, вихретоковые, на основе эффекта Холла [2]. Магнитные энкодеры, использующие датчики Холла или магниторезистивные элементы, устойчивы к загрязнениям, но подвержены влиянию внешних магнитных полей от двигателей [1]. Индуктивные датчики отличаются точностью, надежностью и стабильностью, однако имеют ряд недостатков: трудность получения нулевого значения выходного напряжения при нейтральном положении якоря, возможность работы только на переменном токе, ограниченный диапазон линейности статической характеристики (вследствие насыщения магнитопровода), зависимость коэффициента преобразования от частоты и амплитуды питающего напряжения, а также необходимость экранировки обмотки. Емкостные энкодеры, напротив, обладают низким энергопотреблением и компактны, но чувствительны к загрязнителям воздуха, влияющим на диэлектрическую проницаемость среды [3].

Оптические энкодеры обеспечивают наивысшее разрешение – менее 1 мкм. Это достигается благодаря возможности изготовления шкал с периодом до нескольких десятков микрометров (до 20 мкм) и интерполяции аналоговых сигналов (с помощью специализированных интерполяторов и цифровых алгоритмов), а также отсутствию влияния магнитных полей на процесс измерения. Для задач, требующих точности 10 мкм и лучше, оптический принцип является наиболее подходящим.

Анализ промышленных решений показал, что оптимальной для прецизионных измерений является гибридная архитектура, сочетающая две шкалы: грубую – для абсолютного позиционирования, и точную – для уточнения положения внутри шага путем интерполяции [4]. Такой подход позволяет достичь высокого разрешения.

Кодовые шкалы классифицируются по типу кодирования на инкрементальные и абсолютные. Инкрементальные шкалы содержат равномерную последовательность штрихов. Они просты в изготовлении, но требуют процедуры поиска нуля при каждом включении питания, что неприемлемо для систем, критичных к безопасности, таких как зондовые установки, где при потере позиции щуп может повредить исследуемый образец. Абсолютные шкалы содержат уникальный код для каждой позиции, что позволяет мгновенно определять положение при включении. В двоичном коде при переходе между соседними позициями может изменяться несколько соседких значений, что при неидеальной синхронизации приводит к ошибкам, связанным с считыванием промежуточного состояния.

Код Грея, в котором при переходе к соседней позиции изменяется только один бит, исключает ошибки считывания на границах. Для достижения микрометровой точности грубая шкала дополняется точной, реализованной на основе sin/cos-дорожек. Они формируют следующие сигналы: $A = A_0 \cdot \sin(2\pi x/P)$ и $B = B_0 \cdot \cos(2\pi x/P)$, где P – период шкалы. Положение внутри периода определяется как $\varphi = \arctan(A/B)$, что позволяет делить период на множество частей путем интерполяции.

Ключевая трудность при изготовлении оптических энкодеров – ограничение минимального периода шкалы технологией печати. Даже фотовывод с разрешением 12000 dpi позволяет получить линии шириной лишь 20 мкм, что соответствует периоду 40 мкм. Для достижения требуемой точности 10 мкм необходимо дополнительное повышение разрешения – интерполяция.

Интерполяция представляет собой математическую обработку сигналов с sin/cos-дорожек. Среди существующих методов – цифрового, табличного и аналогового – для данной работы выбран цифровой метод на базе аппаратного CORDIC-модуля микроконтроллера STM32. Данный подход обеспечивает высокую скорость вычислений (один такт на определение арктангенса), детерминированность временных характеристик, критически важную для замкнутого контура управления, а также низкую нагрузку на основную вычислительную систему, обеспечивающую работу зондовой установки.

В данной работе выбрана комбинация двух шкал**.** Грубая шкала представляет собой 8-битный код Грея, обеспечивающий 256 уникальных позиций. При рабочем ходе 200 мм шаг грубой шкалы составляет $P_{coarse} = 200/256 = 0{,}78$ мм. Точная шкала выполнена в виде sin/cos-дорожек с периодом $P_{accurate} = 40$ мкм, что является стандартным значением для прецизионных энкодеров. Применяя интерполяцию с коэффициентом $N = 50$, получаем разрешение $\Delta = P_{accurate} / N = 40 / 50 = 0{,}8$ мкм. Такое сочетание позволяет сохранить преимущества абсолютного кодирования и достичь микрометрового разрешения без увеличения числа дорожек.

Для обеспечения четкости границ элементов минимального размера (ширина линии 20 мкм для sin/cos-дорожек, размер элемента кода Грея 0,78 мм) требуется разрешение фотовывода не менее 12000 dpi. Шкала предполагается к выполнению на стеклянной подложке с хромовым покрытием. Такой выбор обусловлен термической стабильностью стекла и высоким контрастом, его оптическая плотность $D > 3{,}0$, также коэффициент теплового расширения $\alpha_T = 8 \cdot 10^{-6}$ 1/°C близок к коэффициенту расширения гранитного основания зондовой установки, что минимизирует температурные погрешности. Для минимизации чувствительности к загрязнениям предусмотрен защитный кожух, закрывающий шкалу по всей длине.

Для проверки гипотезы предполагается разработка тестового образца, состоящего из следующих частей: юстировочный узел, считывающая головка и шкала с периодом 500 мкм.

Считывающая головка включает инфракрасный светодиод, щелевую маску для формирования лучей, матрицу из шести фотоприемников (для сигналов sin, cos и четырёх дорожек кода Грея), а также предварительные усилители и фильтры. Аналоговые сигналы с фотодиодов поступают на усилители, затем на АЦП микроконтроллера STM32, где реализована цифровая обработка: фильтрация, декодирование кода Грея и интерполяция sin/cos-сигналов с использованием аппаратного CORDIC-модуля. Результирующее значение абсолютной позиции передаётся по интерфейсу SPI на одноплатный компьютер Orange Pi, который отвечает за общее управление установкой. Структурная схема обработки сигналов приведена на рисунке 1.

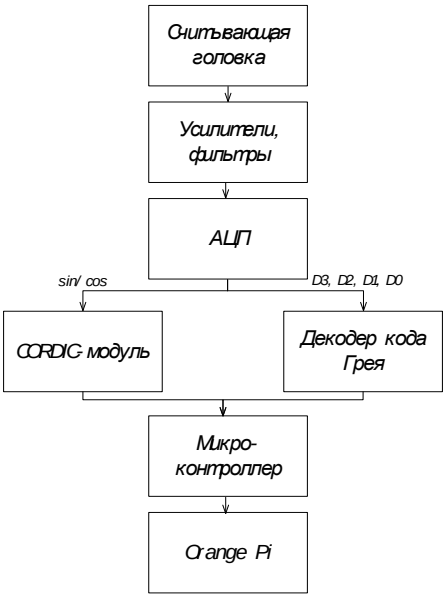


Рисунок 1 – Структурная схема обработки сигналов

Для первоначальной настройки взаимного положения считывающей головки и шкалы при сборке предусмотрен юстировочный узел с пятью степенями свободы. Он позволяет выставить рабочий зазор и обеспечить параллельность головки шкале, что крайне важно для получения сигнала с требуемой амплитудой. После настройки положение фиксируется.

Для экспериментальной проверки предложенных решений разработан тестовый шаблон размером 100×100 мм, содержащий 4-битный код Грея (16 позиций) и sin/cos-дорожки с увеличенным периодом 500 мкм. Уменьшение числа бит и увеличение периода по сравнению с финальной версией (8 бит, 40 мкм) упрощает изготовление и позволяет провести первичную отладку алгоритмов без использования сложного оборудования. Внешний вид шаблона показан на рисунке 2.

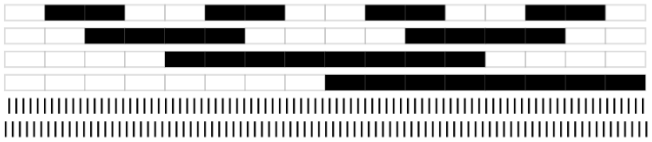


Рисунок 2 – Тестовый шаблон

Предложенная архитектура абсолютного оптического энкодера сочетает преимущества абсолютного кодирования (мгновенное определение позиции при включении, безопасность для исследуемых образцов) и высокого разрешения, достигаемого интерполяцией sin/cos-сигналов. Научная новизна работы заключается в адаптации промышленной гибридной архитектуры к условиям лабораторного изготовления с сохранением точностных характеристик, а также в разработке конструктивных решений (юстировочный узел, защитный кожух), направленных на преодоление основных трудностей. Определены требования к технологии фотовывода (разрешение 12000 dpi), обеспечивающие достижение целевого разрешения 0,8 мкм при рабочем ходе 200 мм. Для экспериментальной проверки создан тестовый шаблон, позволяющий отработать алгоритмы интерполяции и декодирования.

Список литературы

1. Сысоева, С. Датчики магнитного поля: ключевые технологии и новые перспективы. Ч. 1. Датчики холла / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2014. – № 1.
2. Шерстобитова, А. С. Датчики физических величин / А. С. Шерстобитова. – СПб. : Университет ИТМО, 2017. – 57 с.
3. Рогова, М. В. Датчики электрических систем автоматического управления : учеб. пособие / М. В. Рогова. – Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. – 88 с.
4. Comparison of the principle error between two fine code waveform interpolation methods of photoelectric encoders / Y. Feng, Q. Wan, C. Song [et al.] // Infrared and Laser Engineering. – 2014. – Vol. 43, No. 7.

The article considers the architecture of an absolute optical linear encoder with a hybrid scale combining 8-bit Gray code for coarse positioning and sine-cosine tracks for fine interpolation. The parameters are calculated, and the possibility of achieving 0.8 μm resolution with a 200 mm travel range is demonstrated. A 100×100 mm test pattern with 4-bit Gray code (16 positions) and sin/cos tracks with a period of 500 μm has been developed for experimental verification. Requirements for scale manufacturing technology, including the need for photoplotting with 12000 dpi resolution, are defined. The relevance of this work is due to the need for affordable precision feedback devices for program-controlled electric drive devices, including probe systems and laboratory equipment for linear motion.

Пашкевич Валерия Эдуардовна, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, pashkevitch.lera@gmail.com.

Грицкевич Григорий Ильич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь.

Смолкин Юрий Александрович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, alikkoval375@gmail.com.

Жук Роман Сергеевич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, dyzeex64b@gmail.com.

Лешко Александр Сергеевич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, leshhko05@gmail.com.

Научный руководитель – *Ловшенко Иван Юрьевич*, старший преподаватель кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, lovshenko@bsuir.by.

УДК 53.087.45

М. Ч. ТАРАСЕВИЧ

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ УДАРА МЯЧА

Целью данной работы является исследование комплексов электронного оборудования для подготовки спортсменов игровых видов спорта, разработка устройства для измерения энергии удара мяча.

Все радиоэлектронные системы, построенные с использованием микроконтроллера, имеют общее структурное строение и наличие базовых блоков: канал формирования информационного сигнала, канал обработки информационного сигнала по заданному алгоритму и формирования сигналов управления исполительными устройствами и, непосредственно, сам канал исполнительнх устройств.

Измерение энергии удара мяча основано на расчете площади ограниченной кривой зависимости силы удара мяча от времени, полученной при помощи тензометрических датчиков, установленных на специальном основании – мишени системы. Импульсный сигнал зависимости силы удара мяча от времени на выходе тензометрических датчиков показан на рисунке 1 [1].

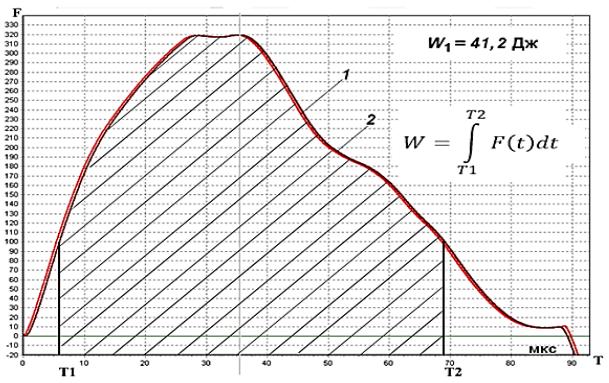


Рисунок 1 – Сигнал на выходе тензометрического датчика

Измеряя энергию удара этим способом, фактически измеряем силу, возникающую при ударе, а она по законам физики определяется упругими свойствами мишени и мяча, а также их размерами, формой и относительной скоростью движения [2].

На основании технического задания и результатов анализа технического задания разработана структурная схема устройства, которая представлена на рисунке 2.

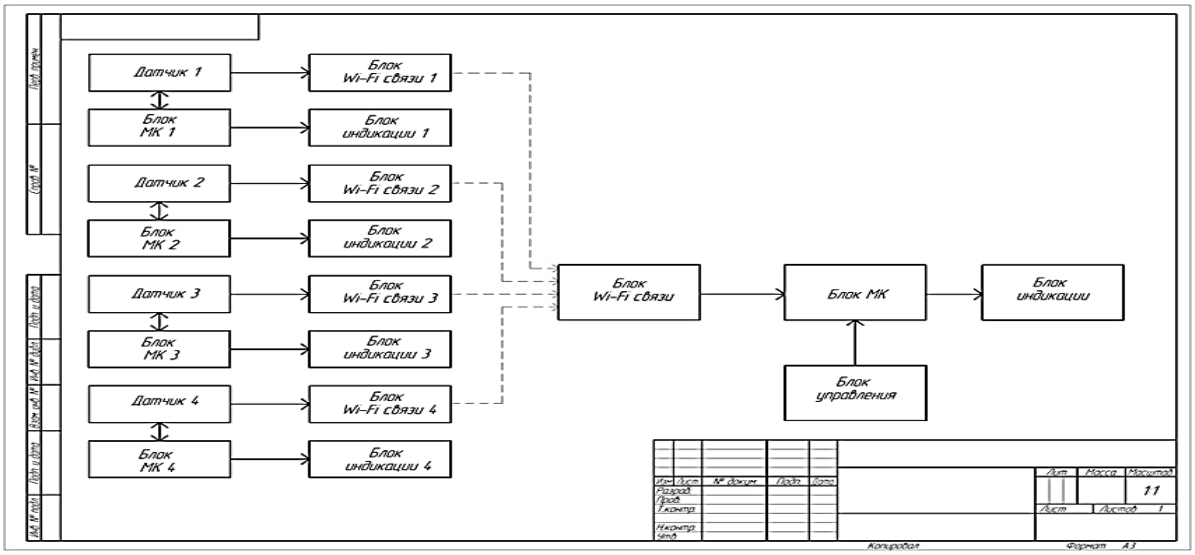


Рисунок 2 – Структурная схема устройства для измерения энергии удара мяча

Конструктивно комплекс электронного оборудования для подготовки спортсменов в игровых видах спорта состоит из нескольких сооружений:

- мишень, в которую попадает футбольный мяч и где считываются параметры удара мяча, основой которого является тензометрический датчик;
- блок обработки информации, выполняющий основные математические операции над информационным сигналом, поступающим вышеуказанного устройства в результате касания мячом датчиков мишени;
- устройство отображения результатов тренировки: временных и энергетических параметров в виде силы удара и скорости мяча в момент его соприкосновения с датчиками мишени;
- устройство управления составными частями спортивного комплекса;
- канал связи, объединяющий отдельные электронные блоки в единую систему, осуществляющий обмен информацией и управляющими сигналами между ними.

На основании условий технического задания разработана электрическая принципиальная схема устройства, которая представлена на рисунке 3.

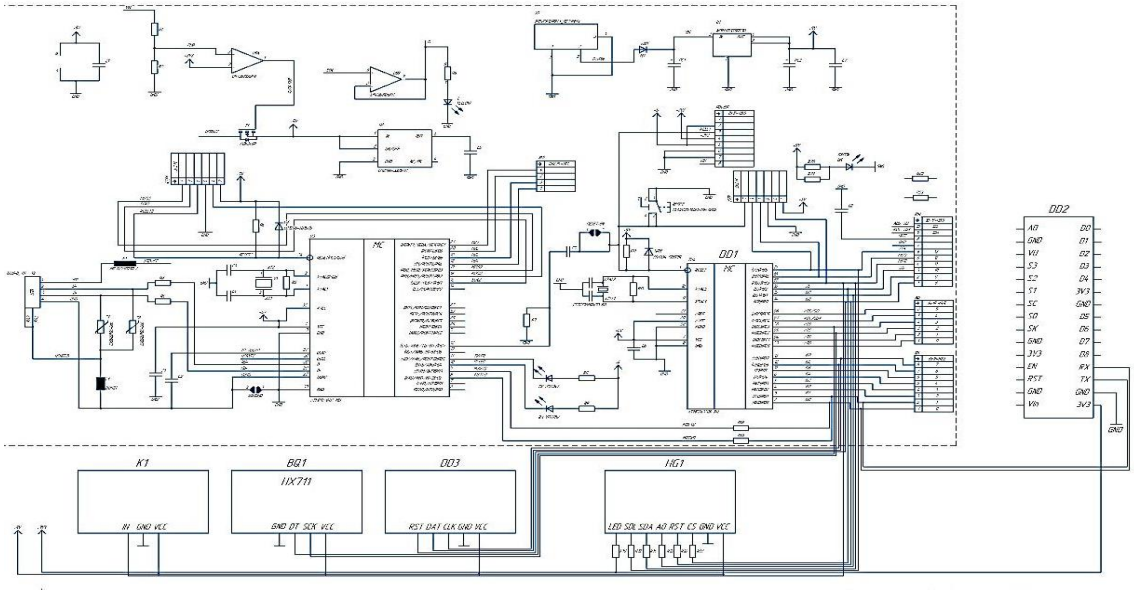


Рисунок 3 – Схема электрическая принципиальная устройства для измерения энергии удара мяча

Принцип работы измерителя энергии удара мяча на базе микроконтроллера ATmega328P строится на централизованном управлении всеми подключенными модулями для фиксации, анализа и передачи данных о физическом воздействии. Основным чувствительным элементом выступает датчик нагрузки FZ6096, который при ударе мяча преобразует механическую деформацию в электрический сигнал, передаваемый на микроконтроллер для вычисления пикового значения силы и последующего расчета кинетической энергии. В момент регистрации удара микроконтроллер опрашивает модуль часов реального времени DS1302, что позволяет присвоить каждому измерению точную временную метку с указанием даты и времени события для ведения истории логов. Полученные расчетные данные мгновенно направляются на цветной ЖК–дисплей ST7735S, где через порты вывода формируется графический интерфейс с результатами измерения, при этом для обеспечения стабильной инициализации и защиты цепей дисплея используются резисторы, включенные последовательно в цепи питания и сброса. Параллельно с визуализацией микроконтроллер осуществляет обмен данными с Wi–Fi модулем ESP8266 через последовательный интерфейс, что обеспечивает беспроводную передачу статистики ударов на удаленный сервер или в мобильное приложение для мониторинга результатов в реальном времени. В случае если сила удара превышает заданный программный порог, микроконтроллер подает логический сигнал на модуль реле FL–3FF–S–Z, которое выступает в роли коммутатора для активации внешней нагрузки, такой как звуковая сирена или световая индикация рекорда. Общая программная логика устройства обеспечивает непрерывный цикл опроса датчика и мгновенную обработку данных, позволяя эффективно синхронизировать работу измерительной части, системы хронометража, графического интерфейса и сетевых протоколов связи.

Основным модулем устройства для измерения энергии удара мяча является плата управления на микроконтроллере ATmega328A Arduino UNO R3, представленная на рисунке 4.

Рисунок 4 – Плата управления Arduino UNO R3

Arduino UNO R3 является последней версией линейки Arduino на микроконтроллере ATmega328A. Она отличается от своих предыдущих плат (Arduino 168p и Arduino 328p) тем, что в ней не используется FTDI USB – последовательный драйвер чип. Вместо этого, плата имеет Atmega16U2, запрограммированного как USB–последовательный преобразователь [3].

Источником сигнала является датчик нагрузки FZ6096 DIYmalls, представляющий собой тензометрический датчик консольного типа (полумост), предназначенный для измерения массы и механического давления в составе весовых систем на базе микроконтроллеров Arduino. Конструктивно датчик представляет собой металлическую Е – образную пластину со встроенными тензорезисторами. При приложении физической нагрузки к центральной части датчика происходит микродеформация металла, которая приводит к изменению электрического сопротивления тензорезисторов. Датчик нагрузки FZ6096 DIYmalls изображен на рисунке 5.

Рисунок 5 – Датчик нагрузки FZ6096 DIYmalls

Максимальный предел измерения одного датчика составляет 50 кг. Датчик имеет трехпроводную схему подключения. Поскольку изменение сопротивления при нагрузке крайне мало, для считывания данных требуется использование специализированного прецизионного 24-битного АЦП, такого как модуль Hx711, который усиливает сигнал и преобразует его в цифровой код для контроллера. Датчики FZ6096 часто используются группами: объединение четырех таких модулей позволяет создать весовую платформу с суммарным пределом до 200 кг, работающую по схеме полного моста Уитстона.

Для отображения режимов работы устройства и результатов измерений применяется жидкокристаллический дисплей ST7735S, изображенный на рисунке 6 и представляющий собой полноцветный графический TFT–модуль для проектов на базе микроконтроллеров, предназначенный для вывода текстовой и графической информации в компактных устройствах. Построен на базе специализированного контроллера ST7735S, который обеспечивает разрешение 128×160 пикселей и глубину цвета до 18 бит (262 144 оттенка) [4]. Для обмена данными используется последовательный периферийный интерфейс SPI, что позволяет значительно экономить порты ввода–вывода контроллера. Модуль оснащен светодиодной подсветкой с низким энергопотреблением и зачастую включает в себя встроенный слот для карт памяти формата microSD, предназначенный для хранения и быстрой загрузки изображений или шрифтов.

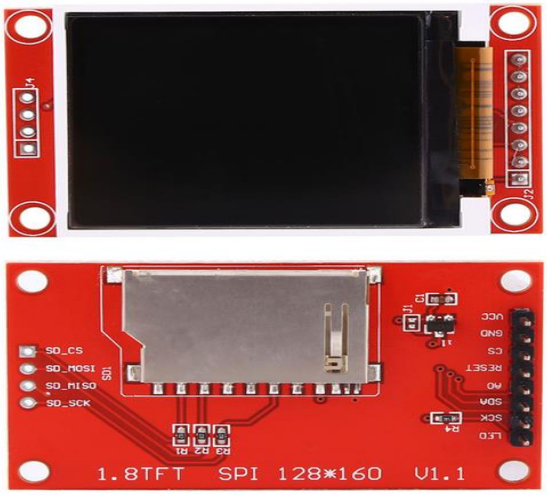


Рисунок 6 – Жидкокристаллический дисплей ST7735S

Для работы устройства в режиме реального времени применяется модуль часов реального времени DS1302, изображеннй на рисунке 7. Это устройство представляет собой экономичный модуль отсчета времени для проектов на базе Arduino и других микроконтроллеров, предназначенный для ведения календаря и времени в реальном режиме. Чип DS1302 содержит часы / календарь и 31 байт статической оперативной памяти (SRAM) с батарейным питанием. Модуль отсчитывает секунды, минуты, часы, дни недели, даты, месяцы и годы с автоматической коррекцией високосного года до 2100 года [5].

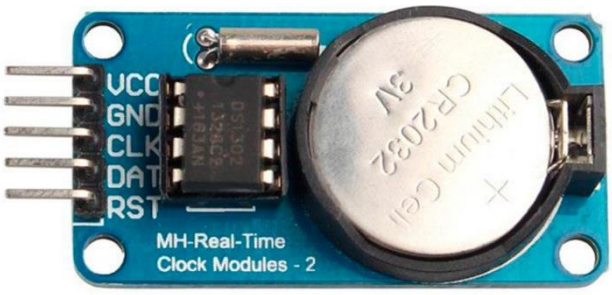


Рисунок 6 – Модуль часов реального времени DS1302

Для расширения технических возможностей устройства для измерения энергии удара мяча к плате Arduino UNO R3 возможно подключение модуля Wi–Fi ESP8266 и электромагнитного реле FL–3FF–S–Z [6].

При механическом воздействии на тензометрические датчик на жидкокристаллический дисплей выводится информация об энергетических параметрах внешнего воздействия: сила удара, измеряемая в Ньютонах и энергия удара, исчисляемая в Джоулях.

Список литературы

1. Ямпольский, Д. З. Датчики и первичные преобразователи/ Д. З. Ямпольский // Компоненты и технологии – 2021. – № 160. – С. 86.
2. Кривченко, И. В. Датчики и первичные преобразователи / И. В. Кривченко // Вестник научно-технического развития – 2010. – № 1. – С. 42–44.
3. AllArduino [Электронный ресурс] / AllArduino. – Режим доступа: https://all–arduino.ru/product/arduino–uno/. – Дата доступа: 20.01.2026
4. Arduinka [Электронный ресурс] / Arduinka. – Режим доступа: https://arduinka.biz.ua/modul–rele–5v–10a–dlya–upravleniya–arduinom–p236c79.html. – Дата доступа: 20.01.2026
5. Arduino [Электронный ресурс] / Arduino. – Режим доступа: https://arduinka.biz.ua/Ips–displey–1–8–spi–tft–st7735–p853c80.html. – Дата доступа: 20.01.2026
6. Arduino [Электронный ресурс] / Arduino. – Режим доступа: https://arduinka.biz.ua/modul–chasov–realnogo–vremeni–ds1302–s–batareey–cr2032–p254c74.html. – Дата доступа: 21.01.2026
7. Arduino [Электронный ресурс] / Arduino. – Режим доступа: https://arduinka.biz.ua/modul–tenzornogo–datchika–hX711–dlya–elektronnyh–vesov–arduino–p347c74.html. – Дата доступа: 20.01.2026
8. Arduino [Электронный ресурс] / Arduino. – Режим доступа: https://arduinka.biz.ua/modul–Wi–fi–svyazi–esp8266–esp–12e–p261c74.html. – Дата доступа: 20.01.2026
9. International Journal of Performance Analysis in Sport [Электронный ресурс] / International Journal of Performance Analysis in Sport. – Режим доступа:https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/24748668.2019.1688071. – Дата доступа: 20.01.2026

The aim of this work is to study the electronic equipment complexes for training athletes of team sports, the use of the specified polymer sensor systems in targets for measuring the impact energy of the ball. To improve the quality of training athletes, increase the number of training programs of varying complexity, automate the processing of training results with subsequent issuance of recommendations for adjusting the load parameters in the training process, electronic equipment complexes are used to train athletes of team sports. Structurally, the electronic equipment complex consists of a system of sensors placed on the game targets and reading the energy parameters of a flying soccer ball, as well as an information signal processing unit, an indication unit and a control unit. A structural diagram of the electronic equipment for training athletes of team sports has been developed. An analysis of the use of polymer (film) piezoelectric sensors in game targets for recording and calculating the energy parameters of a ball impact is carried out. Currently, such complexes exist. The aim of this work is to develop a similar system with the same parameters, but at a lower cost.

Тарасевич Марьян Чеславович, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, orion-88@mail.ru.

Научный руководитель – *Гачко Геннадий Алексеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, gachko@grsu.by.

УДК 533.924

О. И. ТИХОН, М. С. ЛУШАКОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГРУППОВОЙ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ СВЧ РАЗРЯДА

Изучено вляние загруженности реакционно-разрядного объёма установки СВЧ плазменной обработки кремниевыми пластинами на параметры интегрального оптического свечения разряда при непрерывном режиме плазмообразования. Установлено значительное снижение амплитуды оптического сигнала при минимальном оцениваемом уровне вводимой в разряд мощности с ростом количества кремниевых пластин в рабочей камере. При реализации процесса удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин подтверждено наличие «эффекта загрузки» при групповой обработке, связанного с поглощением объёмом кремния части подводимой электромагнитной энергии.

С целью изучения стабильности поддержания плазмы СВЧ разряда, формирумой при непрерывном режиме работы СВЧ генератора [1], выполнена регистрация уровня интегрального оптического свечения с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-28. Оптический сигнал рассматривается в качестве индикатора величины вкладываемой в разряд мощности, и позволяет оценить режим работы СВЧ плазмохимической системы [2].

В объёме реакционно-разрядной камеры установки СВЧ плазменной обработки резонаторного типа располагались группы кремниевых пластин диаметром 100 мм [3]. 2, 4, 6, 8 и 12 пластин были установлены в камере вертикально параллельно потоку рабочего газа. Для формирования разряда были использованы кислород и воздух, в процессе экспериментальных исследований выполнялось варьирование величины мощности, подаваемой на работающий в непрерывном режиме СВЧ магнетрон.

В результате анализа полученных экпериментальных результатов установлено, что различная степень загрузки рабочей камеры полупроводниковыми пластинами при максимальном значении мощности питания СВЧ магнетрона (4020 Вт) не оказывает значительного влияния как на амплитудное значение регистрируемого оп-

тического сигнала, так и на усреднённое значение площади под его огибающей для двух вариантов плазмообразующих газов. Уменьшение подводимой к разряду мощности до минимальной оцениваемой величины (1880 Вт) демонстрирует снижение уровня амплитуды сигнала оптического свечения плазмы с ростом количества обрабатываемых пластин (рисунок 1). В случае загрузки в камеру до 12 пластин уровень сигнала при использовании воздуха может уменьшаться до 2 раз, кислорода – до 4 раз, по сравнению с одновременным расположением в камере двух пластин.

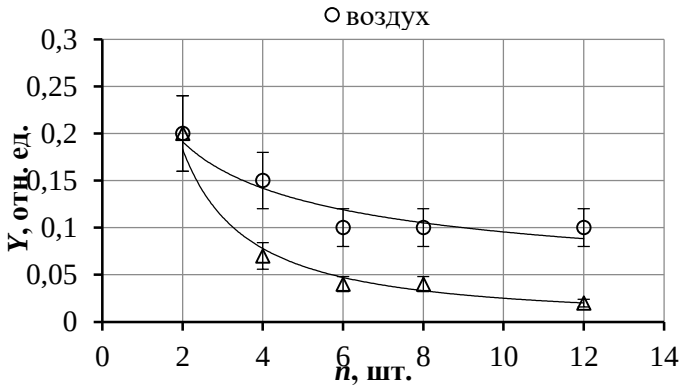


Рисунок 1 – Зависимость усреднённых амплитудных значений уровня сигнала интегрального оптического свечения плазмы от количества кремниевых пластин в реакционно-разрядной камере

При возбуждении СВЧ плазменного разряда эффективная мощность затрачивается как на ионизацию рабочего газа, так и на взаимодействие с кремниевыми подложками, приводящее к их нагреву. В случае уменьшения мощности от максимальной (4020 Вт) до минимальной (1880 Вт) снижение оцениваемого параметра свечения с ростом количества Si пластин в реакционно-разрядной камере, вероятно, связано с недостаточным уровнем подводимой к разряду эффективной мощности. Это обуславливается высокой степенью прямого поглощения части СВЧ энергии материалом кремниевых подложек, и проявляется в «эффекте загрузки».

Для изучения влияния характера плазмохимического взаимодействия при условии непрерывного режима плазмообразования был реализован процесс СВЧ плазмохимического удаления фоторезистивного материала при различной загруженности образцами реакционно-разрядного объёма. Плёнка фоторезиста DSAM-3020 толщиной 1,2 мкм была сформирована на поверхности кремниевых пластин диаметром 100 мм. В качестве плазмообразующего газа использовался кислород, величина рабочего давления составляла 200 Па.

Для анализа влияния степени загруженности камеры обрабатываемыми образцами на продолжительность процесса полного удаления фоторезиста с поверхности пластин мощность трёхфазного источника питания непрерывного режима работы СВЧ магнетрона была установлена на уровне 4020 Вт. 1, 3, 6 и 9 кремниевых пластин располагались в центре рабочего объёма камеры установки СВЧ плазменной обработки вертикально и параллельно потоку плазмообразующего газа. При обработке 3 и 6 пластин образцы располагались в один ряд на расстоянии 20 мм между ними, при обработке 9 пластин образцы размещались в два ряда. На рисунке 2 представлена полученная экспериментальная зависимость.

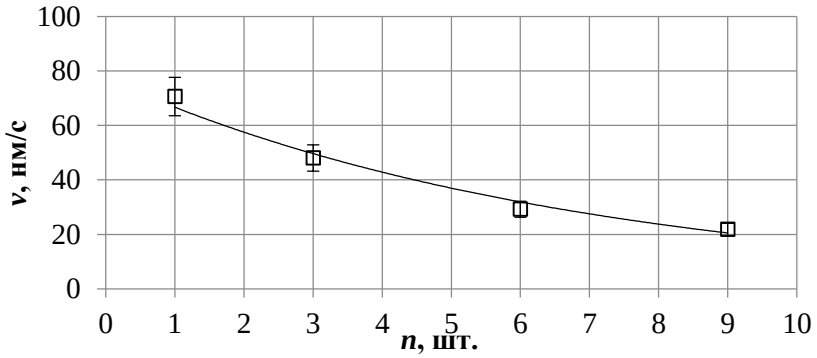


Рисунок 2 – Зависимость скорости СВЧ плазмохимического удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластины от их количества в реакционно-разрядной камере

При выполнении операций плазмохимического удаления плёнки фоторезиста с кремниевых пластин в непрерывном режиме плазмообразования на максимальном исследуемом уровне мощности наблюдается уменьшение оцениваемого параметра скорости полной очистки образцов с 70 нм/с до 21 нм/с. «Эффект загрузки», аналогичный представленным выше экспериментальным результатам, сохраняется. В данном случае с ростом одновременно обрабатываемых образцов из-за интенсивного взаимодействия активных частиц с материалом фоторезиста значительная часть вводимой в реакционный объём электромагнитной энергии необходима для ионизации и поддержания процесса плазмообразования.

Список литературы

1. Полезная модель BY 13119, МПК H 05H 1/46 (2006.01). Регулируемый трехфазный источник питания работающего на плазменную нагрузку СВЧ магнетрона : № 20220142 : заявлено 10.06.2022 : опубл. 28.02.2023 / О. И. Тихон, С. И. Мадвейко, С. В. Бордусов. ; заявитель – Белорус. гос. ун-т информ. и радиоэлектрон. – 4 с.

2. Намитоков, К. К. Излучение газоразрядной плазмы / К. К. Намитоков, П. Л. Пахомов, С. Н. Харин. – Алма-Ата : Наука, 1984. – 302 с.

3. Tsikhan, O. I. Study of pulsed and continuous modes of microwave discharge plasma generation in a resonator-type plasmatron / O. I. Tsikhan, S. I. Madveika, S. V. Bordusau // High Temperature Material Processes. – 2021. – Vol. 25, № 2. – P. 65–75.

The study examined the effect of silicon wafer packing density of the reaction-discharge chamber of a microwave plasma treatment system on the parameters of integral optical discharge luminescence during continuous plasma formation. A significant decrease in the amplitude of the optical signal was observed at the minimum evaluated level of power input into the discharge with an increase in the number of silicon wafers in the processing chamber. In the process of photoresist stripping from the silicon wafers the presence of a batch processing ‘loading effect’ was confirmed. It is associated with the absorption of part of the supplied electromagnetic energy by the volume of silicon material.

Тихон Олег Игоревич, молодой ученый, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, kritgar@bsuir.by.

Лушакова Мария Сергеевна, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, lushakova@bsuir.by.

Научный руководитель – *Мадвейко Сергей Игоревич*, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, madveyko@bsuir.by.

УДК 538.9

В. В. ЮДИН

РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОКЛИМАТОМ В ТЕПЛИЦЕ НА ОСНОВЕ IOT-ТЕХНОЛОГИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Рассматривается подход к созданию интеллектуальной системы автоматического поддержания параметров микроклимата в теплице с использованием открытых IoT-компонентов и инновационного контура рекуперации тепла от солнечных панелей. Система демонстрирует возможность достижения энергетической автономности и повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей.

В условиях развития частного фермерства и импортозамещения возрастает потребность в недорогих, масштабируемых решениях для автоматизации теплиц. Существующие промышленные системы зачастую отличаются высокой стоимостью и закрытой архитектурой, не допускающей глубокой модификации. Предлагаемое решение базируется на доступных микроконтроллерах семейства ESP32-C3 и открытой платформе умного дома Home Assistant, что позволяет гибко настраивать логику управления, осуществлять удаленный мониторинг и существенно снижать затраты на электроэнергию за счет комплексного использования солнечной энергии.

Цель работы: создание прототипа интеллектуальной системы автоматического поддержания температуры, влажности воздуха и почвы в теплице, интегрированной с платформой Home Assistant и оснащенной солнечной панелью для повышения энергоэффективности путем утилизации избыточного тепла от фотоэлементов.

Задачи:

1. Подобрать компонентную базу: датчики параметров среды и исполнительные механизмы.
2. Разработать аппаратную архитектуру и схему подключения на базе микроконтроллера ESP32-C3 с учетом энергоэффективности.
3. Спроектировать узел энергоснабжения с функцией отвода тепла от тыльной стороны солнечной панели для ночного обогрева теплицы.

4. Настроить программную среду ESPHome и создать сценарии автоматизации (автоклимат) в Home Assistant.

Архитектура системы и энергомодуль.

Проектируемая архитектура объединяет измерительный, управляющий и энергетический контуры в единую информационную сеть, где центральным узлом выступает микроконтроллер ESP32-C3 Supermini. Выбор данного контроллера обусловлен наличием встроенного стека протоколов Wi-Fi, что позволяет реализовать нативную интеграцию с сервером Home Assistant через программную среду ESPHome. Обмен данными внутри системы организован посредством цифровой шины I2C, к которой параллельно подключены основные сенсорные модули. В частности, датчик BME280 обеспечивает прецизионное измерение температуры и влажности воздуха, а модуль BH1750 фиксирует интенсивность солнечного излучения для управления режимами досвечивания. Мониторинг состояния субстрата осуществляется с помощью емкостного датчика влажности почвы, подключенного к аналого-цифровому преобразователю контроллера, что предотвращает деградацию электродов. Для контроля энергетических показателей в цепь заряда включен датчик тока и напряжения INA219. Полученная информация обрабатывается программными алгоритмами, которые инициируют управляющие сигналы для исполнительных механизмов. Учитывая низкую нагрузочную способность выводов микроконтроллера, коммутация силовой периферии реализована через промежуточные MOSFET-ключи и H-мосты. Это позволяет управлять водяным насосом, вытяжным вентилятором и фитолентами, а также обеспечивать реверсивное движение линейного привода для регулирования положения вентиляционной форточки. Общая логическая структура соединений представлена на рисунке 1.

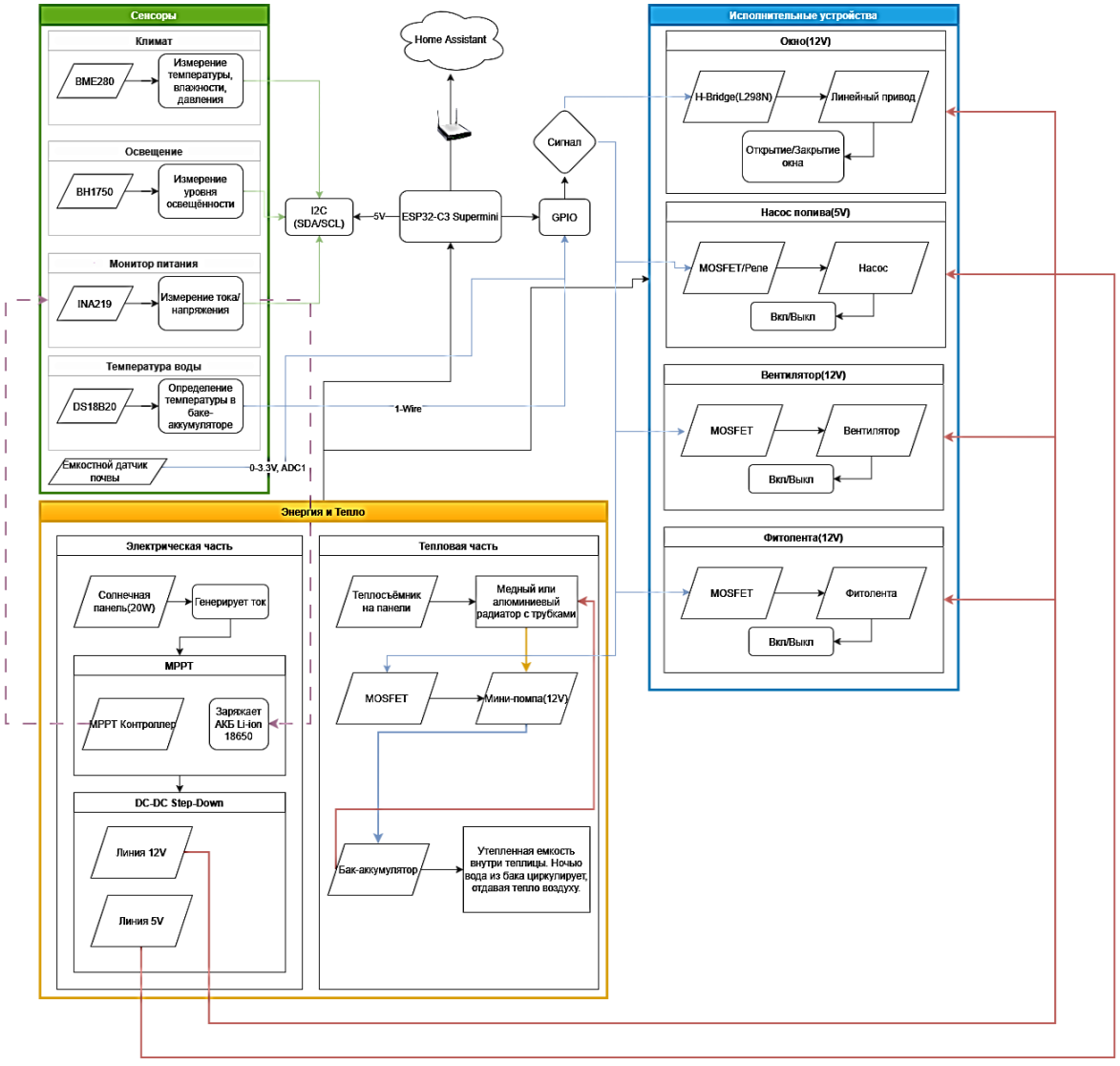


Рисунок 1 – Общая архитектурная блок-схема системы автоматизации

Энергетическая независимость системы обеспечивается фотоэлектрической панелью мощностью 20W в связке с MPPT-контроллером и блоком Li-Ion аккумуляторов. Особое внимание в работе уделено инновационному методу повышения КПД системы за счет тепловой рекуперации. Поскольку перегрев фотоэлементов снижает их эффективность, на тыльной стороне солнечной панели размещен жидкостный теплосъемник. При достижении критической температуры контроллер активирует циркуляционную помпу, перемещающую теплоноситель в теплоизолированный бак-аккумулятор внутри теплицы. Данное решение позволяет не только охлаждать панель, увеличивая выработку электроэнергии, но и аккумулировать низкопотенциальное тепло для стабилизации температуры в ночное время.

Алгоритмы управления и результаты.

Автоматизация процессов в системе построена на событийной модели платформы Home Assistant. Программная логика предусматривает автоматическое открытие форточки и запуск принудительной вентиляции при превышении температуры порога в 28°C. В случае снижения влажности почвы ниже установленного агротехнического минимума система инициирует цикл капельного полива заданной длительности. Параллельно с этим осуществляется мониторинг уровня освещенности: при его падении ниже критического значения в дневное время активируется фитосвет.

В ходе предварительного тестирования на базе цифрового двойника системы было подтверждено корректное функционирование всех сценариев автоматизации. Использование комбинированного энергомодуля позволило не только обеспечить полную автономность электроники, но и зафиксировать положительную динамику температурного режима за счет использования бака-аккумулятора. Исследование показало, что отвод избыточного тепла от солнечной панели позволяет существенно сгладить суточные температурные колебания внутри защищенного грунта.

Результаты.

Разработан работоспособный прототип системы управления теплицей. Интеграция с Home Assistant позволила получить удобный дашборд для визуализации данных и удаленного контроля. Анализ графиков изменения температуры и влажности подтверждает эффективность алгоритмов автоматизации. Тепловой контур продемонстрировал способность частично компенсировать энергозатраты на ночной обогрев, перераспределяя избыточную дневную энергию.

Выводы.

Предложенная система позволяет существенно снизить трудозатраты на обслуживание тепличных хозяйств и повысить точность соблюдения агротехнических условий. Использование возобновляемых источников в комбинации с рекуперацией тепла доказывает экономическую целесообразность применения открытых IoT-технологий в сфере локального фермерства.

Список литературы

1. Документация платформы Home Assistant [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.home-assistant.io/docs/. – Дата доступа: [14.03.2026].

2. Руководство пользователя ESPHome [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://esphome.io. – Дата доступа: [14.03.2026].

3. Оптимизация температурного режима солнечных панелей / И. И. Иванов [и др.] // Журнал возобновляемой энергетики. – 2022. – № 4. – С. 15–22.

This research demonstrates the development of an autonomous greenhouse microclimate control system based on open-source IoT technologies (ESP32, Home Assistant). The system features a combined energy module that utilizes a solar panel for both electricity generation and thermal energy recovery, significantly improving overall energy efficiency and automating microclimate maintenance.

Юдин Витовт Валерьевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, yudin.vitovt@gmail.com.

Научный руководитель – *Ассанович Борис Алиевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, bas@grsu.by.

СЕКЦИЯ 4.

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 004.02

М. В. ВОРОНОВИЧ, С. В. ДЮРДЬ

3D-СИМУЛЯТОР МАЯТНИКОВЫХ СИСТЕМ КАК ИНСТРУМЕНТ ЦИФРОВОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Представлен комплекс для изучения колебательных процессов, включающий 3D-модели маятников Фуко, двойного, тройного, пружинного, параметрического и математического маятников. Рассмотрены блок теории и блок моделирования с визуализацией движения и графиками. Комплекс разработан на C# в Unity с использованием метода Рунге-Кутты 4-го порядка. Показана возможность применения для лекций, практик и лабораторных работ.

Изучение колебательных процессов является важным разделом физики, применяющимся в большом количестве сфер человеческой жизни. Для понимания учащихся одним из важнейших факторов является наглядность. Данная статья освещает комплекс, включающий в себя наглядные 3D-модели множества маятников и блок теории, позволяющие упростить проведение лекционных, практических и лабораторных занятий. Проведение занятий на реальных установках являются затратными по времени и ресурсам, результаты проведения эксперимента будут скорректированы погрешностью. Важно заметить, что развитие информационных технологий положительно скажется на понимании материала молодым поколением.

Демонстрируемый комплекс представлен двумя основными блоками: блок теории (рисунок 1) и блок 3D-модели маятника (рисунок 2). Блок теории позволяет изучить основную информации и законы движения представленных маятников, а именно: маятника Фуко, двойной маятник, тройной маятник, пружинный маятник, параметрический маятник и математический маятник. Данный блок был интегрирован для упрощения доступа к информации, что экономит время при изучении материалов.

Блок модели включает в себя саму модель маятника, перечисление изменяемых параметров, составляющие состояния, кнопки управления и графики скорость от амплитуды, амплитуды от времени и энергии от времени. Такое расположение компонентов позволяет наблюдать за изменениями в режиме реального времени. Комплекс разработан на языке C# на платформе Unity [1, с. 31], а основная математика блока моделирования и расчета данных построена на методе Рунге-Кутты 4-го порядка [3, с. 24]. Суть системы заключается в том, что с каждым обновлением кадра меняется и значение составляющих состояния, а также вид графиков.

Данная конфигурация является оптимальной для преподавания. Подача теории будет упрощена, если наглядно показывать пример изучаемого маятника, особенно в случае двойного или тройного маятника. При решении практических задач и выполнении лабораторных работ комплекс позволяет проводить моделирование конкретных требуемых условий. Также, комплекс облегчает выполнение лабораторной работы, поскольку проекцию движения можно остановить в определённый момент времени и снять необходимые показания.

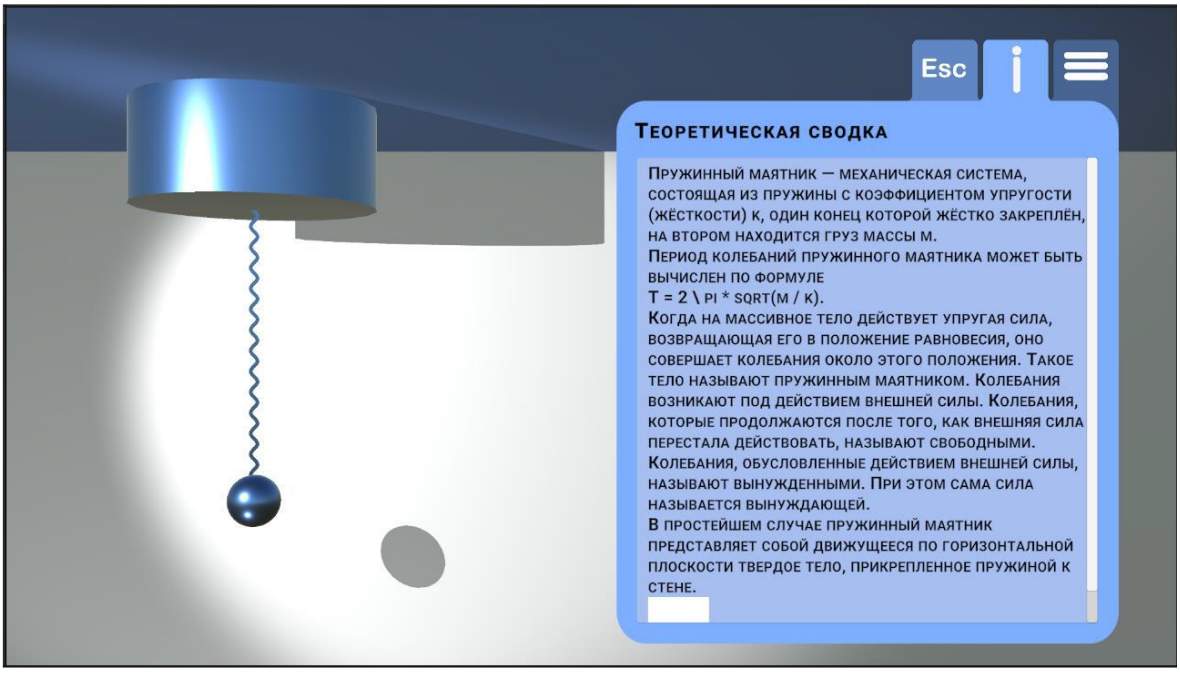


Рисунок 1 – Блок теории

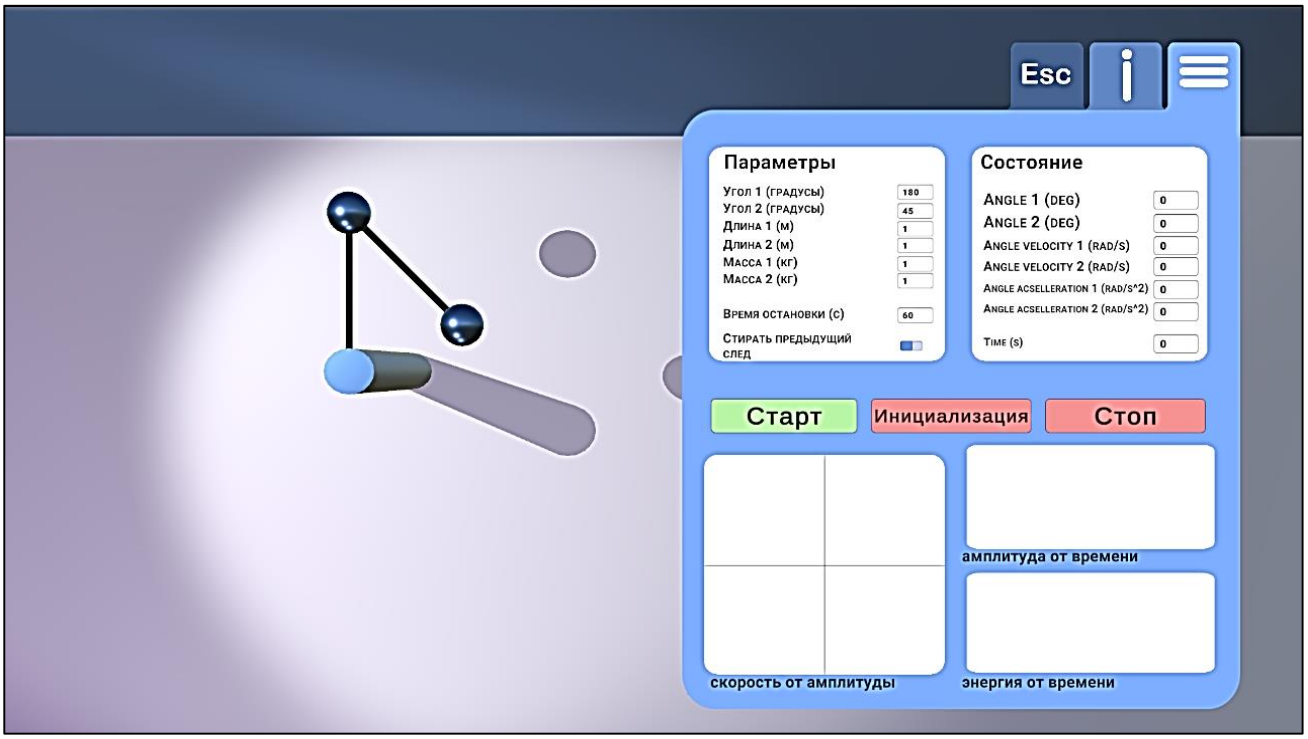


Рисунок 2 – Блок 3D-модели маятника

За счёт реализованной 3D-модели маятника [2, с. 89] траектория движения маятника становится наглядной и интуитивно понятной, что также является позитивным фактором для усвоения материала. Такие методики являются полу игровыми, что является притягивающим фактором для молодого поколения. Комплекс разработан таким образом, что является привлекательным для работы у преподавателей, изучения и вспоминания уже пройденного материала у школьников и студентов.

Сфера современных технологий, компьютерное моделирование и программирование могут положительно сказаться на сфере образования. При грамотном внедрении современных технологий образовательный процесс может стать не только проще, но и интереснее. Демонстрируемый комплекс показывает, что программа может помогать в образовательном процессе и сделать его более доступным, поскольку реальные физические станки дороже, чем персональный компьютер.

Список литературы

1. Ларкович, С. Н. C# для Unity-разработчиков. Практическое руководство по созданию игр / С. Н. Ларкович, П. В. Евдокимов. – СПб. : Наука и Техника, 2023. – 368 с.

2. Орлоа, С. А. Технологии разработки программного обеспечения: разработка сложных программных систем / С. А. Орлов. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – С. 6–198.

3. Горелов, Ю. Н. Численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений (метод Рунге-Кутты) / Ю. Н. Горелов, Л. В. Кургаская. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2023. – С. 22–25.

Presented is an educational complex for studying oscillatory processes, including 3D models of Foucault’s, double, triple, spring, parametric and simple pendulums. The theory block and simulation block with motion visualization and graphs are considered. The complex is developed in C# using Unity engine with the fourth-order Runge-Kutta method. The application for lectures, practical and laboratory classes is demonstrated.

Воронович Марк Валентинович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, markvoronovich060@gmail.com.

Дюрдь София Владимировна, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, sssofiadddurd.25@gmail.com.

Научный руководитель – *Ситкевич Анастасия Леонидовна*, магистр физико-математических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, girl-physicist@mail.ru.

УДК 372.853

В. И. ГЛЕБОВИЧ

КОМПЛЕКСНАЯ ЗАДАЧА КАК СРЕДСТВО СИСТЕМАТИЗАЦИИ И ОБОБЩЕНИЯ ЗНАНИЙ ПО ФИЗИКЕ

Рассматривается вариант проведения учебного занятия по систематизации и обобщению знаний по физике на примере использования комплексной задачи с графическим содержанием. Приведен пример такой задачи для 11 класс по разделу «Механические колебания и волны». Представлена таблица для структурирования теоретического материала при решении комплексной задачи с графическим содержанием.

Написание самостоятельной или контрольной работы по физике является логическим завершением изучения темы или раздела. Поэтому учебное занятие по систематизации и обобщению знаний учащихся несет в себе огромную нагрузку и ответственность. Суть данного учебного занятия не в решении схожего варианта самостоятельной или контрольной работы, а в структурировании полученной ранее информации и её применении при решении задач. Основная сложность заключается в нехватке времени. За одно учебное занятие необходимо вспомнить пройденный за несколько недель или месяцев учебный материал и успеть применить эти знания при решении задач разного уровня сложности. Устранить данную проблему поможет применение комплексной задачи по физике – задача, для решения которой необходимы знания разных тем одного раздела [2]. Если в условии комплексной задачи будет дан график – это увеличит ее образовательный потенциал. Такую задачу можно назвать комплексной задачей с графическим содержанием.

Применение комплексной задачи с графическим содержанием на учебном занятии по систематизации и обобщению знаний позволяет одновременно выделить основной теоретический материал и применить его для решения шаблонных задач. Для наглядности и систематизации знаний при выполнении каждого требования такой задачи можно заполнять таблицы или схемы с формулами и законами, анализировать участки графика.

Рассмотрим пример такой задачи для 11 класса по разделу «Механические колебания и волны».

На рисунке 1 представлен график гармонических колебаний бруска на пружине вдоль оси Ox. Масса бруска 100 г.

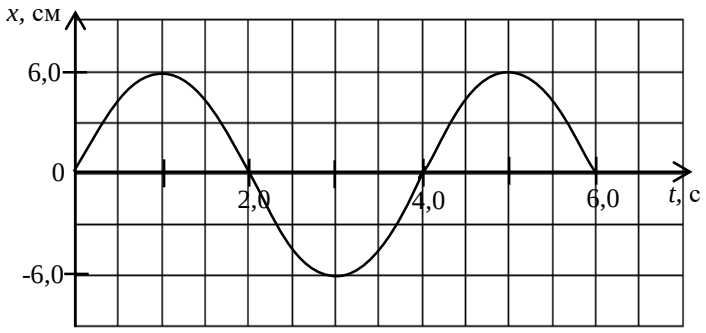


Рисунок 1 – График гармонических колебаний бруска на пружине

1) Определите период, частоту, циклическую частоту колебаний бруска.

2) Чему равна амплитуда колебаний бруска?

3) Запишите кинематический закон колебаний бруска.

4) Чему равен модуль равнодействующей сил, действующих на брусок, в момент времени 1 секунда?

5) Определите проекцию импульса бруска на ось Ox в момент времени 4 секунды.

6) Постройте графики зависимости проекции скорости и проекции ускорения бруска на ось Ox от времени.

7) Найдите среднюю скорость пути бруска за период колебаний.

8) Определите коэффициент жесткости пружины.

9) Определите кинетическую энергию бруска в моменты времени 3 секунды, 4 секунды.

10) Определите потенциальную энергию пружины в моменты времени 4 секунды, 5 секунд.

Таблица 1 – Структурирование теоретического материала при решении комплексной задачи с графическим содержанием

	Требование задачи	Формулы	Пояснения по графику
1.	Определите период, частоту, циклическую частоту колебаний бруска	$T = \frac{\Delta t}{N};\ \nu = \frac{N}{\Delta t} = \frac{1}{T};$ $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$	Период колебаний – время одного полного колебания. На графике это время полного изгиба синусоиды, т.е. *4 с*. Частота и циклическая частота рассчитываются по формуле, зная период.
2.	Чему равна амплитуда колебаний бруска?	Определяется по графику.	Амплитуда колебаний – максимальное отклонение тела от положения равновесия. Из графика видно, что максимальная координата тела – *6 см*.
3.	Запишите кинематический закон колебаний бруска	$x(t) = x_{max}\sin(\omega t + \varphi_0)$ $x(t) = x_{max}\cos(\omega t + \varphi_0)$	График выходит из точки *(0, 0)*, значит, колебания выполняются по закону синуса. Вместо x_{max} и ω подставляем значения из предыдущих пунктов. Начальная фаза колебаний равна нулю.
4.	Чему равен модуль равнодействующей сил, действующих на брусок, в момент времени 1 секунда?	$F = ma$ $a_x(t) = x''(t) =$ $= -0{,}06 \cdot \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 sin\left(\frac{\pi}{2}t\right)$ $a_{max} = \omega^2 A$	Из графика видно, что в момент времени *1 с* координата тела максимальна, значит, модуль ускорения будет максимальным.
5.	Определите проекцию импульса бруска на ось Ox в момент времени 4 секунды.	$p_x = mv_x$ $v_x(t) = x'(t) =$ $= 0{,}06 \cdot \frac{\pi}{2}\cos\left(\frac{\pi}{2}t\right)$ $p_{max} = mv_{max}$ $v_{max} = \omega A$	В момент времени 4 секунды брусок проходит положение равновесия, значит, его скорость будет максимальной.
6.	Постройте графики зависимости проекции скорости и проекции ускорения бруска на ось Ox от времени.	$v_x(t) = x'(t) =$ $= 0{,}06 \cdot \frac{\pi}{2}\cos\left(\frac{\pi}{2}t\right)$ $a_x(t) = x''(t) =$ $= -0{,}06 \cdot \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 sin\left(\frac{\pi}{2}t\right)$	По оси абсцисс откладывают время и в первом, и во втором случае построения. Моменты времени удобнее всего брать как в исходном графике. Когда координата тела максимальна, проекция скорости тела равна нулю, а проекция ускорения – максимальна. Когда координата тела равна нулю, проекция скорости бруска максимальна, а проекция ускорения – ноль.
7.	Найдите среднюю скорость пути бруска за период колебаний.	$\langle v \rangle = \frac{s}{t} = \frac{4A}{T}$	Пройденный за период колебаний путь равен 4A. Амплитуда колебаний определена в пункте 2.
8.	Определите коэффициент жесткости пружины.	$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ или $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$	Определяется только по формуле. Значения периода и циклической частоты определены в пункте 1.
9.	Определите кинетическую энергию бруска в моменты времени 3 секунды, 4 секунды	$W_K = \frac{mv^2}{2}$	В момент времени 3 секунды скорость тела равна нулю, поскольку тело отклоняется от положения равновесия на максимальное значение. Значение скорости для 4 секунд определено в пункте 5.
10.	Определите потенциальную энергию пружины в моменты времени 4 секунды, 5 секунд.	$W_П = \frac{kx^2}{2}$	Значения координаты бруска в моменты времени 4 и 5 секунд определяются из графика в условии задачи. Также координату можно рассчитать, используя формулу из пункта 3.

Заполнение подобной таблицы позволяет не только вспомнить формулы, но и аналитически, вербально и количественно проанализировать график зависимости физических величин. Перестроение исходного графика в других координатных осях позволяет закрепить знания закономерностей взаимосвязи физических величин [1].

Комплексную задачу с графическим содержанием целесообразно давать и в качестве домашнего задания перед самостоятельными и контрольными работами. Такая задача заменит формальное повторение пройденных параграфов и позволит еще раз закрепить пройденный учебный материал.

Список литературы

1. Глебович, В. И. Методические основы использования качественных задач с графическим содержанием в процессе обучения физике / В. И. Глебович // Вестник образования. – 2021. – № 7. – С. 32–43.

2. Харазян, О. Г. Методические основы использования комплексных задач на уроках физики / О. Г. Харазян, Э. В. Полудень // Вести БГПУ. Сер. 3, Физика. Математика. Информатика. Биология. География. – 2019. – № 2. – С. 31–37.

This article discusses a possible lesson on systematizing and summarizing physics knowledge using a complex problem with graphical content. An example of such a problem is provided for 11th-grade students in the section «Mechanical Oscillations and Waves.» A table is provided for structuring the theoretical material when solving a complex problem with graphical content.

Глебович Валентина Ивановна, учитель физики ГУО «Лицей № 1 имени академика Ю. М. Островского г. Гродно», Гродно, Республика Беларусь, glebovicz_vi@mail.ru.

Научный руководитель – *Харазян Оксана Гагиковна*, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, kharazian.og@gmail.com.

УДК 37.016:53

А. А. ГУЛЬ

ПАРАДОКСЫ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ МОТИВАЦИИ К ИЗУЧЕНИЮ ФИЗИКИ

Раскрыто понятие учебной мотивации, рассмотрены её уровни и особенности формирования при изучении физики. Описаны основные трудности, возникающие у школьников в процессе освоения предмета, и предложены приёмы повышения познавательного интереса. На примере парадокса чайного листа показаны преимущества использования физических парадоксов как инструмента развития критического мышления и мотивации учащихся.

В современном образовании наблюдается снижение интереса к изучению точных наук, в частности физики, которую учащиеся часто воспринимают как сложный предмет. В условиях цифровизации и роста технологий формирование естественнонаучной грамотности и критического мышления становится одной из ключевых задач школы. Традиционные методы обучения не всегда способны увлечь школьников, продемонстрировать связь физических законов с повседневными явлениями и современными технологиями. В связи с этим возникает необходимость в разработке и внедрении педагогических подходов, способных повысить мотивацию учащихся, сделать изучение физики увлекательным и практически значимым.

Мотивация рассматривается в психологии как сложный многоуровневый регулятор жизнедеятельности человека. Одной из её разновидностей является учебная мотивация. Учебная мотивация включена в учебную деятельность и имеет ряд специфических особенностей, поскольку она связана с организацией образовательного процесса, с субъективными особенностями обучающегося, с субъективными особенности педагога, со спецификой учебного предмета. Проблема учебной мотивации относится к числу фундаментальных проблем в психологии. Её значимость для разработки современной психологии связана с анализом источников активности человека, побудительных сил его деятельности и поведения [1].

Особую остроту проблема учебной мотивации приобретает в контексте преподавания конкретных дисциплин, в частности физики. Формирование устойчивого познавательного интереса к физике сопряжено с рядом специфических трудностей.

Во-первых, восприятие физики как сложной и оторванной от жизни дисциплины часто связано с особенностями её преподавания на начальном этапе. Учащиеся сталкиваются с абстрактными понятиями и формальным математическим аппаратом до того, как у них формируется ясное понимание их связи с реальными явлениями. Это создаёт психологический барьер и ощущение недоступности предмета.

Во-вторых, ключевой причиной возникновения этого барьера является неготовность самих когнитивных инструментов учащихся. Для успешного освоения физики необходимы развитое абстрактно-логическое и пространственное мышление, а также навык построения сложных причинно-следственных цепочек. Отсутствие целенаправленного развития этих навыков приводит к фрагментарности понимания, быстрому накоплению пробелов и, как следствие, к потере интереса и уверенности в своих силах.

В-третьих, существующая методика преподавания физики во многих школах всё ещё опирается на устаревший подход, где ведущая роль отводится лекционной форме и работе у доски с мелом. Визуализация явлений ограничивается схематическими рисунками, а изучение предмета сводится к механическому заучиванию многочисленных формул, что вызывает сложности у значительной части учащихся. При этом из-за нехватки современного лабораторного оборудования, а порой и времени на их подготовку, учителя редко проводят на уроках яркие и показательные эксперименты, которые могли бы «оживить» теорию, продемонстрировать связь формул с реальным миром и пробудить у школьников живой интерес к исследованию окружающих явлений.

Приемами и методами создания мотивации на уроках физики могут выступать: 1) апелляция к жизненному опыту обучающихся, 2) примеры практического использования знаний, которые предстоит изучить на данном уроке, 3) сопровождение преподавания учебного материала анимациями, видеофрагментами, мультимедийными презентациями, 4) использование игровых элементов, 5) проведение демонстрационный и лабораторный эксперимент, 5) использование физических парадоксов как инструмент объяснения проблемной ситуации.

Одним из способов повышения мотивации к изучению физики, выдвинутых для рассмотрения, является ***использование интересных фактов или физических парадоксов***. Однако, чтобы этот метод работал целенаправленно, а не просто как занимательное развлечение, важно понимать механизмы его воздействия на восприятие и мышление учеников. Именно поэтому ключевое значение имеет психолого-педагогическое обоснование подобной практики.

1. «Эффект новизны» и пробуждение любопытства. Мозг человека естественным образом реагирует на что-то необычное и противоречивое. Парадокс нарушает привычную картину мира, создавая когнитивный диссонанс («этого не может быть!»).

2. Эмоциональная вовлеченность. Сухие формулы и законы могут не вызывать эмоций. Удивительный факт или забавный парадокс вызывают удивление, восторг или даже здоровый скепсис. Эмоция – лучший «клей» для памяти. То, что удивило, запоминается надолго.

3. Преодоление «скучного» имиджа физики. Физика многим ученикам кажется абстрактной и оторванной от жизни. Интересные факты показывают, что физика – это наука о мире вокруг нас: от взрыва звезд до того, почему тост всегда падает маслом вниз.

4. Создание «якоря» для знаний. Сложную теоретическую тему легко привязать к яркому, запоминающемуся примеру. В дальнейшем, вспоминая парадокс, ученик легче воспроизведет и связанный с ним физический закон. Это работает как мнемоническое правило.

5. Развитие критического мышления. Анализ парадокса учит не принимать информацию на веру, а проверять ее, искать скрытые условия, строить гипотезы и подвергать их сомнению. Это основа научного метода.

Парадокс не должен оставаться просто забавной головоломкой. Обязательным завершающим этапом должно быть его разрешение с помощью изучаемых физических законов. Только тогда этот прием работает на глубокое понимание, а не просто на развлечение. В современных образовательных стратегиях акцент смещается с пассивного усвоения информации на активное познание, где ключевую роль играет внутренняя мотивация ученика. Одним из наиболее эффективных методов в этой парадигме является использование познавательных парадоксов и удивительных фактов [2].

В отличие от простого перечисления законов, парадокс создает интеллектуальный вызов, «когнитивный диссонанс», который разрушает бытовые, но ошибочные представления о мире. Столкнувшись с вопросом «почему лед скользкий?» или мысленным экспериментом о коте Шрёдингера, ученик из пассивного слушателя превращается в исследователя, который хочет разрешить противоречие. Этот процесс самостоятельного поиска ответа через призму физических законов не только обеспечивает глубокое понимание материала, но и рождает подлинный интерес, превращая абстрактную теорию в личностно значимое открытие.

Для повышения интереса к изучению физики предложено рассмотреть следующий парадокс.

Парадокс чайного листа. Вы наверняка замечали, что размешивая чай с чаинками, они собираются в центре кружки. Привычная вещь, но разве так должно быть? Ведь при вращательном движении возникает центробежная сила, которая всё выталкивает наружу, к краям. В стиральной машине так белье выжимают. Почему тогда чайные крупицы движутся наоборот?

Разрешение парадокса. При размешивании чая по всему объему возникает определенный баланс сил, с одной стороны центробежная сила пытается вышвырнуть частицы жидкости наружу, но с другой стороны в кружке возникает градиент давления, который возрастает от центра к краям. Это видно по тому, как выгибается поверхность воды. Благодаря такому балансу, частицы жидкости не смещаются ни к центру, ни от центра, а вращаются ровно по окружности. Если прекратить размешивание, то баланс сохраняется везде, кроме стенок и дна. Из-за трения о поверхность, скорость жидкости там уменьшается, от чего падает центробежная сила, но давление никуда не девается. И у дна оно начинает смещать воду в центр, увлекая за собой и чаинки. Если всё вращать как одно целое (вместе с кружкой) то никакого парадокса нет.

Парадокс чайного листа является самым «домашним» экспериментом, который превращает бытовое действие в открытие. Он демонстрирует сложное взаимодействие центробежной силы, трения и вторичных потоков в самой обычной кружке, доказывая, что физические законы работают всегда и везде.

Таким образом, использование физических парадоксов на уроках физики является эффективным методическим приёмом для развития критического мышления, формирования научного мировоззрения и повышения мотивации учащихся. Парадоксы, представляющие собой ситуации с заведомо неочевидным или кажущимся противоречивым результатом, создают интеллектуальное затруднение, побуждающее учеников к активному поиску, анализу и применению полученных теоретических знаний для разрешения противоречия.

В заключение отметим, что формирование любых знаний, достижений в учебе зависят, прежде всего, от желания и стремления школьников, что в свою очередь связано с сформированностью мотивов учения. Решение этого вопроса во многом зависит от уровня организации учебной деятельности, которая должна максимально способствовать раскрытию внутреннего мотивационного потенциала личности школьника.

Список литературы

1. Ильин, Е. П. Мотивация и мотивы / Е. П. Ильин. – СПб. : Питер, 2000. – 512 с.

2. Усманова, Э.З. Мотивационная эмоциональная регуляция мышления в условиях интеллектуального конфликта / Э. З. Усманова. – Т. : Укитувчи, 1993. – 104 с.

The article reveals the concept of educational motivation, examines its levels and features of formation in the study of physics. The main difficulties encountered by students in the process of mastering the subject are described, and techniques for increasing cognitive interest are proposed. Using the example of the tea leaf paradox, the advantages of using physical paradoxes as a tool for developing critical thinking and student motivation are shown.

Гуль Альберт Андреевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, secondwert@gmail.com.

Научный руководитель – *Харазян Оксана Гагиковна*, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, kharazian.og@gmail.com.

УДК 37.016:53

Н. М. ДОСТА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШПАРГАЛОК ДЛЯ УСПЕШНОГО ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКИ

Раскрыто понятие шпаргалки как дидактического инструмента, рассмотрены её основные функции и типы. Описаны психолого-педагогические аспекты создания и использования шпаргалок в процессе изучения физики. На примере показаны преимущества использования структурированных опорных материалов для систематизации знаний и формирования алгоритмического мышления учащихся при решении физических задач.

Традиционно шпаргалки воспринимаются как сугубо негативный атрибут. Однако данный подход игнорирует их значительный дидактический потенциал, который раскрывается не в момент использования на проверочной работе, а в процессе их самостоятельного создания. По своей сути, шпаргалка является не просто инструментом для списывания, а сложным механизмом психологической и информационной поддержки обучающегося. В процессе ее создания происходит анализ учебного материала, его структурирование и систематизация. Учащийся вынужден выделять наиболее важные аспекты изучаемой дисциплины, устанавливать логические связи между различными понятиями, формулировать определения в сжатой форме. Этот процесс способствует более качественному усвоению материала, даже если впоследствии шпаргалкой не воспользоваться непосредственно на самостоятельной или контрольной работе [1].

Функциональный потенциал шпаргалки многогранен. Прежде всего, она выполняет информационную функцию, предоставляя доступ к необходимым сведениям в условиях ограниченного времени и повышенного стресса. Не менее важна психологическая функция – наличие заготовленной шпаргалки создает у ученика ощущение защищенности, снижает уровень тревожности, позволяет чувствовать себя более уверенно в стрессовой ситуации. Мнемоническая функция проявляется в том, что сам процесс создания шпаргалки способствует лучшему запоминанию материала через механизм моторной и зрительной памяти.

Рассмотрим типы шпаргалок типы шпаргалок для формул.

1. ***Мини-конспект.*** Один листок бумаги формата А4, на котором выписаны все основные формулы за четверть или конкретную тему. В данном типе шпаргалки используются: сама формула, необходимая для запоминания; обозначения величин, используемых в формуле; единицы измерения. Данная шпаргалка является наглядным примером эффективного дидактического инструмента для систематизации ключевых формул. Её структура демонстрирует осознанный подход к переработке учебной информации, выходящий за рамки простого копирования. С дидактической точки зрения, процесс создания такой шпаргалки сам по себе является мощным упражнением. Учащийся вынужден провести аналитическую работу: идентифицировать основные законы, выписать все входящие в них величины, вспомнить их определения и стандартные единицы измерения [2].

2. ***Карточки для повторения.*** Данный тип шпаргалки представляет собой маленькие бумажные или цифровые карточки, на которых с одной стороны написан закон или величина, а с обратной стороны его объяснение и формулы. С помощью данного вида шпаргалки можно активно тренироваться в любую свободную минуту. Представленный пример иллюстрирует один из наиболее эффективных с точки зрения когнитивной психологии видов учебных шпаргалок – карточки для активного повторения. В отличие от пассивного перечитывания конспекта, когда ученик лишь знакомится с информацией, процесс, при котором он видит вопрос на одной стороне карточки и активно пытается воспроизвести формулу и ее расшифровку, создает более прочные и долговременные нейронные связи.

Структура карточки, где на одной стороне представлен стимул (название закона, величины), а на другой – отклик (формула, объяснение), идеально соответствует механизму ассоциативного запоминания.

3. ***«Готовая» шпора.*** Представляет собой крошечный клочок бумаги, на котором мелким почерком выписаны только формулы без пояснений. Такая шпаргалка бесполезна для запоминания. Она создается с одной це-

лью – списать. Формулы вылетают из головы сразу после контрольной. Данный пример наглядно демонстрирует классический тип шпаргалки, который является абсолютно бесполезным с дидактической точки зрения и используется исключительно для сиюминутного академического нечестного поведения. Формулы, выписанные без контекста и пояснений, не закрепляются в долговременной памяти и, как следствие, «вылетают из головы сразу после контрольной». Более того, сам факт ее наличия провоцирует высокий уровень стресса и тревожности во время экзамена, связанный с риском быть пойманным.

Сам процесс создания шпаргалки может быть исключительно полезным с педагогической точки зрения. Речь идет, прежде всего, о классической бумажной «шпоре», которую ученик пишет от руки самостоятельно, либо о специально подготовленных преподавателем материалах, которые лежат на партах в качестве справочного пособия во время урока или контрольной работы. Рассмотрим положительные аспекты создания и использования шпаргалок.

1. Создание шпаргалки способствует систематизации знаний. Например, чтобы уместить объемную тему на небольшом клочке бумаги, учащемуся необходимо провести серьезную аналитическую работу: выделить ключевые формулы, фундаментальные законы, основные единицы измерения и важнейшие определения. Такой подход заставляет мозг не просто механически зазубривать информацию, а выстраивать логические связи между различными понятиями, что способствует более глубокому пониманию предмета [3].

2. Активация моторной памяти. Физиологический процесс письма от руки создает дополнительные нейронные связи, значительно улучшая запоминание материала. Когда ученик самостоятельно выписывает формулу, вероятность того, что он ее действительно усвоит и запомнит надолго, существенно выше, чем если бы он просто прочитал ее в учебнике или увидел на экране.

3. Психологический фактор также играет немаловажную роль. Для тревожных детей (а количество таких учащихся неуклонно растет в условиях современной информационной перегрузки, клипового мышления и раннего проникновения цифровых технологий в жизнь) сама мысль о наличии «подушки безопасности» оказывает успокаивающее действие. Осознание того, что в критический момент можно подсмотреть забытую единицу измерения или физическую константу, позволяет ученику сосредоточиться на решении самой задачи, а не тратить психические ресурсы на борьбу с паникой из-за временного провала в памяти.

4. Создание шпаргалки развивает важнейший навык краткого и емкого изложения. Искусство конспектирования и умение выделить суть из большого объема информации – это компетенция, которая будет востребована далеко за пределами учебного процесса. В профессиональной деятельности способность кратко формулировать мысли, выделять главное и отбрасывать второстепенное ценится чрезвычайно высоко. Таким образом, работа над шпаргалкой становится не просто способом подготовки к контрольной, а инвестицией в развитие фундаментальных навыков обработки информации, которые пригодятся человеку на протяжении всей жизни.

Проблема шпаргалок лежит не в плоскости дисциплинарного контроля, а в области педагогической методологии [4]. Их распространённость служит индикатором существующих трудностей в освоении материала – прежде всего, разрыва между формальным знанием формул и пониманием их физической сути. Эффективный подход заключается не в борьбе со следствием, а в преобразовании условий обучения: создании легальных, педагогически обоснованных опор (справочников, алгоритмических памяток), смещении акцента с запоминания на анализ и применение, а также в последовательном формировании у учащихся способности самостоятельно конструировать и использовать подобные структурированные сводки знаний как законную часть учебного процесса [5]. В современной педагогической практике существует парадоксальный на первый взгляд подход, когда учитель не только разрешает, но и целенаправленно обучает школьников создавать и использовать шпаргалки с формулами во время уроков решения задач. Этот методический прием, при грамотной организации, способен кардинально изменить отношение учащихся к физике как к предмету [4].

Шпаргалки по физике могут служить вспомогательным инструментом при решении задач, подготовке к лабораторным работам и повторении материала, помогая ученикам актуализировать знания и увереннее применять их на практике. На рисунке 1 представлена шпаргалка, которая поможет ученикам в процессе решения задач на сообщающиеся сосуды. Такой компактный формат представления информации помогает мгновенно восстановить в памяти алгоритм решения данного типа задач.

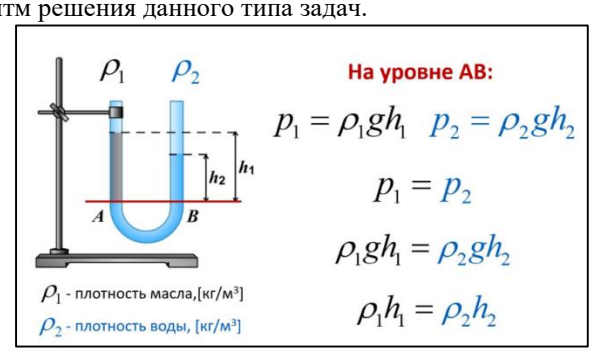


Рисунок 1 – Шпаргалка по теме «Сообщающиеся сосуды

Данная шпаргалка демонстрирует пошаговое решение задач. Вместо того чтобы просто дать готовую формулу, она проводит ученика по логической цепочке: от основного условия равновесия (равенство давлений на одном уровне) через формулу гидростатического давления к итоговому, компактному соотношению. Шпаргалка эффективно устраняет типовую ошибку, напоминая, что в данном случае высоты столбов обратно пропорциональны плотностям жидкостей, и сразу приводит расшифровку обозначений, что позволяет мгновенно приступить к подстановке в конкретной задаче.

В процессе решения задач использование шпаргалок приобретает особый характер. Учитель может разрешить обращаться к заготовленным памяткам в течение ограниченного времени, например, в первые 15–20 минут урока, когда происходит актуализация знаний и повторение необходимых формул. Такой подход позволяет снять психологическое напряжение у слабоуспевающих учеников и дает им возможность включиться в работу наравне с более подготовленными одноклассниками. При этом важно организовать деятельность таким образом, чтобы ученики не просто механически переписывали формулы из шпаргалки, а осознанно выбирали нужные соотношения для решения конкретной задачи. Опыт показывает, что систематическое использование шпаргалок в контролируемых условиях приводит к тому, что необходимость в них постепенно отпадает. Многократно обращаясь к одним и тем же формулам при решении различных задач, ученики непроизвольно запоминают их, причем это запоминание носит осмысленный характер. Формулы перестают быть для школьников абстрактными символами, а становятся инструментом для познания физических явлений [6].

Таким образом, использование шпаргалок учащимися представляет собой сложный и неоднозначный педагогический феномен, сочетающий в себе элементы вынужденной стратегии и потенциального инструмента обучения. С одной стороны, шпаргалки выполняют роль своеобразной «дидактической страховки», позволяя снизить когнитивную нагрузку и эмоциональное напряжение при работе с абстрактными понятиями и большим объёмом формул [4]. Процесс их самостоятельного составления заставляет учащихся проводить селекцию материала, выделять ключевые элементы (формулы, определения, константы) и структурировать информацию, что способствует первичному осмыслению и систематизации знаний. В этом аспекте шпаргалка выступает не просто средством для списывания, а продуктом аналитической работы, своеобразной личной опорной схемой, отражающей индивидуальный способ организации учебного содержания.

С другой стороны, обращение к шпаргалкам таит в себе существенные риски для образовательного процесса. Наиболее серьёзным из них является подмена глубокого концептуального понимания механическим воспроизведением информации. Ученик, имеющий доступ к готовому решению, может утратить мотивацию к самостоятельному анализу задачи, поиску причинно-следственных связей и выведению закономерностей. Это ведёт к формированию фрагментарного, поверхностного знания, лишённого гибкости и применимости в нестандартных ситуациях. Шпаргалка из вспомогательного инструмента может трансформироваться в фактор, консервирующий интеллектуальную пассивность и создающий иллюзию усвоения материала, что в конечном итоге усугубляет пробелы в фундаментальном понимании предмета.

Список литературы

1. Талызина, Н. Ф. Управление процессом усвоения знаний / Н. Ф. Талызина. – М. : Изд-во МГУ, 1984. – 344 с.

2. Хекхаузен, Х. Мотивация и деятельность : в 2-х т. Т. 1 / Х. Хекхаузен ; пер. с нем. – М. : Педагогика, 1986. – 408 с.

3. Чошанов, М. А. Гибкая технология проблемно-модульного обучения : метод. пособие / М.А. Чошанов. – М. : Народное образование, 1996. – 160 с.

4. Кульбицкий, Д. И. Методика обучения физике в средней школе : учеб. пособие для студ. учреждений, обеспечивающих получение высшего педагогического образования по физическим специальностям / Д. И. Кульбицкий. – Минск : ИВЦ Минфина, 2007. – 220 с.

5. Харазян, О. Г. Методы педагогических исследований : метод. рек. для студ. спец. «Физика (науч.-пед. деятельность)» / О. Г. Харазян. – Гродно : ГрГУ, 2015. – 62 с.

6. Наумчик, В. Н. Педагогический словарь / В. Н. Наумчик, М. А. Паздников, О. В. Ступакевич. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2006. – 280 с.

The article reveals the concept of a cheat sheet as a didactic tool, examines its main functions and types. The psychological and pedagogical aspects of creating and using cheat sheets in the process of studying physics are described. Using the example, the advantages of using structured reference materials for systematizing knowledge and forming algorithmic thinking in students when solving physics problems are shown.

Доста Никита Максимович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nikitadosta271205@gmail.com.

Научный руководитель – *Харазян Оксана Гагиковна*, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, kharazian.og@gmail.com.

УДК 37.016:53

Е. П. ИВАНИСТОВА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕРАТИВНОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВИДЕОМАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ФИЗИКЕ

Рассматривается возможность применения генеративных нейросетей для создания учебного видеоконтента на уроках физики. Описаны дидактические преимущества визуализации абстрактных процессов. На примере создания видео, демонстрирующего движение математического маятника, показан алгоритм работы с искусственным интеллектом (промптинг, генерация, анализ).

Современный этап развития образования характеризуется активной цифровой трансформацией. В условиях снижения интереса к точным наукам и дефицита лабораторного оборудования перед учителем физики встает задача поиска доступных, но эффективных инструментов визуализации. Физика – наука экспериментальная, однако далеко не все явления можно демонстрировать в школьных условиях (например, идеальные колебания без трения, движение в невесомости или процессы в электромагнитном поле). В связи с этим особую актуальность приобретает использование генеративного искусственного интеллекта (ИИ), позволяющего создавать высококачественные видеоролики с точным соблюдением физических законов на основе текстового описания.[1]

Одной из ключевых проблем при изучении физики является недостаточная сформированность абстрактно-логического мышления у школьников. Учащимся сложно представить процессы, скрытые от непосредственного наблюдения. Статичные изображения в учебниках или схематичные рисунки на доске не всегда способны передать динамику процесса. Видеоматериалы, созданные с помощью нейросетей, позволяют не только визуализировать явление, но и управлять его параметрами, делая невидимое – видимым [2].

Психолого-педагогические исследования подтверждают, что наглядность является одним из ведущих дидактических принципов. Использование видео, сгенерированного искусственным интеллектом, опирается на ряд когнитивных механизмов, усиливающих мотивацию и глубину понимания материала. Основными преимуществами, которые может предоставляет искусственный интеллект при работе с физикой могут выступать:

Визуализация абстракции. Уравнение колебаний $x = A\cos(\omega t + \varphi_0)$ само по себе сложно для восприятия. Видео, где шарик движется строго по этому закону, а на фоне синхронно строится график, создает прочную ассоциативную связь между формулой и реальным движением.

Управление временем и пространством. ИИ позволяет «сжимать» время (показывать затухание колебаний за минуту) или «растягивать» его (замедлять движение в нижней точке траектории для анализа сил). Также возможно моделирование идеальных условий (отсутствие трения), что невозможно показать в реальном классе.

Принцип «от простого к сложному». С помощью ИИ учитель может создать серию видеороликов, поэтапно усложняя модель: идеальный маятник → маятник с затуханием → вынужденные колебания → резонанс. Это позволяет выстроить логичный нарратив урока.

Эмоциональный отклик. Качественная анимация, яркие цвета и плавность движений вызывают у школьников положительные эмоции, что способствует непроизвольному запоминанию материала.

Развитие исследовательских навыков. Видео, сгенерированное ИИ, можно использовать как виртуальную лабораторию: изменяя длину нити или массу в промпте, ученики могут наблюдать за изменением периода и проверять справедливость формулы Гюйгенса $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

Однако важно понимать, что использование ИИ-видео требует методически грамотного включения в структуру урока. Простой показ ролика без постановки проблемы и последующего анализа не даст должного эффекта. Учитель должен организовать работу так, чтобы сгенерированное видео стало объектом исследования, а не просто иллюстрацией.

В рамках данного исследования была поставлена задача: с помощью нейросети создать видеоролик, демонстрирующий движение математического маятника, и разработать методику работы с ним на уроке.

Пример реализации: Создание видео «Математический маятник»

Постановка задачи и составление промпта. Для генерации видео необходимо составить максимально точное описание на естественном языке. Промпт должен включать: физическую модель, параметры движения, визуальные элементы и стиль. Дополнительно мы предоставили фотографию, которую заранее подготовили для данного промпта.

Пример промпта: *«Сгенерируй видео высокого качества в научном стиле. На видео изображен идеальный математический маятник – небольшой металлический шарик серебристого цвета, подвешенный на тонкой невесомой нити. Используй предоставленную фотографию в качестве основы для генерации. Шарик колеблет-*

ся в одной плоскости без затухания». В итоге данного промпта мы получили видео, которое можно использовать для демонстрации движения маятника на уроке физики при изучении колебательного движения.

Генерация и анализ. Нейросеть обрабатывает запрос и выдает видеоряд. Важно проверить полученный результат на соответствие физическим законам. Современные модели достаточно хорошо понимают классическую механику, однако учитель обязан выступить экспертом, верифицирующим ролик.

Интеграция в урок. Готовое видео используется на этапе изучения нового материала. *Проблемная ситуация:* Учитель демонстрирует начало видео без звука и подписей и задает вопрос: «Как вы думаете, что произойдет с периодом колебаний, если мы укоротим нить?». После обсуждения гипотез включается вторая часть видео, где ИИ смоделировал маятник с нитью в 4 раза короче. Ученики *видят* ответ. *Аналитическая работа:* Используя стоп-кадры в точках максимального отклонения и в положении равновесия, учащиеся под руководством учителя анализируют направление векторов скорости и ускорения, отвечая на вопрос: «Почему в нижней точке скорость максимальна, а ускорение равно нулю?». *Связь с математикой:* параллельно с движением шарика на видео строится график x(t). Учитель обращает внимание на то, что проекция скорости – это производная, и показывает, как крутизна графика связана со значением скорости.

Творческое задание. В качестве домашнего задания или проектной работы учащимся предлагается самостоятельно (под руководством учителя) составить промпт для генерации видео физического процесса, который они изучают (например, «затухающие колебания пружинного маятника в вязкой среде»). Это стимулирует не просто запоминание, а глубокое понимание физической сущности процесса, так как для правильного описания в промпте нужно знать ключевые параметры явления.

Таким образом, создание видеоматериалов с помощью генеративного искусственного интеллекта открывает новые горизонты в преподавании физики. Это не просто экономия времени учителя на поиск наглядных пособий, но и принципиально иной уровень взаимодействия с учебным контентом. Учитель перестает быть просто транслятором знаний, превращаясь в режиссера образовательного процесса, способного создавать точные, динамичные и увлекательные визуальные образы, максимально соответствующие учебным целям. Методически грамотное использование таких видеороликов способствует формированию у школьников научного мировоззрения, развитию пространственного и критического мышления, а также устойчивого познавательного интереса к физике.

Список литературы

1. Беркинблит, М. Б. Нейронные сети / М. Б. Беркинблит. – М. : МИРОС и ВЗМШ РАО, 1993. – 96 с.
2. URL: https://pedobrazovanie.ru/images/5-2024/5-2024-141-158.pdf.

The article discusses the possibilities of using generative neural networks to create educational video content in physics lessons. Didactic advantages of visualizing abstract processes are described. Using the example of creating a video demonstrating the movement of a simple pendulum, the algorithm for working with artificial intelligence (prompting, generation, analysis) is shown, and the effectiveness of this approach for developing engineering thinking and increasing the visibility of learning is substantiated.

Иванистова Евгения Павловна, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, zhenyaiv_00@mail.ru.

Научный руководитель – *Стрекаль Наталья Дмитриевна*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

УДК 37.016:53

В. Д. МЕЛЕШКЕВИЧ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ TELEGRAM-КАНАЛА В ОБУЧЕНИИ ФИЗИКЕ: МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Раскрыта важность процесса формирования физических понятий при обучении школьников. В качестве эффективного средства формирования понятий рассмотрен Telegram-канал по физике. Описаны ключевые принципы организации канала, а также предложена классификация постов на данном канале.

Динамичное развитие цифровых технологий и их внедрение в образовательную среду открывает новые возможности для дополнения и обогащения проверенных временем традиционных методик обучения. Классические методы преподавания, основанные на систематическом изложении теории, демонстрационном эксперименте и решении задач, закладывают крепкий фундамент знаний. Однако современные реалии, характеризующиеся изменением информационных потоков и каналов коммуникации, позволяют ставить вопрос о поиске

дополнительных, гибких инструментов, способных работать в унисон с базовым учебным процессом и усиливать его результативность.

Одна из ключевых задач учителя физики – формирование у учеников физических понятий. Понятия служат фундаментом для всей системы научных знаний. Качество их усвоения в школе напрямую влияет не только на эффективность обучения, но и на общее интеллектуальное развитие учащихся. Будучи центральным элементом научных знаний, понятия играют ведущую роль как в науке, так и в учебном процессе.

Формирование понятий – это сложный и длительный путь, в ходе которого ученики постепенно и все полнее постигают их смысл. Как и в научном познании, учебные понятия не остаются неизменными: они обогащаются, углубляются и вступают во все новые связи с другими понятиями. Процесс формирования понятий лежит в основе развития у школьников абстрактного и логического мышления. То, насколько хорошо ученики овладели понятиями, показывает не только уровень их знаний, но и является основой для дальнейшего успешного изучения предмета. Источники формирования понятий у учащихся разнообразны. К ним относятся: 1) жизненный опыт, повседневные наблюдения и сложившиеся на их основе представления; 2) целенаправленное обучение под руководством учителя в ходе изучения школьного курса; 3) знания, полученные попутно при изучении других учебных дисциплин; 4) стихийное формирование через чтение научно-популярной литературы, просмотр фильмов, телепередач и взаимодействие с другими источниками информации.

Важно отметить, что не существует единого шаблона для формирования всех понятий. Выбор метода и последовательности этапов зависит от специфики самого понятия, от уровня подготовки учащихся и их предшествующего опыта.

Для того чтобы сформировать у учащихся первоначальное представление о физическом понятии, на уроках физики применяются такие методы, как демонстрация физических явлений, в которых это понятие проявляется, организация фронтальных лабораторных опытов, его иллюстрирующих, а также разбор примеров из повседневной жизни, раскрывающих смысл изучаемого понятия. Следующим шагом является этап определения физического понятия, где учитель, в зависимости от его специфики, либо дает готовую словесную формулировку, либо раскрывает его физический смысл, либо описывает соответствующую математическую модель. После этого осуществляется построение математической конструкции понятия, что подразумевает запись его модели в символьной форме и изучение связанных с ним единиц измерения.

Для повышения эффективности усвоения понятий крайне полезно демонстрировать процесс их становления, рассматривать историю развития и показывать технические применения. Важную роль играет также выявление внутрипредметных и межпредметных связей. Использование внутрипредметных связей позволяет углублять и обогащать содержание понятия, опираясь на уже изученный материал в рамках курса физики, в то время как межпредметные связи способствуют интеграции знаний из других научных дисциплин, что положительно сказывается на расширении кругозора учащихся.

Практическое применение изучаемого понятия дает школьникам возможность использовать полученные знания в реальной деятельности: при решении как качественных, так и количественных физических задач, в процессе выполнения фронтальных лабораторных работ и экспериментов, которые наглядно иллюстрируют явления, связанные с данным понятием. Для более полного и глубокого понимания физической сущности понятия необходимо обязательно очертить границы его применимости.

Было проведено анкетирование на предмет выявления отношения учащихся к использованию Telegram канала в процессе изучения физике и возможному его содержательному наполнению. Анкета состояла из разделов, посвященных изучению медиапотребления школьников, их готовности к использованию Telegram в образовательной среде и выявлением трудностей и потребностей учащихся при работе с школьным курсом физики. Было опрошено 102 человека. Результаты анкетирования показали следующее.

1. 90 % респондентов пользуются Telegram (92 человека из 102).

2. 15 % респондентов подписаны на образовательные каналы, 2 % подписаны на новостные каналы и 60 % подписаны на развлекательный контент. 32 % не подписаны на Telegram каналы.

3. 67 % от пользующихся Telegram учеников подписались бы на канал, посвященный школьному курсу физики.

4. У 45 % возникли проблемы с непониманием формул и законов, 60 % проголосовали за сложности с решением задач, 20 % – недовольны скучной подачей материала в учебнике, 15 % учащихся не хватает времени на уроке что бы разобраться с учебным материалом. И только 9 % ответили, что не испытывают проблем с изучением физики.

5. 70 % респондентов желали бы видеть в Telegram канале краткие конспекты, 59 %-проголосовали за опыты и эксперименты, 64 % за объяснение сложных тем, 40 % за разбор формул и 27 % за интерактивные форматы (опросы и головоломки).

Таким образом, Telegram-канал по физике может стать эффективным средством для формирования у учащихся физических понятий. Он может реализовать такие дидактические принципы, как наглядность и доступность в изложении учебного материала. Рассмотрим ***ключевые принципы организации канала.***

Принцип синхронизации со школьной программой. Канал строго соотносится с тематическим планированием курса физики. Это позволяет ученику использовать канал как электронное пособие, которое предоставляет дополнительные объяснения, визуализации и примеры в тот момент, когда данная тема изучается на уроке. Такой подход превращает канал из разрозненного источника информации в системного помощника.

Принцип дополнения и визуализации. Канал не повторяет учебник, а дополняет его, делая акцент на те аспекты, которые сложно передать текстом: динамику процессов, изменение величин во времени и т.д. Каждое ключевое определение или закон подкрепляется качественной иллюстрацией.

Принцип доступности и вовлеченности. Язык изложения адаптирован для школьной аудитории: сложные определения «очеловечиваются» через аналогии и примеры из повседневной жизни. Контент строится по принципу небольших, законченных порций информации, которые легко усвоить за 2–3 минуты. Это соответствует принципам медиапотребления современной молодежи и повышает вероятность регулярного взаимодействия с каналом.

Принцип интерактивности и практики. Канал не ограничивается односторонней подачей информации, а активно вовлекает аудиторию в работу. Посты-задания, опросы и возможность задать вопрос в комментариях создают среду для активной работы с материалом. Это способствует формированию учебного сообщества и обеспечивает оперативную обратную связь.

Рассмотрим посты, которые могут наполнять Telegram канал.

1. Пост-понятие. Этот пост служит отправной точкой для изучения темы. Он предоставляет ясное, сжатое и визуально подкрепленное определение нового физического понятия.

2. Пост, объединяющий несколько взаимосвязанных понятий. Данный пост призван показать новое понятие не изолированно, а в системе ранее изученных величин и законов. Это формирует у учащихся целостную картину раздела и демонстрирует логику физической науки.

3. Пост-пример иллюстрирует понятия на реальном явлении. Пост помогает преодолеть абстрактность теории, показав проявление физического закона в знакомой жизненной ситуации, технике или природе. Этот пост отвечает на вопрос «Где я это видел?» и доказывает практическую значимость изучаемого материала.

4. Пост-факт. Пост отражает историческую справку или интересный научный факт. Пост должен расширить контекст, повысить мотивацию и вовлеченность через демонстрацию истории развития идеи, неочевидных следствий или современных технологий, основанных на изучаемом принципе. Этот пост работает на создание «вау-эффекта» и формирование научного кругозора.

5. Пост-задание. Пост содержит практическое задание для закрепления изученного материала. Он позволит активизировать познавательную деятельность учащихся, перенести знания в практическую плоскость решения задач. Формирует навык применения формул и физических принципов для анализа конкретных ситуаций.

6. Пост, объединяющий несколько физических понятий. Основная задача поста – это сравнить и разграничить взаимосвязанные физические понятия. Целью является помощь избежать частой путаницы между понятиями, наглядно продемонстрировав их отличие. Важным аспектами поста можно назвать сравнительный подход.

Физика, как базовая наука, требует особого подхода – не монотонного заучивания формул, а живого осмысления законов. Для поколений «зуммеров» и «альфа», выросших в эпоху сети, оперативность, визуализация и интерактивность считаются не прихотью, а естественным языком общения. Вот почему создание целевого Telegram-канала по физике становится весомым ответом на современные вызовы. Такой канал – это не просто дополнение к учебнику, а целая образовательная среда, выстроенная вокруг учащегося.

This article explores the importance of developing physics concepts in school education. A physics Telegram channel is considered as an effective means of developing concepts. Key principles of the channel's organization are described and a classification of posts within the channel is proposed.

Мелешкевич Владислав Дмитриевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, Meleshkevich_VD_22@student.grsu.by.

Научный руководитель – *Харазян Оксана Гагиковна*, кандидат педагогических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, xarazyn_og@grsu.by.

УДК 37.016:53

М. Д. МИЦКЕВИЧ

ЗАДАЧА КОМПЛЕКСНОГО ХАРАКТЕРА НА ДВИЖЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ ПО ОКРУЖНОСТИ

Рассматривается роль решения физических задач в формировании научного мышления и практических навыков учащихся. Особое внимание уделяется применению комплексных задач как эффективного методического приема при подготовке к контрольным работам. Автор приводит классификацию задач, анализирует трудности, возникающие у

школьников, и демонстрирует преимущества использования интегративных заданий на примере темы «Движение по окружности».

Физика как учебный предмет формирует у учащихся научное мышление и умение применять знания на практике через решение задач. В современной дидактике учебная задача по физике рассматривается как модель проблемной ситуации, решение которой требует от учащихся активного применения физических законов, теорий и методов исследования для достижения конкретного результата. Физические задачи являются важным средством обучения, позволяющим формировать у школьников научное мышление и практические навыки. Классификация физических задач отличается многоаспектностью и может проводиться по различным основаниям. По дидактической цели выделяются тренировочные, познавательные, творческие и контрольные задачи. По содержательному признаку различают качественные, количественные и экспериментальные задачи. По уровню сложности задачи подразделяются на простые, составные и комплексные, а по методу решения – на алгоритмические и эвристические.

Решение физических задач на уроках играет многогранную роль в образовательном процессе, выполняя четыре основные функции. В аспекте обучения решение задач углубляет понимание теории, превращая её в практические навыки применения физических законов через разнообразные упражнения. Развивающая функция проявляется в стимулировании логического мышления, пространственного воображения, умения анализировать условия, объединять знания из разных областей и строить логичные рассуждения [1]. Решение задач обеспечивает объективный контроль уровня знаний и умений учеников, позволяя учителю вовремя корректировать процесс обучения.

При обучении решению задач можно столкнуться с рядом трудностей. Одна из основных трудностей связана с поверхностным знанием теории, когда ученики заучивают формулы, не понимая сути физических явлений, что приводит к формальному применению формул. Серьёзной проблемой является сложность в моделировании физической ситуации. Ученики часто не могут выделить физическую модель, лежащую в основе задачи, и определить, какие законы к ней применимы. Значительные трудности возникают из-за недостаточных математических навыков, когда ученики испытывают проблемы с преобразованием формул, работой с единицами измерения и решением уравнений. Кроме того, наблюдается отсутствие системного подхода, при котором ученики не видят взаимосвязи между разными темами физики и не могут использовать комплексные знания для решения сложных задач [2; 3].

Физические задачи выступают средством для проверки уровня усвоения учебного материала и составляют основу контрольных работ. Подготовка к контрольным работам по физике часто затруднена из-за фрагментарности знаний учащихся и стресса. Особую роль в преодолении этих трудностей играют комплексные задачи, требующие интеграции знаний в рамках одной темы и моделирующие условия реальной проверки. Комплексная задача представляет собой специально сконструированное учебное задание, которое охватывает ключевые понятия, связи и методы решения в рамках одной темы, требует их комбинированного применения. Использование таких задач на этапе подготовки к контрольной работе является эффективным методическим приемом.

Рассмотрим пример комплексной задачи по теме: «Движение по окружности материальной точки».

Условие задачи. Материальная точка движется с постоянной скоростью по окружности радиусом 0,15 м. Четверть оборота материальная точка совершает за 10 секунд.

Требования к задаче и ее решение представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Требования и решение задачи

Требования задачи	Решение задачи
1. Определить период вращения материальной точки.	$\mathrm{T} = 4 \cdot 10\ \text{с} = 40\ \text{с}$
2. Определить частоту вращения материальной точки.	$\nu = 1/\mathrm{T};\ \nu = 1/40 = 0{,}025\ \text{с}^{-1}$
3. Определить перемещение материальной точки за: а) 10 с, б) 20 с.	а) $r = \sqrt{R^2 + R^2} = 0{,}283$ м, б) $r = 2 \cdot R = 0{,}4$ м
4. Определить путь, пройденный материальной точкой за: а) 10 с, б) 20 с.	а) $S = 2\pi R/4 = 0{,}314$ м б) $\mathrm{S} = 2\pi R/2 = 0{,}628$ м
5. Определить угловое перемещение материальной точки за: а) 10 с, б) 20 с.	а) $\varphi = \pi/2$ рад, б) $\varphi = \pi$ рад
6. Определить линейную скорость материальной точки.	$\upsilon = \frac{2\pi R}{\mathrm{T}},\ \upsilon = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}2/40 = 0{,}0314$ м/с
7. Определить изменение скорости за: а) 10 с, б) 20 с.	а) $\Delta\upsilon = \sqrt{\upsilon^2 + \upsilon^2} = 0{,}0444$ м/с б) $\Delta\upsilon = 2\upsilon = 2 \cdot 0{,}0314 = 0{,}0628$м/с
8. Определить угловую скорость материальной точки.	$\omega = \frac{2\pi}{\mathrm{T}},\ \omega = 2 \cdot \frac{3{,}14}{40} = 0{,}157$ рад/с
9. Определить центростремительное ускорение материальной точки.	$\mathrm{a_ц} = \frac{\upsilon^2}{R},\ \mathrm{a_ц} = \frac{0{,}0314^2}{0{,}2} = 0{,}00493$ м^2/с

Описанная задача включает 9 требований, выполнение которых позволяет вспомнить основные понятия и формулы рассмотренной темы.

Рассмотрим преимущества использования комплексных задач в процессе обучения физике.

1. Комплексные задачи обеспечивают интеграцию знаний, объединяя несколько вопросов и помогая ученику увидеть тему как целостную систему.

2. Комплексные задачи развивают такие умения, как анализ условия, выбор стратегии, последовательное применение алгоритмов и самоконтроль.

3. Служат инструментом диагностики глубины понимания, выявляя не только знание формул, но и понимание их сути и взаимосвязей.

4. Повышают мотивацию и снижают тревожность, создавая ситуацию успеха и уверенности перед контрольной работой.

5. Экономят учебное время, заменяя несколько однотипных задач одной задачей.

6. Решение комплексной задачи позволяет применить все формулы одной темы.

Рассмотрим ограничения в использовании комплексных задач в процессе обучения физике.

1. Разбор одной задачи, в зависимости от количества требований в ее условии, может занимать от 15 до 40 минут.

2. Если требования задачи взаимозависимые, то ошибка при выполнении одного из требований, может привести к неправильным дальнейшим расчетам.

3. Возникает сложность объективной оценки индивидуального вклада каждого учащегося при групповой работе.

Урок по физике с использованием комплексной задачи может быть организован различными способами. Можно организовать работу учеников в группе. Каждая группа должна решить свою комплексную задачу и представить полученные результаты классу. Работу класса можно организовать в форме фронтальной работы. При таком подходе можно вызывать по одному ученику к доске для выполнения одного из требований задачи. Такой подход позволяет не только детально проанализировать решение задачи, но и оперативно оценить понимание учебного материала у нескольких учеников, вовлекая весь класс в активное обсуждение задачи. В результате решения комплексной задачи ученики не только повторяют материал, но и учатся структурировано излагать ход мысли. Таким образом, решение комплексной задачи требует от ученика целостного анализа ситуации и применения широкого набора формул.

Список литературы

1. Мякишев, Г. Я. Физика. 10 класс : учеб. / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н. Н. Сотский. – М. : Просвещение, 2020. – 420 с.

2. Орлов, В. А. Методы решения физических задач : пособие для учителя / В. А. Орлов, Ю. А. Сауров. – М. : Академия, 2017. – 256 с.

3. Тульчинский, М. Е. Качественные задачи по физике / М. Е. Тульчинский. – М. : Просвещение, 2018. – 240 с.

The article examines the role of solving physics problems in developing students' scientific thinking and practical skills. Special attention is given to the use of complex tasks as an effective methodological tool in preparing for tests. The author provides a classification of problems, analyzes the difficulties students face, and demonstrates the advantages of using integrative tasks on the example of the topic «Circular Motion of a Material Point.»

Мицкевич Максим Дмитриевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, maksmickevic@gmail.com.

Научный руководитель – *Харазян Оксана Гагиковна*, кандидат педагогических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, xarazyn_og@grsu.by.

УДК 53.072

К. А. СЕМЧУК, А. Л. ЗАВАДСКАЯ

КОНЦЕПЦИЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ ОБУЧАЮЩЕЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ ПО ФИЗИКЕ

Рассматриваются концептульные подходы к созданию обучающей компьютерной программы по физике, интегрирующей теоретический материал, интерактивные задачи и компьютерное моделирование. Проведен анализ структуры программы, включающей лекционный блок с динамическими иллюстрациями, практический тренинг с автоматической генерацией заданий и визуализацию физических процессов. Особое внимание уделено выбору форматов представленния учебных материалов (PDF, MHT) и технологий их отображения в среде разработки C# (Windows Forms). Рассмотрены библиотеки

для работы с PDF-документами, элементы управления WebBrowser и WebView2, а также методы конвертации страниц в растровые изображения. Предложенная архитектура интерфейса и алгоритмы визуализации могут быть использованы для создания масштабируемых образовательных решений по различным разделам физики. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением библиотеки моделей и внедрением элементов адаптивного обучения.

Современное образование в области физики требует не только передачи теоретических знаний, но и формирования у студентов навыков экспериментальной и исследовательской работы. Традиционные методы обучения зачастую ограничены возможностями лабораторной базы или сложностью демонстрации абстрактных явлений. В этом контексте компьютерное моделирование и интерактивные обучающие программы становятся эффективным инструментом, позволяющим визуалищировать физические процессы, проводить вычислительные эксперименты и организовывать тренинг с мгновенной обратной связью [1; 2].

Применение таких технологий, как численные методы решения дифференциальных уравнений, методы Монте-Карло и современные средства разработки графических интерфейсов (например, C# и Windows Forms), открывает новые возможности для создания образовательного контента. Работы в области геймификации и интерактивного обучения [3; 4] подтверждают, что включение игровых элементов и визуализации повышает мотивацию студентов и глубину усвоения материала. Например, модель хаотизации движения молекул позволяет наблюдать переход от регулярного движения к хаотическому в результате столкновений, а также демонстрировать понятие энергетической температуры. Модель движения тела, брошенного под углом к горизонту, с учётом сопротивления среды, решает классическую проблему Аристотеля – Галилея и показывает зависимость траектории от сложной нелинейной силы сопротивления [1]. Динамическая иллюстрация траектории электрона в магнитном поле, позволяет связать формальные расчёты с физической картинкой явления и визуализировать этот процесс рисунок 1.

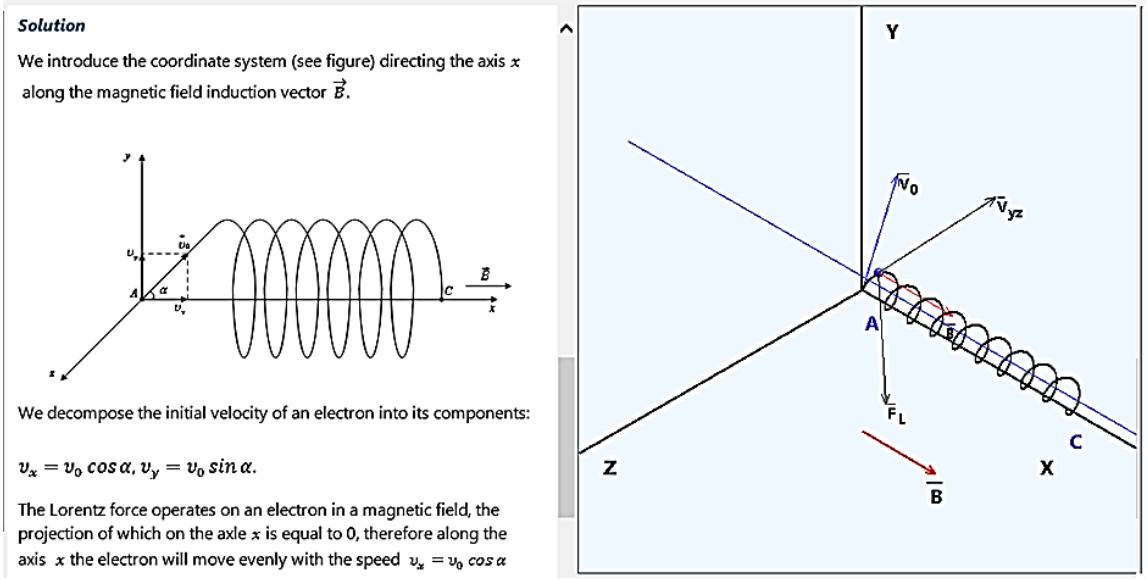


Рисунок 1 – Визуализация физическоо процесса движения электрона в магнитном поле

В данной статье на простой модели представлена концепция построения обучающей программы по физике, а также рассмотрены программные аспекты её реализации, включая выбор форматов учебных материалов и методов их отображения в приложении. Обучение физике требует комплексного подхода, сочетающего теорию, практику и визуализацию. В связи с этим разработанная конепия обучающей прорамы включает три основных модуля, представленных на рисунке 2. Левое поле (модуль 1) содержит теоретические материалы, формулы, алгоритмы и примеры. По возможности этот материал содержит всю необходимую информацию для изучения модели.

Центральное поле (модуль 2) обеспечивает ввод и вывод исходных данных. Практический модуль реализован в виде интерактивного тренажера. Исходные данные генерируются автоматически случайным образом, а поля для ввода результатов подсвечиваются в зависимости от правильности ответа.

Правое поле (модуль 3) обеспечивает динамическую иллюстрацию процесса

Концепция построения рассмотрена на простом примере компьютерного моделирования движения искусственного спутника Земли по круговой орбите. Математическая модель основана на законе всемирного тяготения и втором законе Ньютона. Из равенства гравитационной силы и центробежной силы инерции выводится формула для расчёта первой космической скорости:

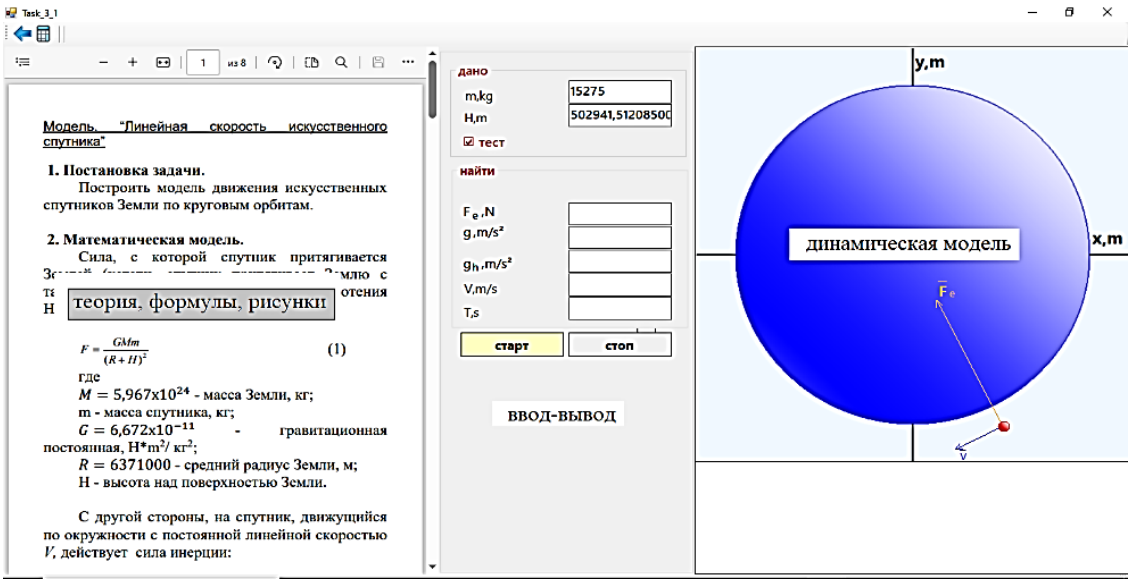


Рисунок 2 – Интерфейс обучающей программы

$$V = \sqrt{\frac{MG}{R+H}}$$

где M – масса Земли, G – гравитационная постоянная, R – радиус Земли, H – высота орбиты. Закон движения спутника задаётся в параметрическом виде:

$$x = (R + H)\cos(\phi),$$

$$y = (R + H)\sin(\phi).$$

Визуализация движения (рисунок 2) позволяет наблюдать зависимость скорости и периода обращения от высоты орбиты, а также включает режим тестирования, где студент должен самостоятельно ввести расчётные параметры.

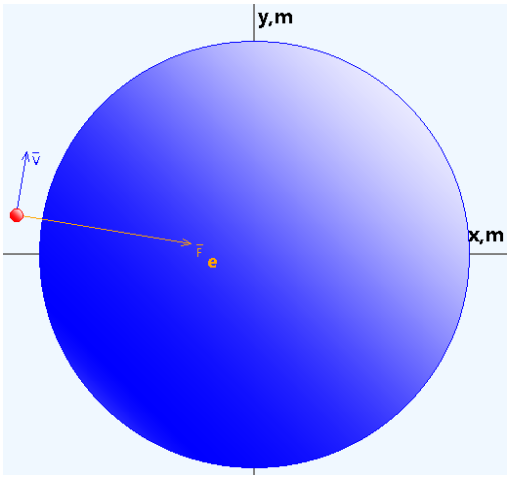


Рисунок 2 – Визуализация движения искусственного спутника Земли по круговой орбите

Одной из ключевых задач при разработке обучающих приложений является выбор формата представления текстово-графической информации (теория, формула, примеры решений). В работе рассмотрены два формата: PDF и MHT. Проведём анализ их структуры, интерактивности, качества печати и поддержки мультимедиа (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ форматов PDF и MHT

Характеристика	MHT	PDF
Структура	MIME, веб-ориентированная	PostScript, документщ-ориентированная
Интерактивность	Поддерживает JavaScript и формы	Ограниченная
Качество печати	Зависит от браузера	Оптимизировано
Поддержака мультимедиа	Встроенная	Требуются плагины

Для отображения этих форматов в приложении на C# (Windows Forms) рассмотрены различные элементы управления и библиотеки. Элемент WebBrowser (на базе Internet Explorer) может отображать MHT-файлы без внешних зависимостей, однако имеет устаревший движок. WebView2 (на базе Microsoft Edge) обеспечивает лучшую совместимость, но требует установки среды выполнения. Для работы с PDF-файлами проанализированы библиотеки iTextSharp (позволяет конвертировать страницы в изображения для вывода в PictureBox), PDFium.Net (мощная, но платная) и элемент AxAcroPDF (требует Adobe Reader и не позволяет скрыть панель инструментов). Наиболее технологичным для данной задачи оказалось преобразование страниц PDF в растровые изображения с последующим выводом в PictureBox, что обеспечивает полный контроль над отображением без внешних зависимостей.

Разработанная концепция обучающей программы демонстрирует эффективность интеграции теории, интерактивного тренинга и компьютерного моделирования. Применение численных методов и визуализации позволяет студентам глубже понять физическую сущность явлений, а возможность варьирования параметров – проводить самостоятельные мини-исследования. Рассмотренная концепция структуры и реализации обучающих компьютерных программ, может быть использована для разработки приложений из других разделов физики. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением библиотеки компьютерных моделей,

Список литературы

1. Никитин, А. В. Компьютерное моделирование физических процессов / А. В. Никитин, А. И. Слободянюк, М. Л. Шишаков. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2013. – 679 с.

2. Зейликович, И. С. Применение активных демонстраций в курсе общей физики в высшей школе / И. С. Зейликович, А. В. Никитин, Н. В. Матецкий, В. Н. Хильманович // Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании : материалы IV Междунар. науч. конф. (Красноярск, 6–9 окт. 2020 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / под общ. ред. М. В. Носкова. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2020. – С. 134–138.

3. Бижевская, С. Х. Геймификация образования: проблемы использования и перспективы развития / С. Х. Бижевская, Ф. А.-А. Урусова // Мир науки. Педагогика и психология. – 2020. – № 4. – С. 67.

4. Климкович, Е. В. Развитие геймификации образования в процессе реализации программ высшего и дополнительного образования / Е. В. Климкович // Современное педагогическое образование. – 2021. – № 8. – С. 78.

This article explores the concept of a physics training program that combines theory, interactive tasks, and computer simulation. The program's structure, including dynamic illustrations and a simulator, is described. Using a satellite motion model as an example, the visualization of a physical process in a single interface is demonstrated. Keywords: physics, computer simulation, visualization, interactive learning.

Семчук Карина Андреевна, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, semchuk-karina@mail.ru.

Завадская Алена Геннадьевна, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, zavaal@bk.ru.

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nik@grsu.by.

УДК 004.42

Е. В. СОБОЛЕВСКАЯ, А. Л. СИТКЕВИЧ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ ТРАЕКТОРИЙ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОСЕРВИСНОЙ АРХИТЕКТУРЫ

Рассматривается проблема индивидуализации учебного процесса при изучении школьного курса физики в условиях цифровизации образования. Для решения этой методической задачи предлагается концепция модернизации геймифицированного приложения PhysicsQuest, реализованного в формате Telegram Mini App. На базе существующей микросервисной архитектуры с использованием современного технологического стека (React, FastAPI, PostgreSQL) разработан подход к построению адаптивных образовательных траекторий. Предложенный алгоритм анализирует ответы учащегося в реальном времени и автоматически подстраивает сложность контента, повышая общую эффективность обучения.

Современный этап цифровизации образования требует перехода от статичных электронных пособий к интерактивным адаптивным средам [1, с. 45]. Ранее нами было разработано образовательное приложение PhysicsQuest в формате Telegram Mini App, предназначенное для интерактивного изучения физики учащимися [2, с. 12]. В основе продукта лежит микросервисная архитектура, использующая современный технологический стек: React для клиентской части, FastAPI для серверной логики и PostgreSQL для надежного хранения данных [3, с. 84]. Текущая реализация успешно функционирует как интерактивный инструмент для самостоятельной работы, обеспечивая стабильное предоставление структурированного учебного материала и базовый контроль знаний учащихся.

Опыт эксплуатации разработанного приложения выявляет существенный недостаток его текущей линейной архитектуры – невозможность адаптации под индивидуальный темп и когнитивный профиль школьника. Физика – это область знаний, в которой требуется не только теоретическое понимание, но и умение решать задачи [4, с. 18]. В связи с этим статичную навигацию PhysicsQuest необходимо заменить на интеллектуальную. Требуется разработка алгоритмического решения для непрерывного анализа пользовательского прогресса. Такая система должна динамически маршрутизировать учащегося: адаптировать уровень сложности задач, генерировать дополнительные обучающие блоки или возвращать к проблемным темам для закрепления материала.

При жесткой линейной маршрутизации учащийся, не усвоивший базовый принцип, неизбежно сталкивается с непреодолимыми трудностями при изучении последующих тем (например, динамики Ньютона). Это приводит к эффекту «когнитивной перегрузки» и резкому падению мотивации. В связи с этим статичную навигацию PhysicsQuest необходимо заменить на динамическую. Требуется разработка алгоритмического решения для непрерывного сбора и анализа пользовательского прогресса. Такая вычислительная система должна «на лету» маршрутизировать учащегося: плавно адаптировать уровень сложности задач, генерировать компенсирующие обучающие блоки или принудительно возвращать к проблемным темам для фундаментального закрепления материала [5, с. 51].

Реализация персонализированных образовательных траекторий требует существенной модернизации существующей микросервисной парадигмы. Предлагаемый программно-методический комплекс заменяет жесткую логику на алгоритмы обхода направленного ациклического графа знаний и затрагивает все уровни системы. Структурная схема комплекса, затрагивающая все уровни системы, представлена на рисунке 1:

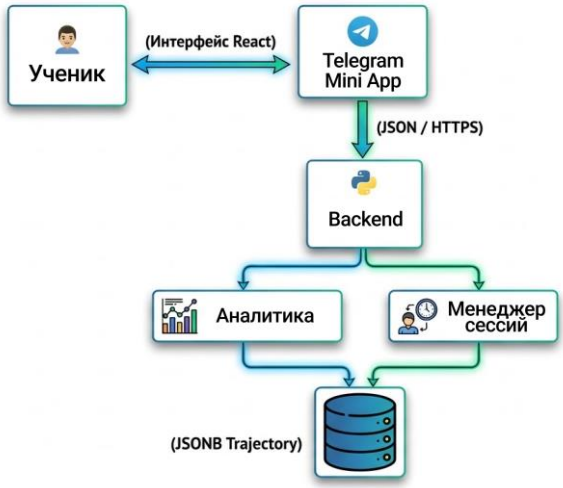


Рисунок 1 – Информационное взаимодействие микросервисов при перестроении образовательной траектории

В микросервисный контур внедряется независимый модуль аналитики, выполняющий функции виртуального тьютора. Учебный план физики представляется в виде взвешенного графа, где каждый узел – это конкретный физический навык. Бэкенд на базе FastAPI обладает высокой пропускной способностью благодаря асинхронной обработке запросов. Сервер принимает телеметрию от клиента: время решения текущей задачи, количество совершенных попыток и типы допущенных ошибок.

Если алгоритм фиксирует систематическое непонимание (превышен лимит времени или допущены критические ошибки в базовых формулах), система автоматически блокирует переход к сложным расчетным задачам. Фрагмент реализации такого маршрутизатора на языке Python представлен в листинге 1:

Листинг 1 – Фрагмент контроллера FastAPI для оценки усвоения физической концепции.

```
@router.post(«/api/v1/trajectory/evaluate»)
async def evaluate_physics_concept(metrics: ConceptMetrics):
    # Оценка когнитивной нагрузки и поиск пробелов
    if metrics.error_count > 1 and «vector_projection» in metrics.failed_skills:
```

```
    return {
        «action»: «compensate»,
        «next_node»: «theory_vectors_basic»,
        «pedagogical_status»: «review_required»
    }

# Продвижение по графу при уверенном владении темой
if metrics.completion_time < metrics.optimal_time and metrics.error_count == 0:
    return {
        «action»: «advance»,
        «next_node»: f»{metrics.current_topic}_advanced_task»,
        «pedagogical_status»: «mastered»
    }
```

Для обеспечения гибкости построения траекторий реляционная схема базы данных расширяется. Стандартные таблицы не подходят для хранения динамических графов, поэтому активно задействуется тип данных JSONB. Это позволяет сохранять уникальный цифровой след учащегося – историю обхода графа. С методической точки зрения это дает возможность накапливать массив данных о типичных ошибках и применять эти паттерны в будущем. Структура хранения метрик представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Структура хранения образовательных метрик (PostgreSQL)

Поле (Атрибут)	**Тип данных**	**Методическое и техническое назначение**
session_id	UUID	Идентификация уникальной сессии для анализа вовлеченности
concept_id	Varchar	Строковый идентификатор темы (например, ‘kinematics_1’)
metrics	JSONB	Агрегация времени и ошибок для вычисления веса следующего шага
trajectory	JSONB	Хранение массива идентификаторов узлов нелинейного маршрута

Пример сохраняемого JSON-объекта в поле trajectory может выглядеть следующим образом: {«path»: [«kinematics_theory», «kinematics_easy_test», «vectors_review», «kinematics_normal_test»], «total_time»: 1240}. Это наглядно демонстрирует, как система отбросила ученика на повторение векторов перед допуском к стандартному тесту.

Фронтенд-приложение (Telegram Mini App) кардинально перерабатывается под динамический рендеринг. Компоненты карты уровней больше не захардкожены на стороне клиента. Используя React Context или Redux для управления состоянием, приложение запрашивает актуальный граф у API при каждом действии пользователя.

Такая архитектура обеспечивает важнейший педагогический принцип – мгновенную корректирующую обратную связь. Ученик визуально воспринимает перестроение маршрута: на экране плавно появляется новая ветка с компенсирующим материалом (наглядной анимацией или подсказкой), блокируя неверный путь. Школьник получает помощь в момент совершения ошибки, а не на следующем уроке, что критически важно для предотвращения закрепления ложных физических представлений.

Логика взаимодействия описанных микросервисов носит строго циклический характер. Изоляция микросервисов в контейнерах Docker и настроенные конвейеры непрерывной интеграции (CI/CD) решают ключевую проблему внедрения инноваций в школы: они позволяют разработчикам обновлять алгоритмы рекомендаций и загружать новые физические задачи прямо во время учебного дня без прерывания активных сессий пользователей [3, с. 156].

Для подтверждения эффективности предложенной архитектуры планируется проведение полевого тестирования (A/B тестирования). Целевая аудитория будет разделена на две группы. Контрольная группа будет использовать базовую версию PhysicsQuest со статичной картой уровней. Экспериментальная группа получит доступ к версии с микросервисом персонализированных траекторий.

В качестве метрик эффективности будут оцениваться: процент успешного решения финальных тестирований по сложным темам физики, среднее время удержания в приложении (retention rate), а также снижение процента «отказов» (ситуаций, когда ученик прекращает использование тренажера после серии неудачных попыток решить задачу). Ожидается, что динамическая маршрутизация снизит уровень фрустрации учащихся и повысит общую академическую успеваемость по предмету.

Внедрение алгоритмов построения персонализированных образовательных траекторий кардинально трансформирует концепцию приложения PhysicsQuest. Переход от статичного тренажера к адаптивной интеллектуальной среде позволяет эффективно решать ключевую проблему современного физического образования – необходимость глубокого индивидуального подхода к каждому ученику в условиях массового школьного обучения. Использование современного микросервисного стека (React, FastAPI, PostgreSQL) с элементами алгоритмической маршрутизации обеспечивает системе высокую техническую масштабируемость и отказоустойчивость. На методическом уровне разработанная программная архитектура выполняет функции виртуального

преподавателя: непрерывно контролирует когнитивную нагрузку, предоставляет своевременную обратную связь и надежно удерживает школьника в оптимальной зоне интеллектуального развития.

Список литературы

1. Захарова, И. Г. Информационные технологии в образовании : учеб. пособие / И. Г. Захарова. – М. : Академия, 2020. – 192 с.

2. Титова, С. В. Мобильное обучение сегодня: стратегии и перспективы использования мессенджеров / С. В. Титова // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 20, Педагогическое образование. – 2022. – № 1. – С. 3–23.

3. Ньюмен, С. Создание микросервисов / С. Ньюмен. – СПб. : Питер, 2016. – 304 с.

4. Оспенникова, Е. В. Информационно-коммуникационные технологии в обучении физике / Е. В. Оспенникова // Физика в школе. – 2019. – № 5. – С. 14–22.

5. Андреев, А. В. Проектирование адаптивных систем обучения: алгоритмы и графы / А. В. Андреев // Образовательные технологии и общество. – 2021. – Т. 24, № 2. – С. 45–56.

The article addresses the problem of individualizing the learning process in the school physics curriculum within the context of digitalized education. To solve this methodological challenge, a concept for modernizing the gamified application PhysicsQuest, implemented as a Telegram Mini App, is proposed. Based on the existing microservice architecture utilizing a modern technology stack (React, FastAPI, PostgreSQL), an approach to constructing adaptive educational trajectories has been developed. The proposed algorithm analyzes student responses in real time and automatically adjusts content complexity, enhancing overall learning efficiency.

Соболевская Екатерина Викторовна, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, sobolll.ekk@gmail.com.

Научный руководитель – *Ситкевич Анастасия Леонидовна*, магистр физико-математических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, girl-physicist@mail.ru.

УДК 538.9

Е. Н. СОНЕЦ

ИНЖЕНЕР С ШЕСТОГО КЛАССА: ЗАЧЕМ БЕЛАРУСИ НАУЧНЫЕ ШКОЛЫ

Мы привыкли думать, что инженер – это взрослый мужчина в каске или за кульманом. Но настоящие инженеры «делаются» гораздо раньше. Там, где мальчики и девочки пытаются заглянуть внутрь сломанной игрушки и где вопрос «почему небо голубое?» важнее оценок в дневнике.

Беларусь сегодня, как никогда, нуждается в инженерных кадрах. Цифровизация, новые производства, сложные технические системы – всё это требует людей, способных не просто нажимать кнопки, а создавать технологии. И готовить таких людей нужно задолго до вуза. Оптимальный возраст для старта – 10–12 лет, пятый-шестой класс.

Почему именно пятый класс?

Возраст 10–12 лет – удивительное время. Детское конкретное мышление постепенно уступает место абстрактно-логическому, но фундаментом по-прежнему остаётся наглядность. Ребёнок не поверит в формулу, пока не увидит её в действии.

Психологи называют этот период сенситивным – самым благоприятным для развития технических способностей. Если в 10 лет показать, что физика – это не скучный параграф, а способ понять, почему летит самолёт или работает компьютер, это останется с человеком навсегда. Проверенно на собственном опыте, когда мой преподаватель в школе не просто рассказывал, но и показывал физические законы в действии. Эти воспоминания ярким пятном отпечатались в моем сознании. Но как же мне не хватало опоры и фундамента, который мне могла бы дать школа наук для лучшего и глубинного понимания материала в школе.

Мотивация в этом возрасте держится исключительно на интересе. Никакие разговоры о том, что «это пригодится на ЦЭ через пять лет», не работают. Работает только «здесь и сейчас»: я провёл эксперимент, у меня получилось, я понял, как это устроено.

Что такое инженерное мышление для шестиклассника?

Инженерное образование в 5–6 классе – это не про черчение и сопромат. Это про другой способ смотреть на мир.

Его ключевые компоненты выглядят так:

- Понимание физических процессов. Не заучивание формул, а осознание законов природы через опыт.
- Развитие пространственного мышления. Умение представить объёмный объект по его проекциям.

- Работа руками. Паяльник, отвёртка, конструктор – мелкая моторика напрямую связана с развитием интеллекта.
- Элементарное программирование. Не чтобы всех удивить, а чтобы управлять моделями.
- Командная работа. В современном мире одиночки-гении уже не справляются. Нужно уметь договариваться.

И вот важный нюанс: инженерное мышление сегодня нужно не только тем, кто пойдёт на завод. Оно нужно всем. Это способность видеть проблему, искать нестандартные решения и не бояться ошибок.

Как устроен день в научно-педагогической школе

Представим себе идеальный учебный день в такой школе. В нём нет места скуке и зубрёжке. Всё построено на живом интересе.

Инженерная разминка. Утро начинается не с беготни по коридорам, а с короткой задачки на логику или мини-эксперимента. Например, почему лист бумаги падает иначе, чем скомканный шарик? Мозги включились – поехали дальше.

Фундаментальный блок. Здесь нет уроков физики, математики и технологии по отдельности. Есть интегрированные занятия. Мы изучаем давление – и сразу идём в мастерскую собирать модель гидравлики. Мы проходим электричество – и паяем простейшую схему.

Проектная мастерская. Самое интересное. Дети делятся на команды и получают реальную (почти реальную) задачу. Спроектировать кормушку для белок в парке. Придумать, как автоматизировать полив цветов, пока хозяева в отпуске. Задача должна быть понятной и увлекательной. Ребята рисуют, считают, спорят, ошибаются и исправляют ошибки.

Рефлексия. В конце дня мы не хвалим просто результат. Мы садимся в круг и разбираем путь. Почему эта конструкция развалилась? Что мы сделали не так? Именно здесь, в спокойном обсуждении, рождается навык критического анализа.

В такой день ребёнок успевает и подумать, и сделать, и поиграть, и подискутировать. А главное – у него есть ситуация успеха. Он чувствует себя автором.

Диффузия: как не испугать, а увлечь.

Вот простой пример. Тема «Диффузия» в обычной школе часто проходит скучно: молекулы движутся, всё. А теперь представьте урок по-другому.

Мы капаем чернила в воду и не просто смотрим на красивое облачко. Мы засекаем время, пробуем воду разной температуры, делаем выводы. Потом обсуждаем: где это работает в жизни? Засолка огурцов – диффузия. Запах духов – диффузия. Как лекарство попадает в кровь? Тоже диффузия.

И тут у ребёнка случается озарение: наука – это не про страшные формулы из учебника, а про то, как устроен его собственный мир. Такое открытие запоминается навсегда.

Оглядываясь на опыт

Я много общаюсь со студентами технических вузов. Есть чёткая закономерность. Те, кто в детстве что-то паял, собирал конструкторы и ходил в кружки, в университете чувствуют себя уверенно. Им легче даются сложные предметы, они быстрее вливаются в команду, они не боятся трудностей. Потому что для них «сломалось» – это не катастрофа, а новая задача.

И наоборот, тем, кто впервые столкнулся с техникой на первом курсе, приходится тяжело. Мозг, не привыкший к проектному мышлению, сопротивляется.

Что это значит для Беларуси?

Для нашей страны, особенно для промышленных регионов вроде Гродненской области, развитие раннего инженерного образования – не эксперимент, а необходимость. У нас есть «Гродно Азот», «Гродненский мясокомбинат» с его сложным оборудованием, развитая энергетика и транспорт. Всем нужны молодые, грамотные специалисты.

Но просто ждать, пока они вырастут сами – бесполезно. Нужно растить целенаправленно. Создание научно-педагогических школ для 5–6 классов – это долгосрочная стратегия подготовки кадров.

Такие школы могут работать в разных форматах:

- Профильные инженерные субботы на базе школ или центров творчества.
- Летние лагеря с техническим уклоном.
- Сетевые проекты, где школа сотрудничает с вузами и предприятиями.

Главное – чтобы у детей была возможность попробовать себя в деле.

Современный мир меняется слишком быстро. Мы не знаем точно, какие профессии будут нужны через 15 лет. Но мы точно знаем одно: людям с инженерным складом ума будет легче в любом будущем. Они умеют анализировать, искать решения и не боятся сложных задач.

Настоящий инженер начинается не с диплома о высшем образовании. Он начинается с первого самостоятельно собранного механизма, с первого удивления и с того самого момента, когда ребёнок вдруг понимает: я могу понять, как это работает. И я могу это улучшить.

Давайте дадим нашим детям этот шанс. Им же в этом мире жить.

Список литературы

1. Бугаев, А. И. Методика преподавания физики в средней школе: теоретические основы : учеб. пособие для студентов пед. ин-тов. по физ.-мат. спец. / А. И. Бугаев. – М. : Просвещение, 1981. – С. 288.
2. Запрудский, Н. И. Современные школьные технологии – 2 / Н. И. Запрудский. – Минск : Сэр-Вит, 2010. – С. 256.
3. Кульбицкий, Д. И. Методика обучения физике в средней школе : учеб. пособие для студ. учреждений, обеспечивающих получение высшего пед. образования по физическим специальностям / Д. И. Кульбицкий. – Минск : ИВЦ Минфина, 2007. – С. 220.
4. Наумчик, В. Н. Педагогический словарь / В. Н. Наумчик, М. А. Паздников, О. В. Ступакевич. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2006. – С. 280.
5. Физика 7–9 кл.: примерное календарно-тематическое планирование : пособие для учителей учреждений общ. сред. образования / Н. Ф. Горовая [и др.]. – Минск : НИО: Аверсэв, 2023. – С. 76.
6. Физика 10–11 кл.: примерное календарно-тематическое планирование : пособие для учителей учреждений общ. сред. образования / Н. Ф. Горовая [и др.]. – Минск : НИО: Аверсэв, 2023. – С. 80.
7. Харазян, О. Г. Методы педагогических исследований : метод. рек. для студ. спец. «Физика (науч.-пед. деятельность)» / О. Г. Харазян. – Гродно : ГрГУ, 2015. – С. 62.
8. Исаченкова, Л. А. Физика : учеб. пособие для 7-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / Л. А. Исаченкова, Е. В. Громыко, Ю. Д. Лещинский ; под ред. Л. А. Исаченковой. – 2-е изд., перераб. – Минск : Народная асвета, 2022. – С. 168.
9. Исаченкова, Л. А. Физика : учеб. пособие для 8-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / Л. А. Исаченкова, Ю. Д. Лещинский, В. В. Дорофейчик ; под ред. Л. А. Исаченковой. – Минск : Народная асвета, 2018. – С. 176.
10. Исаченкова, Л. А. Физика : учеб. пособие для 9-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / Л. А. Исаченкова, Е. В. Захаревич, А. А. Сокольский ; под ред. А. А. Сокольского. – 2-е изд., перераб. – Минск : Народная асвета, 2019. – С. 208.
11. Физика : учеб. пособие для 10-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / Е. В. Громыко [и др.]. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2019. – С. 264.
12. Физика : учеб. пособие для 11-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / В. В. Жилко [и др.]. – Минск : Народная асвета, 2021. – С. 264.
13. Информационные технологии в обучении физике. Использование сетевых технологий / И. М. Григорьев [и др.] // Компьютерные инструменты в образовании – 1999. – № 6 – С. 23–27.
14. Калинин, Д. А. Использование образовательного веб-сайта в дистанционном обучении / Д. А. Калинин // Сб. науч. тр. / Нижегор. гос. пед. ун-т им. Козьмы Минина. – Нижний Новгород, 2015. – Вып. 10: Фундаментальные и прикладные исследования. – С. 39–43.

Сонец Елизавета Николаевна, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, lizalivel2004@gmail.com.

Научный руководитель – *Валько Наталья Георгиевна*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, n.valko@grsu.by.

УДК 372.853

А. А. ТЕРЕШКО

РАЗРАБОТКА ДОМАШНИХ ЗАДАНИЙ ПО ФИЗИКЕ НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКИХ ОПЫТОВ ДЛЯ УЧАЩИХСЯ СРЕДНИХ ШКОЛ (8–9 КЛАСС)

Домашнее задание – обязательный компонент урока физики. Изучение физики невозможно без самостоятельной домашней работы учащихся.

Выполнение учащимися домашних учебных заданий является одной из форм обучения. Под домашней учебной работой следует понимать самостоятельное выполнение учащимися учебных заданий учителя по повторению и более глубокому усвоению изученного на уроке материала и его применению на практике, развитию творческих способностей, дарований, а также по совершенствованию умений и навыков самостоятельно пополнять, расширять и упрочивать знания.

Необходимость домашней учебной работы обусловливается следующими факторами:

а) на уроке имеет место концентрированное усвоение изучаемого материала, после чего знания быстро забываются. Чтобы предотвратить это забывание, нужна домашняя учебная работа;

б) овладение научными понятиями требует их неоднократного осмысления и усвоения;

в) обстоятельность и прочность усвоения изучаемого материала достигается только при рассредоточенном его запоминании;

г) домашняя учебная работа имеет важное значение для развития творческих задатков и способностей учащихся.

Домашняя самостоятельная работа обладает воспитательным потенциалом, который заключается в том, что некоторые общеучебные умения должны превратиться в личностные качества школьника. Например, воспитание самостоятельности и ответственности, умение преодолевать трудности. Кроме того, учитель должен предоставить возможность школьникам додумать, разобраться во вновь изученном материале, принимая во внимание различную скорость восприятия нового разными учениками.

При разработке домашних экспериментальных заданий необходимо руководствоваться следующими принципами:

• Доступность: использование простого, безопасного и доступного оборудования (бытовые предметы).

• Наглядность и связь с теорией: опыт должен иллюстрировать конкретные физические законы и понятия, изучаемые на уроке.

• Проблемность: задание должно содержать элемент поиска, провоцировать на выдвижение гипотез.

• Вариативность: возможность различных способов выполнения и интерпретации результатов.

• Безопасность: полное исключение опасных процедур и веществ.

Каждое задание включает:

1. Название темы (соответствующее учебной программе).
2. Цель опыта.
3. Перечень необходимого оборудования (с акцентом на бытовые предметы).
4. Порядок выполнения (поэтапное описание действий).
5. Контрольные вопросы и задания для анализа (направляющие размышление ученика).

Опыты для проведения в домашних условиях учащимися 8-х классов:

Тема 1. Электрические явления. Электроскоп.

• Опыт: Изготовление и испытание самодельного электроскопа.

• Оборудование: стеклянная банка с пластиковой крышкой, медная проволока, полоска фольги, эбонитовая палочка, шерстяная ткань.

• Ход работы: Проделать в крышке отверстие, вставить проволоку так, чтобы внутри банки на ней висела петля с полоской фольги. Наэлектризовать палочку трением о ткань и поднести к проволоке. Наблюдать за поведением лепестков фольги.

• Вопросы для анализа: Как по поведению лепестков можно судить о наличии заряда? Что произойдет, если дотронуться до проволоки пальцем?

Тема 2. Сила Архимеда. Плавание тел

• Опыт: Как заставить «тонуть» и «всплывать» яйцо?

• Оборудование: Сырое яйцо, высокий стакан с водой, несколько столовых ложек соли, ложка для размешивания.

• Ход работы: Аккуратно опустить яйцо в стакан с чистой водой. Наблюдать. Достать яйцо. Растворить в воде 4-5 ложек соли, тщательно перемешать. Снова опустить яйцо в стакан. Наблюдать.

• Вопросы для анализа: В каком случае яйцо тонет, а в каком плавает? Как изменение плотности жидкости повлияло на выталкивающую силу? Где на практике используют принцип, продемонстрированный в этом опыте? (Мертвое море, плотность раствора в аквалангe).

Тема 3. Диффузия. Тепловое движение

• Опыт: Наблюдение зависимости скорости диффузии от температуры.

• Оборудование: Два прозрачных стакана, холодная и горячая (не кипяток!) вода, пакетик растворимого чая или несколько крупинок чая, часы.

• Ход работы: Налить в один стакан холодную воду, в другой – горячую. Опустить в оба стакана одновременно по одинаковому количеству чая. Наблюдать за скоростью окрашивания воды в течение 3-5 минут.

• Вопросы для анализа: В каком стакане процесс окрашивания произошел быстрее? Почему скорость движения молекул и диффузии зависит от температуры? Как этот опыт объясняет, почему сахар быстрее растворяется в горячем чае?

Опыты для проведения в домашних условиях учащимися 9 -х классов:

Тема 1. Законы динамики. Инерция.

• Опыт: Наблюдение проявления инерции.

• Оборудование: Стакан, открытка (или гладкий лист бумаги), монета.

• Ход работы: Положить открытку на стакан, а сверху на открытку – монету. Резким щелчком выбить открытку из-под монеты.

• Вопросы для анализа: Почему монета падает в стакан, а не улетает вместе с открыткой? Приведите примеры проявления инерции в быту и технике.

Тема 2. Закон сохранения импульса

• Опыт: Реактивное движение на примере «воздушного шарика-ракеты».

• Оборудование: Воздушный шарик (удлиненной формы), соломинка для коктейля, длинная нитка, скотч.

• Ход работы: Продеть нитку через соломинку, натянуть и закрепить ее концы в комнате (между стульями, дверными ручками). Надуть шарик, но не завязывать, а зажать пальцами отверстие. При помощи скотча прикрепить шарик к соломинке. Отпустить шарик.

• Вопросы для анализа: Как и в каком направлении движется шарик? За счет чего возникает сила, толкающая его вперед? Куда направлен импульс вырывающегося воздуха, а куда – импульс шарика? На каком физическом законе основан принцип движения ракет?

Тема 3. Закон отражения света

• Опыт: Проверка закона «Угол падения равен углу отражения».

• Оборудование: Небольшое плоское зеркальце, лист бумаги, транспортир, фломастер, лазерная указка (или фонарик с узким лучом, или луч солнца через маленькую дырочку в картоне).

• Ход работы: Положить зеркало на бумагу, обвести его контур. Восстановить перпендикуляр (нормаль) к линии зеркала в его середине. Направить луч света на зеркало так, чтобы он падал под углом 30° к нормали. Отметить на бумаге точку падения луча и положение отраженного луча. С помощью транспортира измерить углы.

• Вопросы для анализа: Чему равен угол отражения? Справедлив ли закон отражения? Какой будет угол отражения, если луч направить перпендикулярно к зеркалу (угол падения = 0°)?

Методические рекомендации по организации и проверке выполненных заданий:

- Организация: Задания выдаются заранее, с подробным инструктажем по технике безопасности. Рекомендуется создание «папки исследователя» для фиксации целей, хода работы, наблюдений, выводов и фотоотчета.

- Проверка: Проверка может быть разноформатной:

1. Устный отчет: краткое выступление ученика на уроке с демонстрацией результатов (фото, видео, графики).
2. Письменный отчет: сдача структурированного описания опыта.
3. Творческая презентация: защита мини-проекта, выполненного на основе нескольких опытов.

- Оценивание: Критерии оценивания должны включать: правильность выполнения, аккуратность и полноту отчета, глубину анализа результатов, творческий подход.

По результатам исследований получены следующие выводы:

1. Использование домашних физических опытов является действенным средством повышения эффективности обучения, позволяющим реализовать деятельностный и личностно-ориентированный подходы.

2. Содержание домашних экспериментальных заданий для учащихся 8–9 классов должно учитывать их возросшие познавательные возможности и направляться на развитие навыков самостоятельного исследования.

3. Разработанный комплекс домашних заданий охватывает ключевые темы курса физики основной школы и основывается на принципах доступности, безопасности и связи с жизнью. Предложенные методические рекомендации позволяют учителю грамотно встроить эту работу в учебный процесс.

4. Внедрение системы домашних заданий на основе опытов способствует не только усвоению предметных знаний, но и формированию универсальных учебных действий, что соответствует задачам современного школьного образования.

Список литературы

1. Бугаев, А. И. Методика преподавания физики в средней школе: теоретические основы / А. И. Бугаев. – М. : Просвещение, 1981. – 288 с.

2. Кирик, Л. А. Физика. Самостоятельные и контрольные работы. 7–9 классы / Л. А. Кирик. – М. : Илекса, 2018. – 192 с.

3. Физика : учеб. пособие для 8 кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / Л. А. Исаченкова [и др.]. – Минск: Народная асвета, 2022. – 168 с.

4. Физика : учеб. пособие для 9 кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / Л. А. Исаченкова [и др.]. – Минск: Народная асвета, 2023. – 180 с.

5. Шамаш, С. Я. Экспериментальные задачи по физике. 7–11 классы / С. Я. Шамаш, Э. Е. Эвенчик. – М. : Просвещение, 2001. – 160 с.

Терешко Алексей Александрович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, alex.tereshko1616@gmail.com.

Научный руководитель – *Ануфрик Славамир Степанович,* доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, anufrick@grsu.by.