



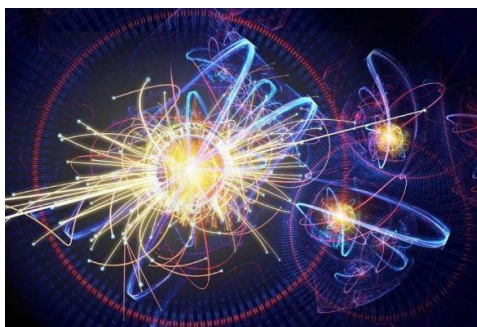
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ГРОДНЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ЯНКИ КУПАЛЫ»

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

НАУЧНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ ИЗДАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Материалы XXXIII Международной
научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов
(Гродно, 3–4 апреля 2025 г.)



Гродно
ГрГУ им. Янки Купалы
2025

УДК 538.9
ББК 22.35
Ф50

Рекомендовано Советом физико-технического факультета
учреждения образования
«Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»

Редакционная коллегия:
Г. А. Гачко (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*, *Я. Я. Пекарь*
Компьютерная вёрстка: *И. П. Зимницкая*
Дизайн упаковки: *А. Е. Герман*
Подготовка упаковки: *Д. О. Савко*

Ф50 **Физика** конденсированного состояния [Электронный ресурс] :
материалы XXXIII Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и
студентов, 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.]. –
Объём электрон. дан. 16,3 Мбайт, 40,0 уч.-изд. л. – Гродно : ГрГУ,
2025. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Тираж 9 экз. – Заказ 027.

ISBN 978-985-582-682-9

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
ББК 22.35

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 978-985-582-682-9

© Учреждение образования
«Гродненский государственный университет
имени Янки Купалы», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. ИЗУЧЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ	7
Анучин С. Н. Спектральные особенности комплексообразования лазерных красителей различных классов.....	8
Анучин С. Н. Спектральные особенности комплексообразования лазерных красителей.....	11
Бернат К. В. Структурно-фазовое состояние и механические свойства сплава NiCoFeCrMn, подвергнутого воздействию компрессионного плазменного потока.....	14
Будник В. С., Лабунин В. А. Влияние переосаждения при помощи диметилформамида на структуру и светопропускание металлоорганических перовскитов.....	17
Бусик К. П., Григаль П. А., Станчик А. В. Оптические свойства и морфология плёнок CdS, полученных методом химического осаждения.....	18
Мироненко О. С. Электронный парамагнитный резонанс плёнок полиэтилентерефталата, модифицированных имплантацией ионов фосфора с энергией 60 кэВ.....	22
Казакевич М. С. Частоты переходов для различных ориентаций NV-центров в присутствии внешнего магнитного поля.....	25
Гутенко Н. Д., Перепечко Е. Ю. Формирование тонких плёнок алюминия прямым осаждением из ионного пучка.....	28
Демяшкевич И. А., Чумаченко Д. М. Спектральные свойства красителя диалкиламино-бензилиден-малонитрила (DBMN)	30
Дудич В. В., Томашевич Л. П., Шеверденко А. В., Артющкевич Г. Д. Самоорганизация ячеек пористого оксида алюминия при локализации процесса анодирования.....	32
Журавлёва Я. Ю. Структура и электропроводность керамики Nd(Ba, Sr, Ca)Fe _{2/3} Co _{2/3} Cu _{2/3} O _{5+δ}	34
Зазыбо Н. А. Элементный и фазовый состав градиентных покрытий TiCrN.....	37
Земляков Д. С. Твёрдость и структура сплавов системы Al – Zn.....	40
Зокирова З. М., Шарипов М. З., Низомова Ш. К. Особенности влияния механических напряжений C ₃ симметрии на доменную структуру бората железа.....	43
Киркоров А. С. Структура нитрида циркония при высокотемпературном воздействии.....	45
Корхов А. А. Получение вольфрам-медных сплавов при плазменной обработке.....	47
Красноперов Н. Н., Ермалюк К. Ф. Процессы образования оксидов титана при формировании поверхности титановой мишени сериями сдвоенных лазерных импульсов в атмосфере воздуха.....	49
Лабода Н. В., Травкина Р. К. Фотофизические свойства индотрикарбонитринового красителя при взаимодействии с микробактериями.....	52
Виноградов Е. В. Влияние УФ-излучения на механические свойства фторопласта.....	54
Курьян Н. Н. Влияние температуры технологической глины на её спектральные и эмиссионные характеристики.....	57
Курьян Н. Н., Стасюкевич В. В., Трусова М. М. Установление степени загрязнённости воды реки Неман.....	60
Литошик П. В., Магонь Н. С. Исследование структурных свойств кварцевого стекла методами комбинационного рассеяния света и рентгеноструктурного анализа.....	63
Гога А. В., Себешев А. А., Туманов Т. А., Туровец У. Е. Синтез и свойства полианилина.....	66
Осмоловская Т. Н., Станчик А. В. Синтез кристаллов соединений Cu ₂ NiSnSe ₄ , Cu ₂ NiGeSe ₄	69
Курьян Н. Н., Стасюкевич В. В., Трусова М. М., Анучин С. Н. Исследование элементного химического состава беспозвоночных организмов реки Неман.....	72
Щерба У. К. Лазерная деструкция поверхности металлов при элементарном анализе.....	74

Марковская А. В. Спектральное определение температуры абляционной плазмы, возбуждаемой сдвоенными лазерными импульсами.....	76
Макаренко С. О. Фазовый состав, микроструктура, текстура, стабильность и механические свойства эвтектических сплавов Sn–Zn, легированных Al и Sb.....	78
Закревский В. Р. Влияние спектрального состава, интенсивности и режимов светодиодного освещения на рост и биохимический состав микрозелени.....	81
Ковецкая А. А., Даденков И. Г., Толстик А. Л. Исследование температуропроводности тонких плёнок SiO ₂ методом пространственно-модуляционной спектроскопии.....	83
Новицкая А. В., Даденков И. Г., Толстик А. Л. Импульсная запись динамических решёток с разными периодами в кристалле титаната висмута.....	86
Пантелеева Е. П., Мельникова Е. А. Анализ фазовой топологии оптических вихрей с использованием микроструктурированной НЖК линзы Френеля.....	87
Павлова Н. А. Коррозионная стойкость стиролакриловых покрытий, отверждённых при УФ-излучении.....	89
Павлова Н. А. Морфология поверхности и микротвёрдость сплавов магния, обработанных ускоренными ионами.....	91
Пашкевич М. А. Люминесценция аморфного диоксида кремния, возбуждаемая ультрафиолетовым лазерным излучением.....	93
Свистунов З. А. Структурно-фазовое состояние и механические свойства поверхностного слоя стали Р ₆ М ₅ , легированного атомами Nb и Cu при воздействии компрессионных плазменных потоков.....	95
Симоненко Д. А., Дударенко В. Н., Иванюта С. М. Наноструктурированные плёнки оксида циркония и их электрофизические свойства.....	98
Старцева А. Л., Пашкевич М. А., Никончик Д. В. Структура и механические свойства кремнийсодержащих градиентных покрытий Ti-Si-Al-N.....	101
Томашевич Л. П., Северденко А. В., Артюшкевич Г. Д., Дудич В. В. Формирование трубчатого пористого оксида титана электрохимическим анодированием в хлорсодержащих электролитах.....	105
Чумаченко Д. М. Флуоресцентные свойства новой производной тиюфлавина Т Th-C7 в растворителях различной полярности.....	108
Шевчик Е. В., Курбако Е. Г. Влияние состава рабочего газа на характеристики фторуглеродных покрытий, полученных прямым осаждением из ионных пучков.....	110
Штырёв Д. И., Мельникова Е. А. Объёмные пропускающие вихрево-голограммы для формирования фазовых сингулярных световых пучков.....	112
Щуко А. В., Шлопак Ю. А., Патапович М. П. Возможность изучения лазерной плазмы и отображения необходимых параметров с помощью современного оборудования.....	114
Шевчик П. В., Станчик А. В. Влияние технологических условий импульсного лазерного осаждения на оптические характеристики тонких плёнок теллурида кадмия.....	116
СЕКЦИЯ 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФИЗИКЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ.....	120
Бодак И. О. Разработка онлайн-модели плазменного факела при лазерном воздействии на цветные металлы.....	121
Волкович М. Ю., Оскирко В. С. Модели идеального газа.....	123
Гвоздовский В. А. Моделирование наведённого поглощения света нанокомпозитом с учётом безызлучательного переноса энергии возбуждения.....	125
Коваленко М. О., Кондрусь И. В. Теоретическое рассмотрение проблематики фазовой стабильности сплава HfNbZrTi к температурному воздействию.....	128
Голомбевский П. А., Козловский В. В. Фазовые превращения мелкодисперсных частиц в гиперзвуковом газовом потоке повышенной температуры.....	132
Голомбевский П. А., Козловский В. В. Модель воспламенения мелкодисперсного алюминия с фторполимерным покрытием в гиперзвуковом газовом потоке.....	133

Ерёменко П. В., Мухина А. Ю., Ломако К. Д., Жук Е. А., Пицевич Г. А., Орлович В. А. Усиление эффекта генерации второй гармоники кластерами воды за счёт захвата молекул кислорода и электронов.....	134
Иванов А. С., Шекелевский В. В. Применение метода конечных разностей для расчёта теплораспределения в магнетронной распылительной системе.....	136
Кардаш В. Д. Оптимизация модели наведённого поглощения излучения пикосекундной длительности в нанокompозите с красителем.....	139
Орехова Н. А., Абраменко Е. В., Мартынова М. А. Исследование процессов пробоя сталеи и метеорита Брагин методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии.....	142
Ярышкина Т. Г. Исследование дисфункции стоп с помощью программы «Foot Examination».....	144
Пухтеев А. О., Харитончик Р. А., Орехова Н. А. Изучение структуры железных метеоритов методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии.....	146
Цверов М. С., Шекелевский В. В. Расчёт электрических полей в магнетронной распылительной системе методом конечных разностей.....	149
Чижевский А. Ю. Компьютерное моделирование лазеров на красителях.....	152
Латош Д. В. Разработка архитектуры вспомогательного программного комплекса Physics.....	154
Лобач М. А., Швалюк Э. В., Котко А. Н. Модели фрактальных объектов.....	157
Микула М. Д. Начальные этапы разработки программного обеспечения для работы с данными рентгенофлуоресцентной спектроскопии.....	160
Обрядова А. А. Расчёт прохождения света через пластинку со свойствами гиперболического метаматериала.....	163
Оскирко В. С., Волкович М. Ю. Моделирование электрического поля дискретно распределённых зарядов.....	166
Пашкович Н. А., Полковников Р. А., Мойсейчик М. И. Расчёт колебательных спектров фуллеренов полуэмпирическими методами квантовой химии.....	169
Пашкович Н. А., Полковников Р. А., Мойсейчик М. И. Метод нестационарного теплового потока для расчёта теплопроводности композиционных систем.....	171
Полякова Я. В., Ерёменко П. В., Галинская Д. С., Кособуцкий В. Д., Пицевич Г. А. Квантово-химическое моделирование ИК спектров кругового дихроизма и квадратичного эффекта Керра для ЖК молекулы $C_{32}H_{59}NO$	174
Раджапов Д. Р., Халиллаев М. М., Рахманова Ш., Аминбоева Н. Д. Влияние композиции подзатворного диэлектрика на деградационные эффекты пластинчатого полевого транзистора, полностью окружённого затвором.....	177
Сковородко М. А. К расчёту формирования эмиссионной поверхности в источниках электронов с плазменным эмиттером.....	179
Сидорчук Р. О., Богдан Н. А. Telegram-бот для экспресс-диагностики развития плоскостопия.....	181
Хартон М. М., Новицкий А. В. Многократное рассеяние электромагнитных волн на системе цилиндров из полуметалла Вейля.....	184
Соловей П. И., Черняк В. А. Система персонального доступа на основе голосовой биометрии.....	187
Цидик М. А., Ситкевич А. Л. Автоматическая обработка интерферограмм и моделирование на их основе полей плотности концентрации электронов.....	190
Бойков А. И. Методы численного моделирования динамики роста и схлопывания парового пузыря.....	193
Головач О. С. Моделирование колебательных систем с использованием алгоритмов машинного обучения.....	196
Баум А. В. Программное обеспечение оптимизации процесса сбора бытовых отходов в городе Гродно.....	199
Бернацкий М. В., Богдан Н. А. Моделирование переноса тепла кровью нижних конечностей тела человека как способность организма поддерживать постоянную внутреннюю среду.....	201
Близняк А. А. Современные инструменты и технологии для создания UI в C# и их применение для моделирования синтеза наночастиц в плазме электрического взрыва.....	202

Богдан Н. А., Сидорчук Р. О. Облачный сервис для экспресс-диагностики температурных полей тела человека.....	206
Бойко А. А. Исследование зависимости пароголового образования от энергии лазерного импульса.....	209
СЕКЦИЯ 3. ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА.....	212
Барковская К. Н., Тихон О. И. Исследование процесса плазмообразования при непрерывном режиме генерации энергии в СВЧ плазмохимической системе.....	213
Барковская К. Н., Тихон О. И., Лушакова М. С. Исследование влияния давления в разрядной камере на формирование комбинированного разряда.....	215
Беляева А. С., Лещевич В. В. Оптимизация рабочих характеристик легкогазового ускорителя твёрдых тел.....	217
Бочко М. А. Анализ классических методов машинного зрения для решения задач промышленной автоматизации.....	220
Даукша Д. Д. Имитатор движения объектов на конвейерной ленте для поверки счётчиков готовой продукции.....	223
Ковалёв Д. Ю., Слижёва А. В. Модификация паяльных паст углеродными наночастицами.....	225
Куликовский В. А. Анализ качества электроснабжения учебного корпуса № 9 ГрГУ им. Янки Купалы.....	228
Лискович А. А. Рост эффективности формирования плазменного факела при воздействии сдвоенными лазерными импульсами на вещество.....	231
Очеретяный Н. И. Поляризационная плёнка на лобовое стекло автомобиля.....	234
Скируха М. А., Манкевич В. С. Система интеллектуального видеонаблюдения.....	237
Тарасевич М. Ч. Использование полимерных датчиков для измерения энергии удара мяча.....	239
СЕКЦИЯ 4. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ.....	242
Живолевский А. В. Разработка интерактивного приложения для повышения усвоения материала у школьников.....	243
Козельский К. Н. Разработка индивидуальных заданий для повышения усвоения материала у школьников.....	244
Слизенко Н. В. Автоматизация учебного процесса по электродинамике с помощью чат-бота Telegram.....	246
Соболевская Е. В. Технологии разработки образовательных приложений: обзор и анализ для игры по физике.....	249
Янушевич Я. В. Desktopное приложение для проведения тестирования учащихся средней школы на понимание механических явлений.....	252
Янушевич Я. В. Методика оценки уровня понимания механических явлений у учащихся средней школы.....	254

**СЕКЦИЯ 1.
ИЗУЧЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ
И СВОЙСТВ КОНДЕНСИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ**

С. Н. АНУЧИН

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ КРАСИТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ

Исследованы условия формирования и свойства комплексов включения (КВ) лазерных красителей дифенилстильбена и флуорола 7GA с кукурбит[7]урилом. Рассмотрены спектральные характеристики КВ красителей с учётом размеров молекул, их функциональных групп и свойств комплексообразователя.

Генерационная эффективность лазеров на красителях определяется фотофизическими и фотохимическими свойствами их активной среды – раствором красителя. В зависимости от необходимой длины волны накачки в качестве растворителей используются различные органические соединения: для УФ (до 300 нм) – циклогексан, глицерин, метанол и пр.; для синего диапазона (300–400 нм) – ДМСО, ДМФА, этанол, метанол и др.; для видимого и ближнего ИК-диапазона (400–1200 нм) – толуен, хлороформ, бензиловый спирт и другие [1]. Перспективным растворителем также является деионизованная вода. Но большинству эффективных красителей в воде присуща агрегация молекул, которая значительно усиливается при достижении оптимальных концентраций (10^{-3} – 10^{-4} моль/л). При таких концентрациях красителя в растворе образуются ди- и олигомеры, что резко снижает эффективность генерации из-за роста потерь. Для устранения эффекта агрегации и димеризации необходимо изолировать молекулы красителя от воды, снизив потери на триплетное поглощение и ингибировать фотохимические реакции при УФ возбуждении. В литературе предложены различные варианты создания защитной оболочки молекул красителей путем внесения в водный раствор различных добавок [2]. Используемый комплексообразователь – кукурбит[7]урил (K[7]U) – хорошо растворяется в воде и практически не изменяют оптических свойств водно-этанольных растворов. Равенство концентраций молекул красителя и комплексообразователя обеспечивает условия оптимального образования комплексов «гость – хозяин» при соответствии их размеров.

Наноструктурированные комплексы включения могут образовываться при смешивании комплексообразователя и красителя либо в сухом состоянии, либо в растворах или суспензиях. Наиболее часто для комплексообразования используется вода [3; 4].

Эффективность встраивания определялась по изменениям в спектрах ИК – поглощения комплекса включения красителя по сравнению с исходным красителем и комплексообразователем. В качестве «гостя» при комплексообразовании были выбраны не флуоресцирующие красители различных классов – дифенилстильбен (DPS) (сцинтиллятор) и флуорол 7GA (производное феналемина). Спектры ИК-поглощения измерялись на ИК Фурье спектрометре Nicolet iS10.

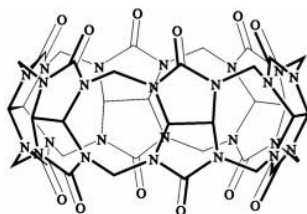


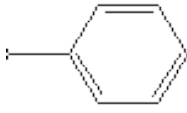
Рисунок 1 – Структурная формула кукурбит[7]урила

Таблица 1 – Основные параметры молекул красителей

№ п/п	Структурная формула	$\lambda_{\text{полг}}^{\text{max}}$, нм	$\lambda_{\text{флуор}}^{\text{max}}$, нм
1	 Дифенилстильбен (DPS) ($\text{C}_{16}\text{H}_{20}$)	340	—
2	 Флуорол 7GA (F7GA) ($\text{C}_{20}\text{H}_{24}\text{N}_2\text{O}_2$)	440	—

Красители подбирались по размеру молекул для анализа условий встраивания в полость кукурбит[7]урила (рисунок 1). Объем полости K[7]U равен $279 \text{ \AA}^3$, диаметр – $7,3 \text{ \AA}$, высота тора – $9,1 \text{ \AA}$ [4]. Поскольку эффективное включение может происходить при соответствии линейных размеров молекулы красителя и объема полости, были проведены расчёты объемов и линейных размеров их функциональных групп (таблицы 1 и 2) [5; 6].

Таблица 2 – Структурные элементы красителей, их объёмы и линейные размеры

№ п/п	Структурный элемент молекулы красителя	Объём, $\text{\AA}^3$	длина, $\text{\AA}$	ширина, $\text{\AA}$
1	– C_4H_9	176,00	15,48	3,96
2	– $\text{N}(\text{C}_4\text{H}_9)$	191,30	16,95	3,96
3	– $\text{NH}(\text{C}_4\text{H}_9)$	192,78	17,90	3,96
4		142,80	5,99	6,02

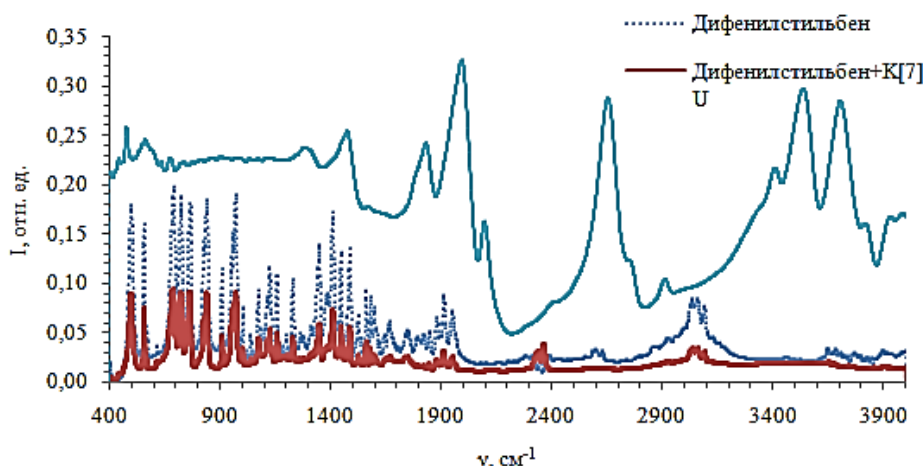


Рисунок 2 – ИК-спектры поглощения дифенилстильбена (1), его комплекса включения с кукурбит[7]урилом в соотношении 1:1 (2) и кукурбит[7]урила (3)

На рисунке 2 приведены ИК-спектры поглощения дифенилстильбена, его комплекса включения и кукурбит[7]урила. Как видно, в спектре комплекса включения DPS появляются новые полосы при частотах 2330 см^{-1} и 2360 см^{-1} (валентные асимметричные колебания группы – OH), характерные для K[7]U. При этом в спектре КВ наблюдается значительное снижение интенсивности всех полос красителя. Полосы, соответствующие DPS в спектре комплекса включения практически, не испытывают смещения относительно своего исходного положения. Наиболее значимые полосы располагаются при 688 см^{-1} , 723 см^{-1} , 762 см^{-1} , 840 см^{-1} , 910 см^{-1} , 968 см^{-1} – деформационные внеплоскостные и скелетные колебания ароматических колец и соседних атомов водорода; 1075 см^{-1} , 1952 см^{-1} – слабые валентные асимметричные колебания связей $\text{C} = \text{C} = \text{C}$; 1005 см^{-1} , 1120 см^{-1} , 1160 см^{-1} – валентные асимметричные колебания связей $\text{C} - \text{O} - \text{C}$, образованные в комплексе включения с K[7]U; 1340 см^{-1} , 1406 см^{-1} , 1450 см^{-1} – слабые валентные колебания $\text{N} = \text{N}$ с алкильными заместителями и атомами кислорода в комплексе включения; 1480 см^{-1} , 1490 см^{-1} , 1562 см^{-1} , 1690 см^{-1} , – валентные асимметричные колебания связей $\text{C} - \text{NO}_2$ в арильных соединениях; 1230 см^{-1} , 1760 см^{-1} , 1880 см^{-1} – валентные колебания $\text{C} = \text{O}$; 2940 см^{-1} , $3030\text{--}3090 \text{ см}^{-1}$ – группа валентных колебаний алкильных групп; $3600\text{--}3700 \text{ см}^{-1}$ – валентные колебания групп – OH, затухающие в комплексе включения. Наблюдаемое снижение частот валентных колебаний молекул красителя может свидетельствовать о его встраивании в полость молекулы кукурбитурила [6].

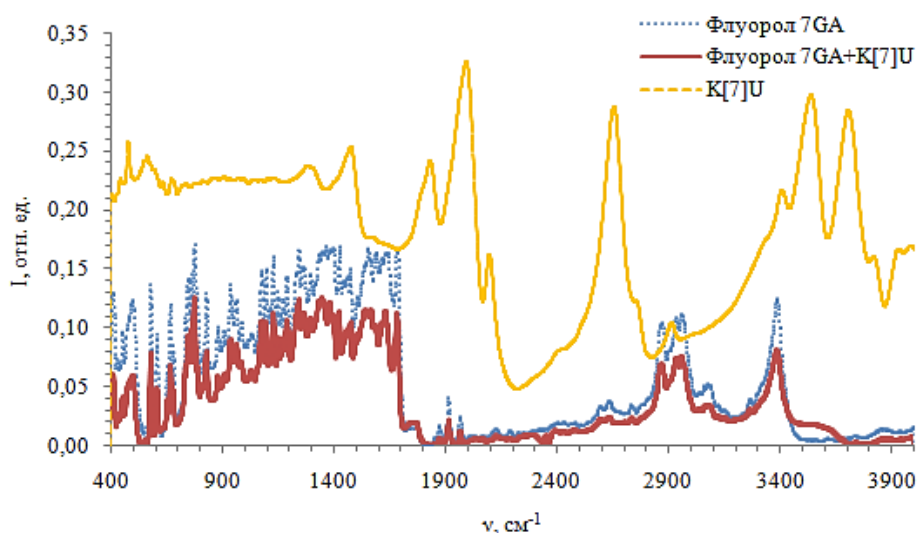


Рисунок 3 – ИК-спектры поглощения флуорола 7GA(1), его комплекса включения с кукурбит[7]урилом в соотношении 1:1 (2) и кукурбит[7]урила (3)

На рисунке 3 приведены ИК-спектры поглощения флуорола 7GA, его комплекса включения и кукурбит[7]урила. Как видно, в спектре комплекса включения флуорола 7GA выявляется полоса при частоте 3383 см^{-1} , связанная с наложением валентных колебаний групп —OH , —NH_2 , —NH и характерная для чистого красителя, кукурбитурила и их комплекса включения, причём испытывает небольшой гипсохромный сдвиг на -3 см^{-1} (в КВ) и значительный bathochromный, $+20\text{ см}^{-1}$ – в К[7]U. Также для КВ характерна слабая широкая полоса $2260\text{--}2340\text{ см}^{-1}$ (валентные асимметричные колебания групп $\text{—N}=\text{C}=\text{O}$), характерная и для К[7]U и для красителя. Линии при $700\text{--}600\text{ см}^{-1}$ – слабые деформационные колебания $\equiv\text{C} - \text{H}$ и $\text{ArC} - \text{H}$, не имеют практического значения. Триплет линий 740 см^{-1} , 769 см^{-1} и 773 см^{-1} – внеплоскостные деформационные и скелетные колебания —CH_2 и —CH_3 групп в бутиловых заместителях флуорола. Линии 827 см^{-1} , дублет 939 см^{-1} , 966 см^{-1} – внеплоскостные деформационные колебания $=\text{CH}$ в феналеминовом ядре; дублет 1095 см^{-1} и 1126 см^{-1} – валентные колебания $\text{—C} - \text{O}$ в $>\text{CH} - \text{OH}$; 1186 см^{-1} (валентные колебания $\text{—C} - \text{O}$ в $\text{ArC} - \text{OH}$); дублет 1244 см^{-1} и 1255 см^{-1} (валентные колебания $\text{—C} - \text{O}$); дублет 1377 см^{-1} и 1396 см^{-1} – симметричные деформационные колебания —CH_3 , 1473 см^{-1} – деформационные колебания —CH_2 – в бутиловых заместителях; дублет 1543 см^{-1} и 1560 см^{-1} – деформационные колебания $\text{N} - \text{N}$ и валентные колебания $\text{N} - \text{C} = \text{O}$ в ядре красителя; 1628 см^{-1} , 1684 см^{-1} , 1760 см^{-1} (различные валентные колебания $\text{—C} = \text{O}$ и $\text{—C} = \text{N}$). Линии 1876 см^{-1} (валентные колебания $\text{—C} = \text{O}$ в циклических 6-членных ангидридах кислот); 1911 см^{-1} , 1971 см^{-1} – валентные колебания связей $\text{C} = \text{C} = \text{C}$ в комплексе включения красителя с кукурбитурилом. Для комбинационной полосы $2875\text{--}3090\text{ см}^{-1}$ (резонанс Ферми) не наблюдается сколько-нибудь значительного смещения, связанного с деформационными колебаниями групп —CH бутиловых остатков красителя при $\sim 1380\text{ см}^{-1}$. При этом в спектре КВ наблюдается снижение интенсивности всех полос красителя. Наблюдаемое смещения полос и интенсивности их колебаний может быть обусловлено межмолекулярным взаимодействием, вследствие образования водородных связей с К[7]U [6].

Наблюдаемое в КВ обоих красителей общее снижение интенсивности всех полос, без существенных смещений относительно их исходного положения, свидетельствует о встраивании в полость молекулы кукурбитурила. Наличие большого количества полос поглощения алкильных групп в спектре КВ флуорола может свидетельствовать об их внешнем положении относительно полости кукурбитурила.

Список литературы

1. Brackmann, U. *Lambdachrome. Laser Dyes* / U. Brackmann // *Lambda Physik AG D-37079*. – 3rd ed. – Goettingen, Germany, 2000. – 294 p.
2. Левшин, Л. В. Влияние сольватации на генерационные характеристики растворов красителей / Л. В. Левшин, А. М. Салеский, В. И. Южаков // *Квантовая электроника*. – 1983. – Т. 10, № 7. – С. 1413–1419.
3. Методы получения нанок комплексов биологически активных веществ с циклическими олигосахаридами, анализ их физико-химических свойств и использование в пищевом производстве / М. А. Капустин [и др.] // *Труды Бел. гос. ун-та*. – 2016. – Т. 11, ч. 1. – Минск : Изд-во БГУ, 2016. – С. 73–100.
4. Герасько, О. А. Супрамолекулярная химия кукурбитурилов / О. А. Герасько, Д. Г. Самсоненко, В. П. Федин // *Успехи химии*. – 2002. – Т. 71, № 9. – С. 840–861.
5. Лосев, В. Ю. Компьютерное моделирование атомных и молекулярных орбиталей : метод. указания // В. Ю. Лосев, Г. И. Дерябина. – Самара : Изд-во «Самарский университет», 1996. – 33 с.
6. Справочные таблицы основных спектроскопических данных (ИК – УФ – ЯМР спектроскопия и масс-спектрометрия) // *КОХ ХФ*. – Минск : Изд-во БГУ, 2001. – 44 с.

The conditions of formation and properties of inclusion complexes (IC) of laser dyes diphenylstilbene and fluorol 7GA with cucurbit[7]uril are investigated. Spectral characteristics of IC dyes are studied taking into account the sizes of molecules, their functional groups and properties of the complexing agent.

Анучин Сергей Николаевич, заведующий лабораторией кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, anuchin_sn@grsu.by.

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

УДК 538.958,547.022

С. Н. АНУЧИН

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ КРАСИТЕЛЕЙ

Исследованы условия формирования и свойства комплексов включения (КВ) красителей паратерфенила и кумарина 314 с кукурбит[7]урилом. Рассмотрены спектральные характеристики КВ красителей с учётом стерических факторов молекул, их функциональных групп и свойств комплексообразователя.

Генерационная эффективность лазеров на красителях определяется фотофизическими и фотохимическими свойствами их активной среды – раствором красителя. В зависимости от необходимой длины волны накачки в качестве растворителей используются различные органические соединения: для УФ (до 300 нм) – циклогексан, глицерин, метанол и пр.; для синего диапазона (300–400 нм) – ДМСО, ДМФА, этанол, метанол и др.; для видимого и ближнего ИК – диапазона (400–1200 нм) – толуен, хлороформ, бензиловый спирт и другие [1]. Перспективным растворителем также является деионизованная вода. Но большинству эффективных красителей в воде присуща агрегация молекул, которая значительно усиливается при достижении оптимальных концентраций (10^{-3} – 10^{-4} моль/л). При таких концентрациях красителя в растворе образуются ди- и олигомеры, что резко снижает эффективность генерации из-за роста потерь. Для устранения эффекта агрегации и димеризации необходимо изолировать молекулы красителя от воды, снизив потери на триплетное поглощение и ингибировать фотохимические реакции при УФ возбуждении. В литературе предложены различные варианты создания защитной оболочки молекул красителей путем внесения в водный раствор различных добавок [2]. Используемый комплексообразователь – кукурбит[7]урил (K[7]U) – хорошо растворяется в воде и практически не изменяют оптических свойств водно-этанольных растворов. Равенство концентраций молекул красителя и комплексообразователя обеспечивает условия оптимального образования комплексов «гость – хозяин» при соответствии их размеров.

Наноструктурированные комплексы включения могут образовываться при смешивании комплексообразователя и красителя либо в сухом состоянии, либо в растворах или суспензиях. Наиболее часто для комплексообразования используется вода [3; 4].

Эффективность встраивания определялась по изменениям в спектрах ИК-поглощения комплекса включения красителя по сравнению с исходным красителем и комплексообразователем. В качестве «гостя» при комплексообразовании были выбраны флуоресцирующие красители различных классов – паратерфенил (РТР) (сцинтиллятор) и кумарин 314. Спектры ИК-поглощения измерялись на ИК Фурье спектрометре Nicolet iS10.

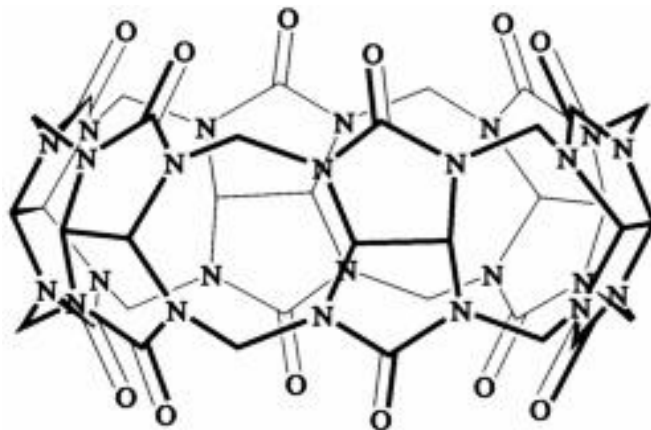
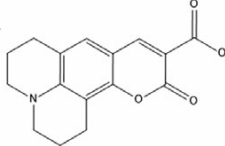


Рисунок 1 – Структурная формула кукурбит[7]урила

Таблица 1 – Основные параметры молекул красителей

№ п/п	Структурная формула	$\lambda_{\text{погл}}^{\text{max}}$, нм	$\lambda_{\text{флюор}}^{\text{max}}$, нм
1	 Паратерфенил (PTR) (C ₁₈ H ₁₄)	275	339
2	 Кумарин 314 (C ₁₈ H ₁₉ NO ₄)	436	480

Красители подбирались по размеру молекул для анализа условий встраивания в полость кукурбит[7]урилла (рисунок 1). Объем полости K[7]U равен 279 Å³, диаметр – 7,3 Å, высота тора – 9,1 Å [4]. Поскольку эффективное включение может происходить при соответствии линейных размеров молекулы красителя и объема полости, были проведены расчёты объемов и линейных размеров их функциональных групп (таблицы 1 и 2) [5; 6].

Таблица 2 – Структурные элементы красителей, их объёмы и линейные размеры

№ п/п	Структурный элемент молекулы красителя	Объём, Å ³	длина, Å	ширина, Å
1	– C – COO	365,67	9,35	4,12
2		142,80	5,99	6,02

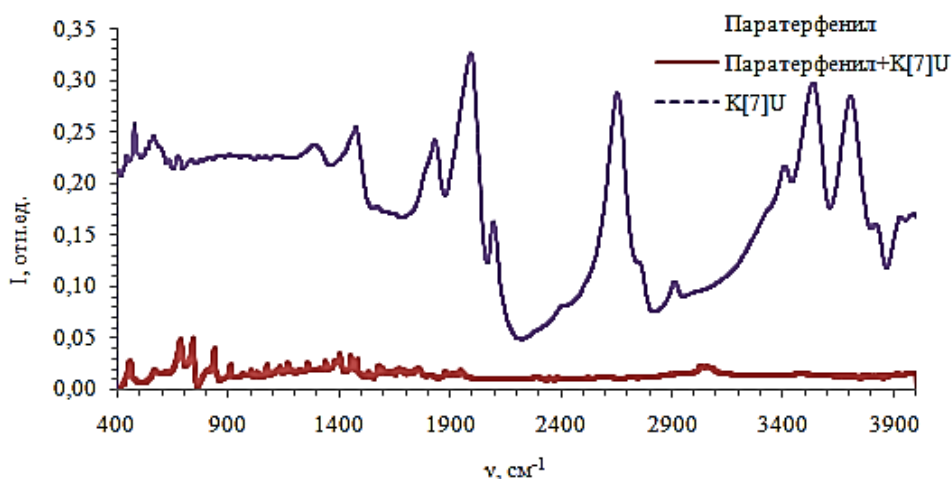


Рисунок 2 – ИК-спектры поглощения паратерфенила, его комплекса включения с кукурбит[7]урилом в соотношении 1:1 и чистого кукурбит[7]урилла

На рисунке 2 приведены ИК-спектры поглощения паратерфенила, его комплекса включения и кукурбит[7]урилла. Как видно, в спектре комплекса включения РТР не появляются новые полосы, характерные только для K[7]U. При этом в спектре КВ наблюдается общее снижение интенсивности всех полос красителя. Полосы, соответствующие РТР в спектре комплекса включения испытывают незначительное (до 10 см⁻¹) батохромное смещение относительно своего исходного положения: 680 см⁻¹ 740 см⁻¹, 840 см⁻¹, 910 см⁻¹ – деформационные внеплоскостные и скелетные колебания ароматического кольца и соседних атомов водорода; 1075 см⁻¹, 1952 см⁻¹ – слабые валентные асимметричные колебания связей C = C = C; 1000 см⁻¹, 1170 см⁻¹, 1260 см⁻¹ – валентные асимметричные колебания связей C – O – C, образованные в комплексе включения; 1380 см⁻¹, 1410 см⁻¹, 1450 см⁻¹ – слабые валентные колебания N = N с алкильными заместителями и атомами кислорода в комплексе включения; 1480 см⁻¹, 1576 см⁻¹, 1690 см⁻¹ – валентные асимметричные колебания связей C – NO₂ в арильных соединениях; 1760 см⁻¹, 1880 см⁻¹ – валентные колебания C = O; 2370 см⁻¹ – валентные асимметричные колебания связей – N = C = O, образованные в комплексе включения; 2600 см⁻¹, 3045 см⁻¹, 3720 см⁻¹ – валентные колебания групп – OH. Наблюдаемое смещение указанных полос колебаний может быть обусловлено межмолекулярным взаимодействием, вследствие образования межмолекулярных связей с K[7]U [6].

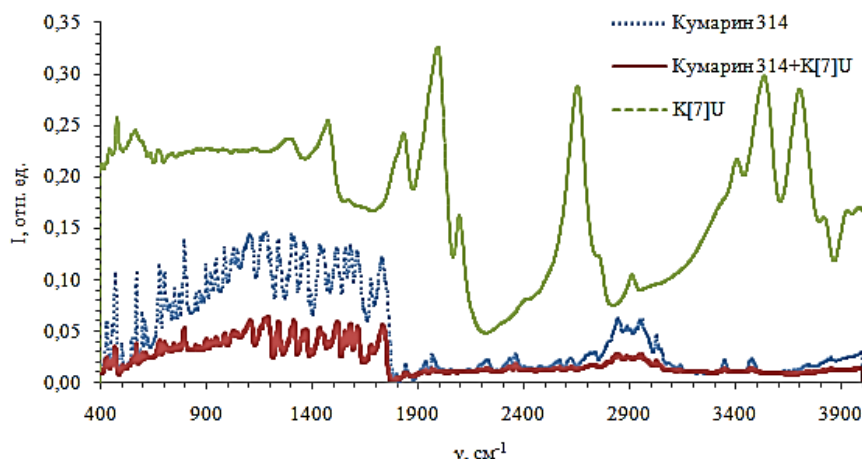


Рисунок 3 – ИК-спектры поглощения кумарина 314, его комплекса включения с кукурбит[7]урилом в соотношении 1:1 и чистого кукурбит[7]урила

На рисунке 3 приведены ИК-спектры поглощения кумарина 314, его комплекса включения и кукурбит[7]урила. Как видно, в спектре комплекса включения кумарина 314 выявлены следующие полосы при частотах: 795 см^{-1} , $900\text{--}960\text{ см}^{-1}$ (внеплоскостные деформационные колебания CH , --C=C--OR , соответственно); дублеты 1099 см^{-1} , 1174 см^{-1} , 1196 см^{-1} (валентные колебания --C--O в ArC--OH); 1238 см^{-1} , 618 см^{-1} , 720 см^{-1} , 732 см^{-1} , 860 см^{-1} (различные валентные колебания --C=O), 1317 см^{-1} , 1362 см^{-1} , 1437 см^{-1} , 1580 см^{-1} (слабые симметричные и асимметричные валентные колебания N=N с алкильными заместителями и атомами кислорода в комплексе включения) и 2360 см^{-1} (валентные асимметричные колебания группы --N=C=O), характерные для К[7]У; 2243 см^{-1} (колебания $\text{--C}\equiv\text{N}$ в арильных соединениях); 2347 см^{-1} , 2360 см^{-1} (линии CO_2); затухающие линии 3358 см^{-1} , 3480 см^{-1} (валентные колебания --OH и --NH , соответственно). Для широкой комбинационной полосы $2860\text{--}2960\text{ см}^{-1}$ (резонанс Ферми) не наблюдается значительного смещения, связанного с деформационными колебаниями групп --CH около $\sim 1400\text{ см}^{-1}$ [6].

Полученные результаты указывают, что в сформированном КВ наблюдается общее снижение интенсивности всех полос красителей, без существенного их смещения относительно исходного положения относительно в чистом растворе красителя, что свидетельствует о полном встраивании молекул исследуемых в полость кукурбитурила.

Список литературы

1. Brackmann, U. *Lambdachrome. Laser Dyes* / U. Brackmann // *Lambda Physik AG D-37079*. – 3rd ed. – Goettingen, Germany, 2000. – 294 p.
2. Левшин, Л. В. Влияние сольватации на генерационные характеристики растворов красителей / Л. В. Левшин, А. М. Салецкий, В. И. Южаков // *Квантовая электроника*. – 1983. – Т. 10, № 7. – С. 1413–1419.
3. Методы получения наноконплексов биологически активных веществ с циклическими олигосахаридами, анализ их физико-химических свойств и использование в пищевом производстве / М. А. Капустин [и др.] // *Труды Бел. гос. ун-та*. – 2016. – Т. 11, ч. 1. – Минск : Изд-во БГУ, 2016. – С. 73–100.
4. Герасько, О. А. Супрамолекулярная химия кукурбитурилов / О. А. Герасько, Д. Г. Самсоненко, В. П. Федин // *Успехи химии*. – 2002. – Т. 71, № 9. – С. 840–861.
5. Лосев, В. Ю. Компьютерное моделирование атомных и молекулярных орбиталей : метод. указания // В. Ю. Лосев, Г. И. Дерябина. – Самара : Изд-во «Самарский университет», 1996. – 33 с.
6. Справочные таблицы основных спектроскопических данных (ИК – УФ – ЯМР спектроскопия и масспектрометрия) // *КОХ ХФ*. – Минск : Изд-во БГУ, 2001. – 44 с.

The conditions of formation and properties of inclusion complexes (IC) of paraterphenyl and coumarin 314 dyes with cucurbit[7]uril were investigated in this work. The spectral characteristics of IC dyes were studied taking into account the steric factors of the molecules, their functional groups and the properties of the complexing agent.

Анучин Сергей Николаевич, заведующий лабораторией кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, anuchin_sn@grsu.by.

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, г. Гродно, Республика Беларусь, anufriuk@grsu.by.

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА NiCoFeCrMn, ПОДВЕРГНУТОГО ВОЗДЕЙСТВИЮ КОМПРЕССИОННОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА

Образцы составов NiCoFeCrMn и NiCoFeCrMn с покрытием Zr обрабатывались компрессионным потоком плазмы с различной плотностью поглощенной энергии. Проведен анализ образцов с использованием растровой электронной микроскопии.

Вследствие особенностей структуры, высокоэнтропийные сплавы характеризуются малыми коэффициентами диффузии, коррозионной стойкостью, повышенной пластичностью при низких температурах и другими особыми свойствами, которые могут быть весьма полезны для многих перспективных материалов и технологий [1]. Одним из высокоэнтропийных сплавов является сплав Кантора – NiCoFeCrMn. Его недостатком является относительно низкий предел текучести при комнатной температуре. Одним из способов, позволяющих повысить прочностные характеристики поверхностного слоя металлов и сплавов, является воздействие пучками высокоэнергетических частиц. Такая обработка дает возможность диспергировать структуру, как при непосредственном воздействии, так и легировании дополнительными элементами, такими, как цирконий и титан [2].

Объектом исследования являлись сплав NiCoFeCrMn и сплав NiCoFeCrMn с нанесённым покрытием из циркония. Обе серии образцов обрабатывались компрессионным плазменным потоком (КПП), генерируемым газоразрядным магнетоплазменным компрессором компактной геометрии (МПК – ГК). Общая длительность разряда такого устройства составляет ~140 мкс, причём устойчиво поток существует ~70 мкс. В качестве рабочего вещества использовался азот под давлением 3 тор при разности потенциалов между катодом и анодом 4 кВ. Обработка проводилась тремя импульсами длительностью 100 мкс при различном расстоянии между образцом и электродами (8 и 12 см), что соответствовало значениям плотности энергии 23 и 13 Дж/см², поглощенной поверхностным слоем.

Результаты растровой электронной микроскопии показали, что воздействие КПП с плотностью поглощенной энергии 13 и 23 Дж/см² приводит к образованию трещин на поверхности покрытия, причем при обработке образца в режиме с плотностью энергии 23 Дж/см² (рисунок 1в) их концентрация меньше, чем при обработке в режиме с плотностью энергии 13 Дж/см² (рисунок 1б). Кроме того, по всей поверхности появляются «цепочки» из локальных областей, содержащих повышенную концентрацию кислорода.

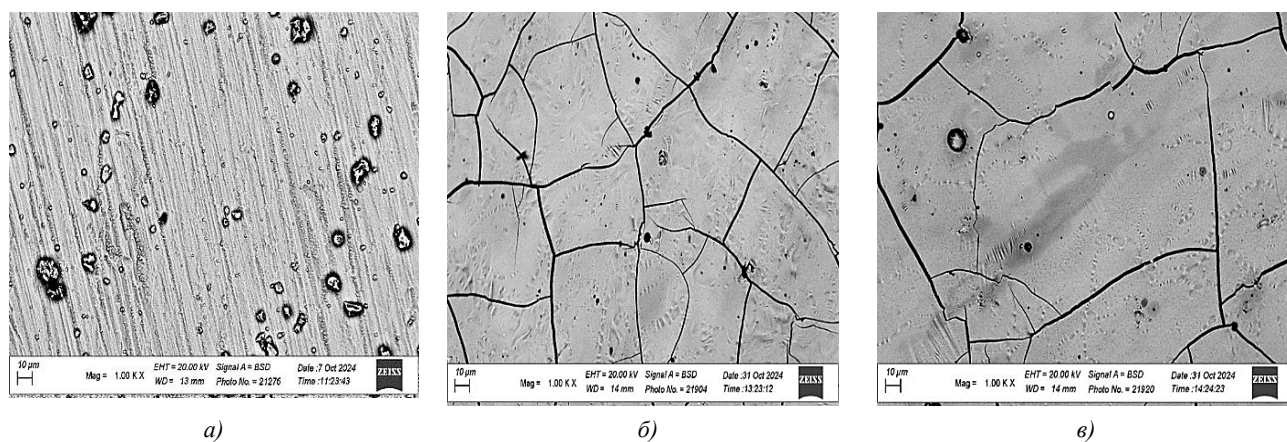


Рисунок 1 – Изображение поверхности образца NiCoFeCrMn с покрытием Zr при съёмке РЭМ до обработки (а), после обработки в режиме с плотностью энергии 13 Дж/см² (б) и 23 Дж/см² (в)

Воздействие КПП приводит к перемешиванию покрытия Zr с материалом сплава. Толщина легированного цирконием слоя составляет 12 мкм при обработке с плотностью энергии 13 Дж/см² (рисунок 2б) и 10 мкм с плотностью энергии 23 Дж/см² (рисунок 2в). С увеличением плотности поглощенной энергии концентрация циркония уменьшается от ~12 масс. % (13 Дж/см²) до ~5 масс. % (23 Дж/см²) и его распределение становится более однородным.

Уменьшение концентрации циркония в легированном слое может быть связано с эрозией поверхности при плазменном воздействии. Более однородное распределение циркония при обработке системы «основа – покрытие» в режиме энергии 23 Дж/см² является следствием увеличения времени существования расплава.

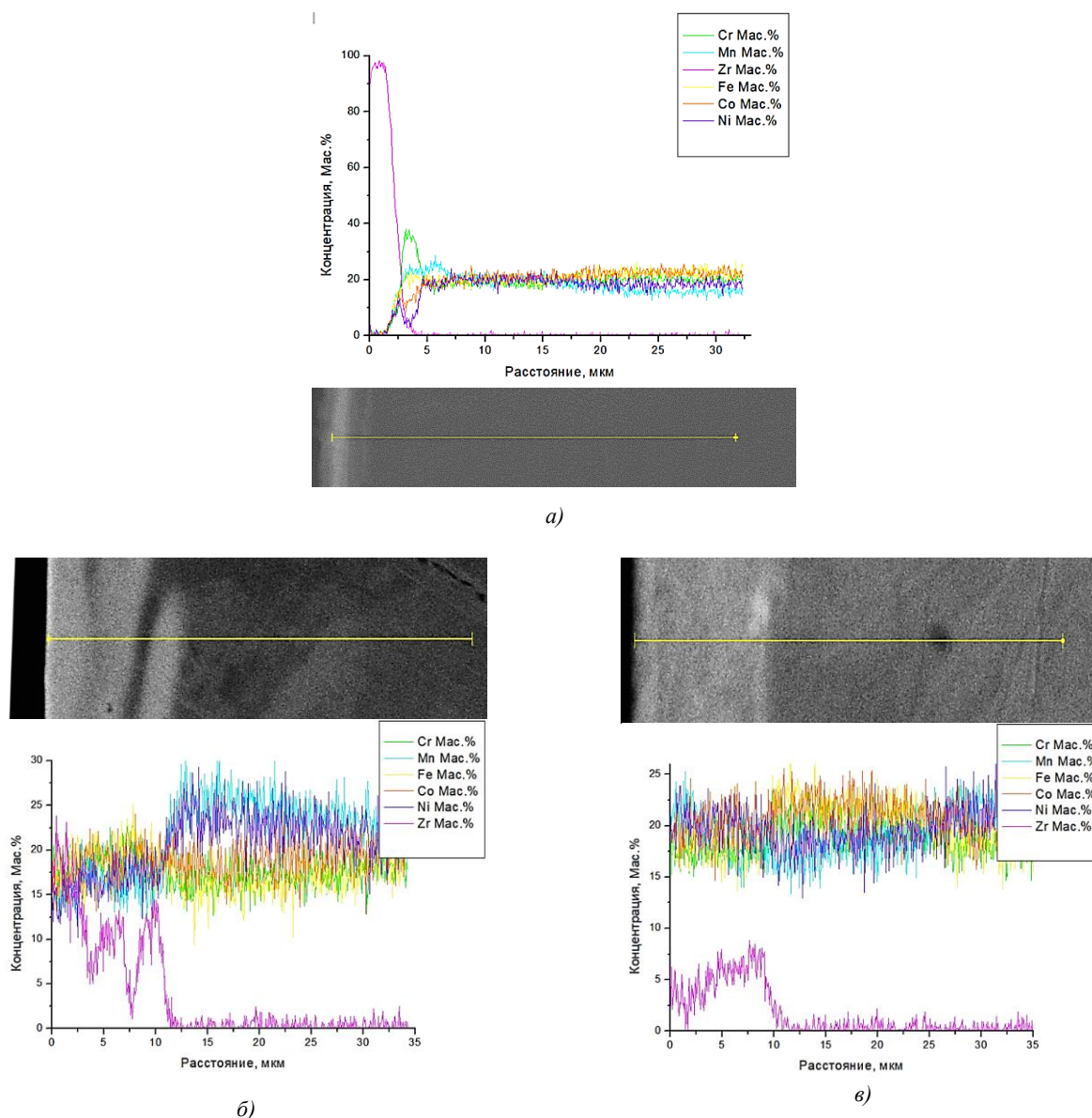


Рисунок 2 – Распределение элементов по поверхности образца NiCoFeCrMn с покрытием Zr до обработки (а) и после обработки с плотностью поглощённой энергии 13 Дж/см² (б) и 23 Дж/см² (в)

Оценка эрозионной стойкости системы «основа – покрытие» выполнялась путем взвешивания образцов на аналитических весах Radwag AS 60/220/C/2/N с погрешностью, не превышающей 5 %.

Измерения массы образцов (рисунок 3) показывает, что нанесение покрытия циркония ведет к уменьшению массы, удаленной с поверхности образца. Это может быть связано с тем, что температура плавления циркония (1855 °С) больше, чем сплава Кантора (1650–1700 °С в зависимости от содержания марганца в диапазоне от 25 до 15 % соответственно). В результате время существования однородной жидкой фазы при плазменном воздействии будет меньше для образцов с покрытием, что ведет к меньшему времени действия механизма эрозии. Убыль массы выше для образца, обработанного с плотностью поглощенной энергии 23 Дж/см², что обусловлено увеличением времени существования расплава.

Измерение Микротвёрдости на приборе WilsonInstruments 402MVD при нагрузке 1 Н методом Виккерса (погрешность измерений не превышала 8 %) (рисунок 4) показало, что после обработки КПП Микротвёрдость образца без покрытия уменьшается, что можно предположительно связать с перераспределением элементов сплава. Легирование цирконием приводит к росту Микротвёрдости до 485 HV при плотности поглощенной энергии 13 Дж/см². Увеличение плотности поглощенной энергии до 23 Дж/см² приводит к уменьшению величины Микротвёрдости до 347 HV. Однако это значение остается более высоким, чем значение для исходного образца. Поведение Микротвёрдости коррелирует с уменьшением концентрации Zr в поверхностном слое.

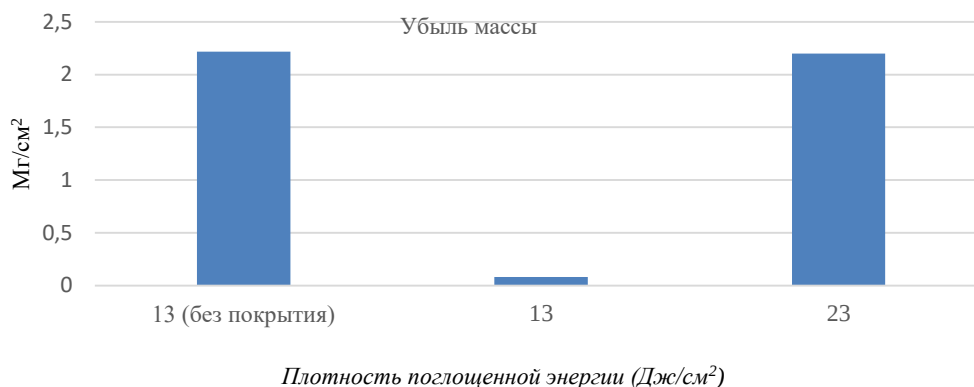


Рисунок 3 – Диаграмма убыли массы для образцов NiCoFeCrMn

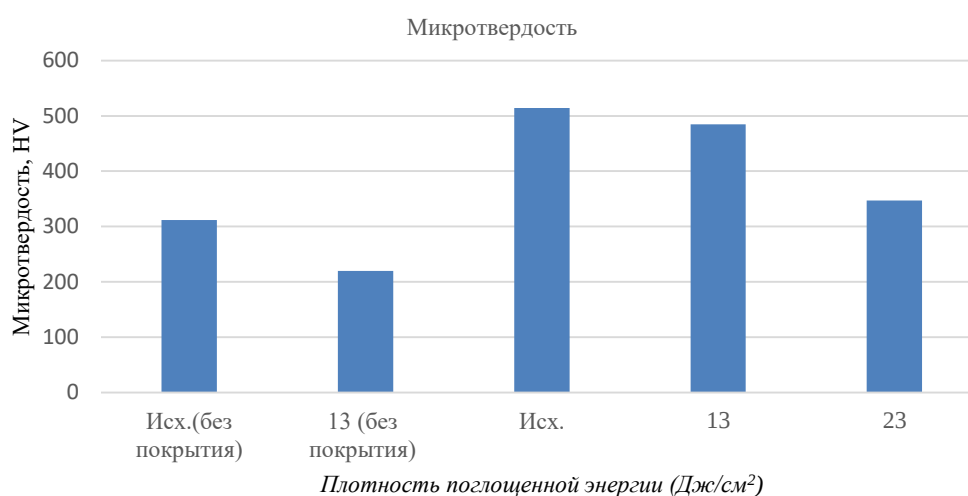


Рисунок 4 – Диаграмма изменения микротвёрдости для образцов NiCoFeCrMn

Таким образом, в работе показано, что добавление циркония в поверхностный слой сплава NiCoFeCrMn увеличивает его твердость и уменьшает эрозию материала при воздействии компрессионного плазменного потока. Увеличение плотности поглощенной энергии приводит к более однородному распределению циркония в поверхностном слое.

Список литературы

1. Zhang, W. Science and technology in high-entropy alloys / W. Zhang, P. K. Liaw, Y. Zhang // Science China Press and Springer. – Berlin : Verlag Berlin Heidelberg, 2018. – P. 807–808.
2. Изменение механических свойств сплава Cantor при легировании / М. О. Ефимов [и др.] // Вестн. Сибир. гос. индустриального ун-та. – 2024. – № 2 (48).
3. Эрозия материалов при воздействии компрессионных плазменных потоков / Н. Н. Черенда [и др.] // Перспективные материалы. – 2014. – № 11. – С. 9–11.

In this work, samples of NiCoFeCrMn alloy and NiCoFeCrMn alloy compositions coated with Zr were treated with a compression plasma flow with different densities of absorbed energy. The samples were analyzed using scanning electron microscopy.

Бернат Кирилл Владимирович, младший научный сотрудник Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь, fireskeleton2002@gmail.com.

Научный руководитель – *Черенда Николай Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, cherenda@bsu.by.

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕОСАЖДЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ДИМЕТИЛФОРМАМИДА НА СТРУКТУРУ И СВЕТОПРОПУСКАНИЕ МЕТАЛЛОРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТОВ

Представлены результаты исследований металлоорганических монохлорид замещенных перовскитов до и после переосаждения на стеклянной подложке. Перекристаллизация с использованием диметилформамида приводит к трансформациям в морфологической структуре и светопропускании после добавления растворителя.

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 металлоорганические перовскитные солнечные элементы (ПСЭ). Главными характеристиками, требующими внимательного исследования, являются морфологические и оптические свойства, влияющие на эффективность работы перовскитных элементов [1].

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 образцы, 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 изучалось воздействие переосаждения металлоорганического галогенилмобатного перовскита при помощи диметилформамида (ДМФА) на светопропускание перовскитов. Плёнки толщиной 0,5–0,8 мкм были получены центрифугированием (500 об./мин.) с последующим отжигом при $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 5 мин. Жидкофазный прекурсор получен смешиванием хлорида метиламмония $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Cl}$ с иодидом свинца (II) PbI_2 (молярное соотношение 1:1) в ДМФА, этилендиаммонийдиодид $\text{INH}_3\text{C}_2\text{H}_4\text{NH}_3\text{I}$ (18,4 г/л) добавляли в готовый раствор при перемешивании небольшими порциями.

В исходном перовските, который образует плёнку чёрного цвета, структура зернистая, с размером частиц 0,92–1,37 мкм, объединяющихся в кольцеобразные агрегаты диаметром 8,91–15,62 мкм. Размеры промежутков на поверхности покрытия составляют около 8,0 мкм (рисунок 1а). После переосаждения цвет поверхности не меняется, диаметр отдельных частиц, уже не объединяющихся в более крупные структуры, составляет 0,92–1,16 мкм, размеры промежутков – 5,0 мкм (рисунок 1б).

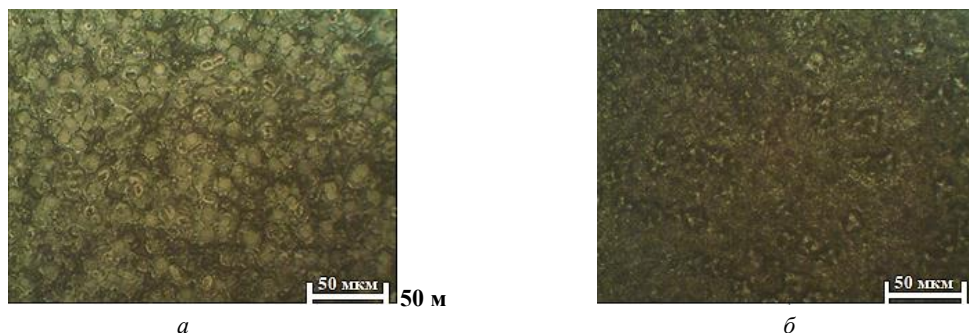


Рисунок 1 – Структура поверхности плёнок до (а) и после (б) переосаждения при помощи ДМФА

В первоначальном перовските пропускание света (T) после незначительного повышения в фиолетовой области падает от 7,98 % при $\lambda = 398\text{ нм}$ до 7,06 % при длинах волн 666–686 нм (красный и инфракрасный диапазоны) (рисунок 2, кривая 1). Отмечается заметный пик при $\lambda = 598\text{ нм}$, соответствующий 7,1 % пропускания. В инфракрасной области спектра светопропускание немонотонно возрастает вплоть до $T = 8,54\text{ %}$ при $\lambda = 1000\text{ нм}$.

После переосаждения, которое осуществлялось путём введения 0,05 мл ДМФА в образец с последующим испарением и отжигом, характер светопропускания меняется. Повышение процента пропускания от 5,08 % при $\lambda = 380\text{ нм}$ до 5,39 % в диапазоне длин волн 470–540 нм (синяя и зелёная области) сменяется падением до 5,26 % (пик при $\lambda = 598\text{ нм}$) с последующим незначительным перегибом ($\lambda = 604\text{–}608\text{ нм}$; $T = 5,31\text{ %}$) (рисунок 2, кри-

вая 2). Последующее понижение до 5,09 % при $\lambda = 696\text{--}732$ нм (красная область спектра) в дальнейшем трансформируется в неравномерное повышение светопропускания ($T = 5,85$ % при $\lambda = 1000$ нм) (рисунок 2, кривая 2).

Вышеуказанные спектральные изменения – главным образом, резкое падение процента пропускания света после переосаждения – объясняются значительным уменьшением количества и размера пустот в покрытиях.

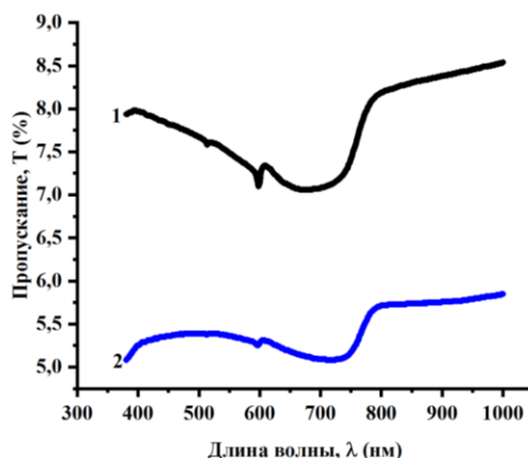


Рисунок 2 – Спектры пропускания перовскитов до (1) и после (2) переосаждения

Таким образом, особенности оптических свойств металлорганических перовскитов после переосаждения заключаются в значительном понижении показателей пропускания, что свидетельствует о повышении качества покрытий. Рекомендуется дальнейшее использование таких покрытий в перовскитных солнечных панелях.

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.

This article presents the results of studies of organometallic monochloride – substituted perovskites before and after reprecipitation on a glass substrate. Recrystallization using dimethylformamide leads to transformations in the morphological structure and light transmission after the addition of solvent.

Будник Валерия Сергеевна, факультет радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, valeria.budnik@mail.ru.

Научный руководитель – *Лабунов Владимир Архипович*, доктор технических наук, профессор, академик Национальной академии наук Беларуси; сотрудник НИЛ 4.6 «Интегрированные микро- и наносистемы» НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, labunov@bsuir.by.

УДК 539.23

К. П. БУСКИС, П. А. ГРИГАЛЬ, А. В. СТАНЧИК

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МОРФОЛОГИЯ ПЛЁНОК CdS, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ¹

Тонкие плёнки CdS были получены методом химического осаждения на стеклянных подложках при различном времени осаждения. По полученным двумерным снимкам поверхности плёнок CdS с помощью атомно-силовой микроскопии определены значения параметров шероховатости и максимальной высоты неровности профиля их поверхности. Оптические свойства показали высокую степень пропускания (~ 80 %) и низкий уровень отражения (~ 30 %) осаждённых плёнок CdS.

¹Работа выполнена в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии».

Тонкие плёнки CdS находят применение в роли буферного слоя в гетеропереходных солнечных элементах на основе CdTe, Cu(In, Ga)(Se, S)₂ или Cu₂ZnSn(S, Se)₄. Соединение CdS – прямозонный полупроводник с фундаментальной шириной запрещённой зоны ~2,42 эВ, обладает высоким коэффициентом поглощения ($>10^4 \text{ см}^{-1}$) и *n*-типом проводимости. Эти параметры делают его подходящим для применения в роли буферного слоя [1; 2]. Тонкая плёнка CdS пропускает фотоны с более короткой длиной волны, имеет минимальные потери на поглощении, при этом помогает в пассивации поверхностных состояний на границе со светопоглощающим слоем и выполняет роль механической защиты при осаждении оконного слоя (ZnO) [2; 3]. В настоящее время для синтеза тонких плёнок CdS используются различные методы: вакуумное испарение, электрохимическое осаждение, молекулярно-лучевая эпитаксия, гидротермальный синтез, химическое осаждение и др. [4]. Среди них химическое осаждение из раствора (chemical bath deposition, CBD) используется наиболее часто, поскольку это эффективный, экономически выгодный и масштабируемый метод [2].

Основной целью данной работы является исследование влияния продолжительности осаждения на оптические свойства и морфологию тонких плёнок CdS, получаемых методом химического осаждения из раствора на стеклянных подложках.

Тонкие плёнки CdS были получены методом химического осаждения из раствора. Для приготовления раствора понадобилось 90 мл DI, 30 мл 25 % водного раствора аммиака, 40 мл сульфата кадмия (0,0096 М) в качестве источника кадмия и 40 мл тиомочевины (0,8 М) в качестве источника серы [3]. Осаждение проводилось на стеклянные подложки, которые были обработаны порошком венской извести, затем протравлены в муравьиной кислоте, промыты в деионизированной воде и просушены в потоке воздуха. Температура раствора составляла $52 \pm 1^\circ \text{C}$, а время осаждения изменялось в диапазоне 5–20 минут с шагом 5 минут. На протяжении всего процесса осаждения раствор перемешивался с помощью магнитной мешалки.

Для измерения толщины плёнок использовался лазерный эллипсометр ЛЭФ-757, погрешность измерений толщин составляла $\pm 0,3 \text{ нм}$. Спектры пропускания и отражения плёнок CdS получены на спектрофотометре Photon RT (Essent Optics Europe UAB). Спектры снимались в 3 различных точках и после значения для каждого образца были усреднены. Структура и параметры шероховатости поверхности полученных плёнок CdS изучались на атомно – силовом микроскопе NT 206 (Microtest – machines Co.) в контактном режиме. Данные снимались на двух случайных площадках с областью сканирования $10 \times 10 \text{ мкм}$ на поверхности плёнки. По каждой области с помощью программы Surface Explorer определялись: максимальная высота профиля, средняя арифметическая и квадратичная шероховатость поверхности, затем данные усреднялись для каждого образца.

На рисунке 1 приведены спектры пропускания и отражения тонких плёнок CdS. Как видно из полученных оптических спектров, почти во всех случаях, независимо от времени осаждения, плёнки CdS характеризуются близкими значениями коэффициента пропускания (~80 %) и отражения (~25 %), которые остаются почти неизменными в диапазоне длин волн 500–1000 нм. Исключением является образец, осаждённый в течение 5 минут – для него наблюдается небольшое увеличение коэффициента пропускания и уменьшение коэффициента отражения. Это связано с толщиной тонкой плёнки.

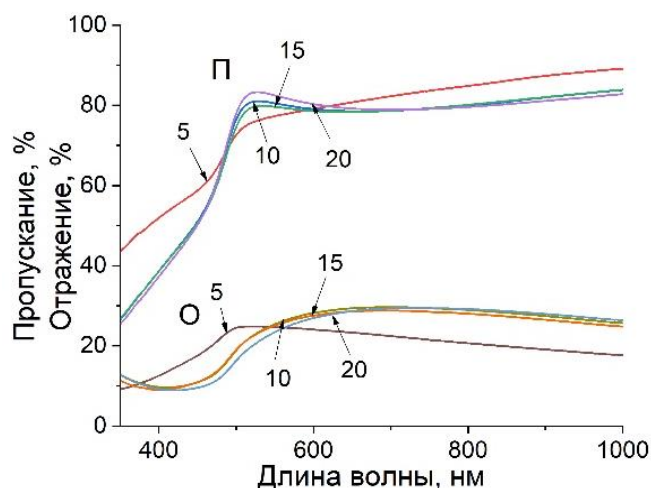


Рисунок 1 – Спектры пропускания и отражения тонких плёнок CdS в зависимости от продолжительности их осаждения (время осаждения указано на рисунке в мин.)

В таблице 1 представлены результаты измерения толщины тонких плёнок. Из результатов видно, что максимальное значение было достигнуто за 15 минут протекания процесса, дальнейшее увеличение времени синтеза привело к небольшому уменьшению толщины плёнки.

Таблица 1 – Результаты измерения толщины (d , нм) тонких плёнок CdS в зависимости от времени осаждения

Время осаждения, мин.	5	10	15	20
Толщина плёнки	88	107	115	105

Коэффициент поглощения (α) для полученных плёнок CdS рассчитан с помощью формулы [2]:

$$\alpha = -\frac{\ln T}{d},$$

где T – пропускание тонкой плёнки, d – толщина плёнки.

Результаты расчёта показаны на рисунке 2.

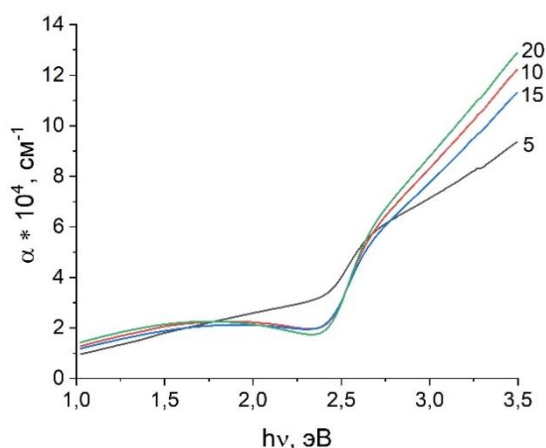


Рисунок 2 – Коэффициент поглощения (α) тонких плёнок CdS в зависимости от продолжительности их осаждения (время осаждения указано на рисунке в мин.)

Видно, что при более высоких энергиях фотона ($h\nu$) коэффициент α демонстрирует более высокие значения и эти значения более 10^4 см⁻¹ (рисунок 2); коэффициент α уменьшается с уменьшением энергии фотона ($h\nu$) и остается примерно постоянным при более низких значениях $h\nu$.

Ширина запрещённой зоны (E_g) плёнок CdS определялась по перестроенным спектрам пропускания в координатах Тауца ($(\alpha h\nu)^2$ от $h\nu$) для прямозонных полупроводников, результаты приведены на рисунке 3 и в таблице 2. Полученные значения E_g хорошо согласуются с литературными – 2,58 эВ для структуры вюрцита [4–7].

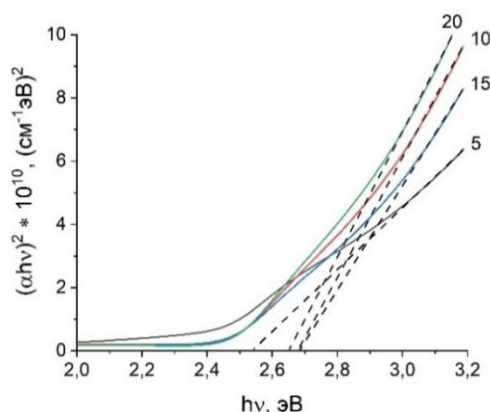


Рисунок 3 – Кривые Тауца тонких плёнок CdS в зависимости от времени осаждения (время осаждения указано на рисунке в мин.)

Таблица 2 – Ширина запрещённой зоны (E_g , эВ) плёнок CdS в зависимости от времени осаждения

Время осаждения, мин.	5	10	15	20
Ширина запрещённой зоны	2,55	2,69	2,69	2,66

На рисунке 4 и в таблице 3 представлены результаты исследований методом атомно-силовой микроскопии. Плёнки имеют равномерную структуру, без ярко выраженных дефектов и резких перепадов высот. С увеличением длительности процесса синтеза наблюдается увеличение числа частиц на поверхности.

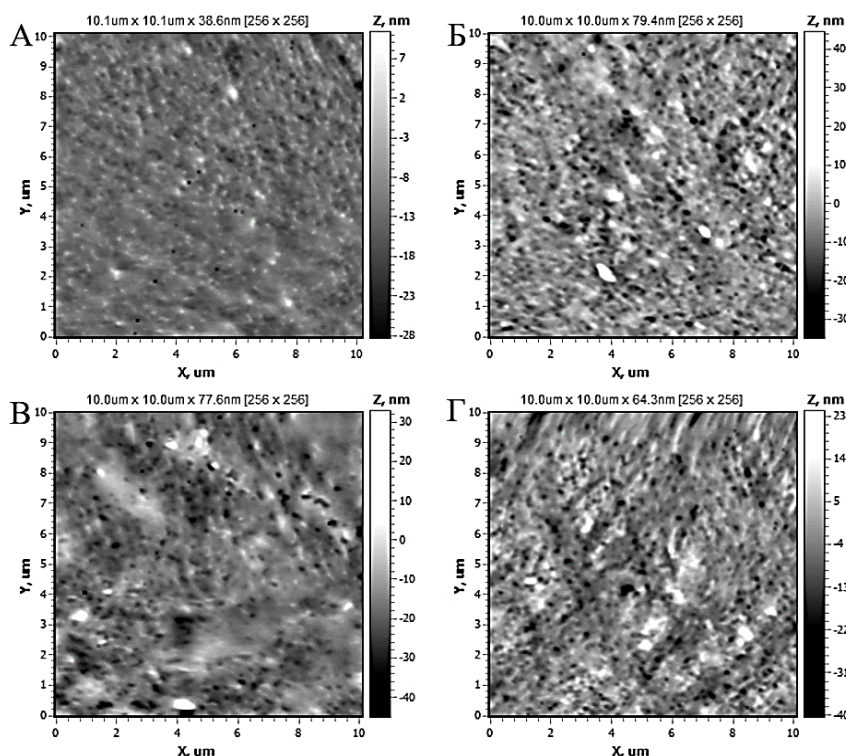


Рисунок 4 – Двухмерные АСМ-изображения поверхности плёнок CdS, осаждённых при 52 °С, и времени осаждения 5 (А), 10 (Б), 15 (В), и 20 (Г) мин.

Таблица 3 – Значения средней арифметической (R_a , нм) и средней квадратичной (R_q , нм) шероховатости, максимальной высоты неровности профиля поверхности (Z , нм) плёнок CdS в зависимости от времени осаждения

Время осаждения, мин.	5	10	15	20
R_a	2	4	4	4
R_q	3	5	5	5
Z	39	78	79	64

Из таблицы видно, что с увеличением времени протекания реакции (от 10 до 20 минут) средняя арифметическая и квадратичная шероховатости не изменяются. Максимальная высота неровности профиля уменьшается, что говорит о сглаживании поверхности.

Список литературы

1. A review of CdS photocatalytic nanomaterials: Morphology, synthesis methods, and applications / J. Longfei [et al.] // Mater. Sci. Semicond. Process. – 2024. – Vol. 176. – P. 108288.
2. Moualkia, H. Properties of CdS Thin Films Grown by Chemical Bath Deposition as a Function of Bath Temperature / H. Moualkia, S. Hariech, M. S. Aida // MSF. – 2009. – Vol. 609. – P. 243–247.
3. Микроструктура и комбинационное рассеяние света плёнок CdS, полученных методом химического осаждения / Е. П. Зарецкая [и др.] // ЖПС. – 2024. – Т. 91, № 1. – С. 32–38.
4. Study of CdS/CdS Nanoparticles Thin Films Deposited by Soft Chemistry for Optoelectronic Applications / L. A Carrasco-Chavez [et al.] // Micromachines. – 2023. – Vol. 14, № 6. – P. 1168.
5. Al-Hussam, A. M. A. Synthesis, structure, and optical properties of CdS thin films nanoparticles prepared by chemical bath technique / A. M. A. Al-Hussam, S. A.-J. Jassim // Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences. – 2012. – Vol. 11, № 1. – P. 27–31.
6. Dongre, J. K. Structural, optical and photoelectrochemical characterization of CdS nanowire synthesized by chemical bath deposition and wet chemical etching / J. K. Dongre, V. Nogriya, M. Ramrakhiani // Applied Surface Science. – 2009. – Vol. 255, № 12. – P. 6115–6120.
7. Rajpal, S. Structural and Optical Properties of CdS Thin Film Grown by Chemical Bath Deposition / S. Rajpal, V. Bandyopadhyay // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2013. – Vol. 5, № 3. – P. 03021-1–03021-3.

CdS thin films were obtained by chemical bath deposition on glass substrates at different deposition times. Two-dimensional images of the surface, the values of the arithmetic mean (R_a), mean quadratic (R_q) roughness, and the maximum height of the surface profile irregularity (Z) were obtained by atomic force microscopy. The optical properties showed a high degree of transmission ($\sim 80\%$) and a low level of reflection ($\sim 30\%$).

Бускис Константин Павлович, аспирант ГО «НПЦ Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», г. Минск, Республика Беларусь, konstantinbuskis@gmail.com.

Научный руководитель – *Станчик Алёна Викторовна*, кандидат физико-математических наук, доцент, ГО «НПЦ Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», г. Минск, Республика Беларусь, alena.stanchik@bk.ru.

УДК 541.64:537.312

О. С. МИРОНЕНКО

ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС ПЛЁНОК ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ ФОСФОРА С ЭНЕРГИЕЙ 60 кэВ

Методом электронного парамагнитного резонанса (далее – ЭПР) исследована при комнатной температуре пленка полиэтилентерефталата (ПЭТФ), имплантированная ионами фосфора с энергией 60 кэВ и дозой 200 мкКл/см². Проведен анализ основных параметров линии спектров ЭПР (амплитуда, ширина, g -фактор) при различном уровне мощности СВЧ. Обнаружено наличие двух типов парамагнитных центров в данной пленке, о чем свидетельствуют два участка на кривой зависимости амплитуды сигнала ЭПР от уровня микроволновой мощности, разделенные «точкой перегиба», в которой происходит насыщение одних парамагнитных центров, и начинают проявляться парамагнитные центры с другим характером насыщения. Об образовании электропроводящего слоя в исследуемом веществе свидетельствует уменьшение значения частоты резонатора. Сделан вывод о природе наблюдаемой линии ЭПР.

Защита электронного оборудования от накопления избыточного заряда и предотвращение пробоев остаются актуальными проблемами современной электроники [1]. Поскольку невозможно исключить использование полимеров в электронной промышленности, необходимо научиться использовать их физико-химические свойства для управления электростатическими разрядами. Повышение проводимости полимеров посредством ионной имплантации является актуальной задачей, поскольку позволяет без дополнительной обработки повысить их электропроводность на несколько порядков [2]. В данной работе исследуется пленка полиэтилентерефталата (ПЭТФ), модифицированная методом ионной имплантации.

Для исследования пленок ПЭТФ использовалась спектроскопия электронного парамагнитного резонанса как наиболее чувствительная методика обнаружения дефектов, связанных с нарушением химической связи в облучаемых полимерных пленках, что важно для понимания процессов формирования проводящих слоев в полимерах.

Полиэтилентерефталат характеризуется высокими диэлектрическими свойствами, механической прочностью, устойчивостью к разрыву, низкой стоимостью, очень хорошей гибкостью, хорошей химостойкостью, низким влагопоглощением, хорошим балансом электрических характеристик и рабочим диапазоном температур от -60 до $+105$ °С. Однако использование ПЭТФ ранее было ограничено его диэлектрическими свойствами. Модификация методом ионной имплантации позволяет создать в полимере проводящий слой с высокой точностью за счёт образования углеродных кластеров и разрыва химических связей.

Метод ЭПР основан на регистрации резонансного поглощения микроволнового излучения парамагнитными дефектами, что позволяет получить информацию о концентрации свободных электронов, их локализации и характере взаимодействия с окружающей дефект матрицей. Спектры ЭПР имплантированных пленок ПЭТФ регистрировались на спектрометре «RadioPan SE/X-2543» с резонатором H_{102} в X – диапазоне при комнатной температуре. Для контроля добротности измерительного резонатора, настройки фазы модуляции магнитного поля и калибровки магнитной компоненты СВЧ-излучения использовался кристалл рубина, закрепленный на стенке резонатора. Чувствительность спектрометра ЭПР составляла 3×10^{12} спин/мТл. Основные параметры спектра – амплитуда, ширина линии, g -фактор, частота резонансного магнитного поля, частота СВЧ-излучения и интенсивность – анализировались при различных мощностях СВЧ-излучения.

Объектом исследования являлись образцы промышленного полиэтилентерефталата толщиной 50 мкм, вырезанные для проведения в них имплантации ионов в виде квадратов с длиной стороны 100 мм. При проведении эксперимента по ЭПР из них вырезались образцы с размерами 4×8 мм². Было установлено, что в исходной пленке, а также в пленке ПЭТФ, облученной ионами фосфора с $E = 60$ кэВ и дозой 100 мкКл сигнал ЭПР не был обнаружен. Начиная с дозы 200 мкКл, в спектре ЭПР исследуемой пленки ПЭТФ появилась одиночная линия.

Основная задача состояла в изучении влияния разного уровня мощности СВЧ на основные параметры спектров ЭПР парамагнитных центров в пленке ПЭТФ, образовавшихся при начальной дозе имплантации ионов фосфора 200 мкКл. На рисунке 1 Н1 – значение магнитной компоненты электромагнитного СВЧ-излучения при раз-

ном ослаблении мощности, H_{10} – значение магнитной компоненты электромагнитного СВЧ-излучения при минимальном его ослаблении, что соответствует максимальной мощности СВЧ-излучения 200 мВт.

В исследуемом образце зависимость амплитуды линии ЭПР от мощности СВЧ-излучения (рисунок 1) испытывает слабое насыщение при увеличении мощности. Амплитуда сигнала ЭПР отражает картину кинетических процессов в объеме исследуемого образца и ее зависимость от мощности показывает наличие нескольких типов парамагнитных центров, дающих вклад в спектр ЭПР.

Приведенная на рисунке 2 зависимость интенсивности сигнала ЭПР от мощности СВЧ-излучения свидетельствует о наличии в имплантированной ионами фосфора ($E = 60$ кэВ, $D = 200$ мкКл) пленке полиэтилентерефталата двух типов парамагнитных центров с разными временами парамагнитной релаксации. Интенсивность сигнала ЭПР пропорциональна концентрации свободных радикалов в образце. Зависимость интенсивности сигнала ЭПР от поглощенной мощности СВЧ-излучения образцом ПЭТФ характеризуется двумя участками графика с максимумами при величине относительной мощности (H_1/H_{10}), равной 0,45 и 0,87 соответственно.

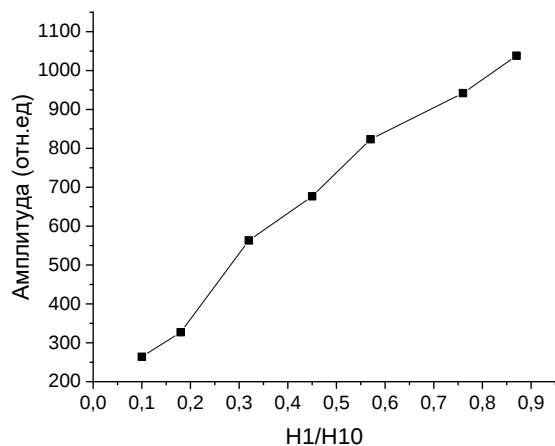


Рисунок 1 – Зависимость амплитуды сигнала ЭПР от мощности СВЧ в резонаторе

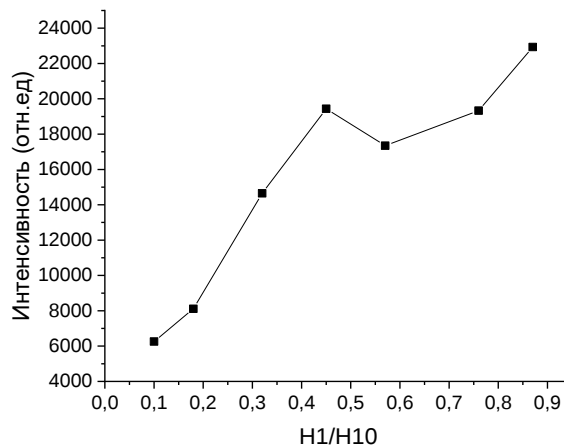


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности сигнала спектра ЭПР от мощности СВЧ в резонаторе

Исследование зависимости ширины линии спектра ЭПР от уровня СВЧ-мощности в резонаторе также показывает два участка (рисунок 3). Для одних ПЦ, дающих вклад в резонансное поглощение, ширина линии увеличивается с ростом уровня СВЧ-мощности, а для других – уменьшается. Сигналы ЭПР характеризуются определенной шириной спектральной линии. Связано это с тем, что зеемановские уровни энергии, между которыми происходят резонансные переходы, не являются бесконечно узкими линиями. Если вследствие взаимодействия неспаренных электронов с другими парамагнитными частицами и решеткой эти уровни оказываются размытыми, то условия резонанса могут реализоваться не при одном значении поля, а в некотором интервале полей. Взаимодействие неспаренных электронов может быть двух видов: спин-спиновым и спин-решеточным. В нашем случае уширение связано со спин-решеточным взаимодействием, так как при имплантации примеси происходят существенные перестройки в структуре полимера за счет разрыва связей в полимерной пленке. Минимальная ширина линии ЭПР равна 4,53 Гс и наблюдается в случае отношения (H_1/H_{10}) равного 0,76. Максимальное значение ширины линии ЭПР наблюдается при величине (H_1/H_{10}) равной 0,45 и составляет 5,36 Гс.

На рисунке 4 приведена зависимость значения резонансного магнитного поля спектра ЭПР от уровня мощности СВЧ в резонаторе. Этот рисунок также свидетельствует о двух различных типах парамагнитных центров в исследуемом образце. Для одних ПЦ $H_{рез}$ смещается в сторону слабых магнитных полей с ростом уровня СВЧ-мощности, а для других – в сторону сильных магнитных полей.

Анализируя график зависимости g-фактора от уровня мощности СВЧ в резонаторе (рисунок 5), можно заметить, что с ослаблением мощности величина g-фактора увеличивается, но остается в пределах, характерных для углеродных систем с разорванными С – С связями. Максимальное значение g-фактора составило 2,00225 при мощности СВЧ-излучения, составляющей 0,45 от максимального значения. Минимальное значение g-фактора составило 2,00198 при максимальной мощности СВЧ-излучения, используемой для исследования.

Несмотря на изменения значений основных параметров спектров ЭПР от уровня СВЧ-мощности в резонаторе, резонансная частота, как показано на рисунок 6, экспоненциально уменьшается при увеличении мощности. Это, в свою очередь, может свидетельствовать об активных потерях в резонаторе, обусловленных проводимостью разупорядоченного слоя в ПЭТФ, образованного имплантированными ионами фосфора. Частота СВЧ-излучения в резонаторе контролировалась частотомером.

При облучении пленок полиэтилентерефталата ионами фосфора с энергией 60 кэВ и дозой 200 мкКл/см² изучалась природа парамагнитных центров регистрируемой линии ЭПР. Анализ результатов исследования, а именно – зависимости интенсивности линии ЭПР, ширины, g-фактора и резонансного магнитного поля спектра ЭПР от уровня мощности СВЧ в резонаторе показал, что только при определенном уровне ослабления мощности

СВЧ, равном 0,45 от максимально допустимого значения, в исследуемом образце происходят наиболее сильные изменения. Эти изменения обусловлены, прежде всего, присутствием двух типов парамагнитных центров в имплантированной пенке ПЭТФ. Эти ПЦ имеют разные времена парамагнитной релаксации. Мы предполагаем, что один тип центров, который насыщается при малой мощности СВЧ-излучения, обусловлен локализацией не скомпенсированных спинов электронов на разорванных ускоренными ионами фосфора С – Н связях. Второй тип парамагнитных центров обусловлен локализацией не скомпенсированных спинов электронов на разорванных ускоренными ионами фосфора С – С связях. Вторая модель наблюдаемых ПЦ, которую также можно предложить – это разорванные С – С связи, локализованные в области повышенных напряжений, вызванных со стороны облученного слоя полимера. Увеличение мощности СВЧ – излучения, поглощаемого поврежденным слоем образца, приведет к разогреву и снятию напряжений в области локализации не скомпенсированных спинов электронов. Поэтому, мы имеем два разных состояния спиновой системы – при малой мощности СВЧ и при максимальном уровне возбуждения ПЦ.

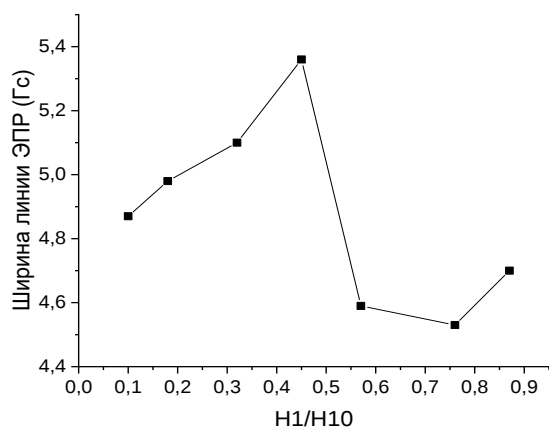


Рисунок 3 – Зависимость ширины линии спектра ЭПР от мощности СВЧ в резонаторе

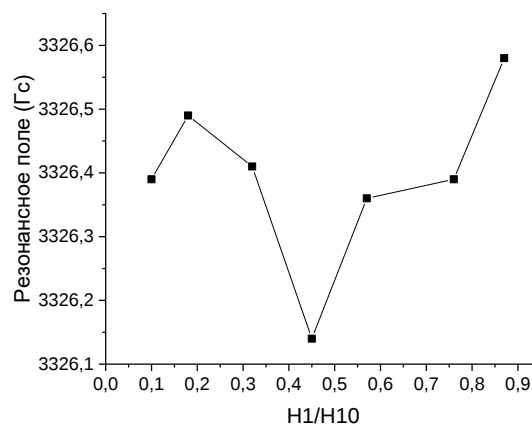


Рисунок 4 – Зависимость резонансного магнитного поля спектра ЭПР от мощности СВЧ в резонаторе

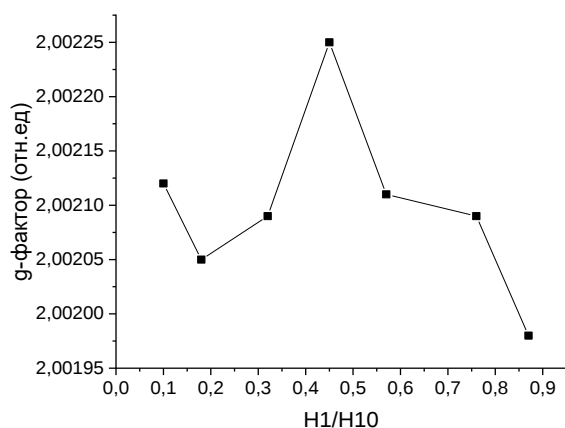


Рисунок 5 – Зависимость g-фактора от мощности СВЧ в резонаторе

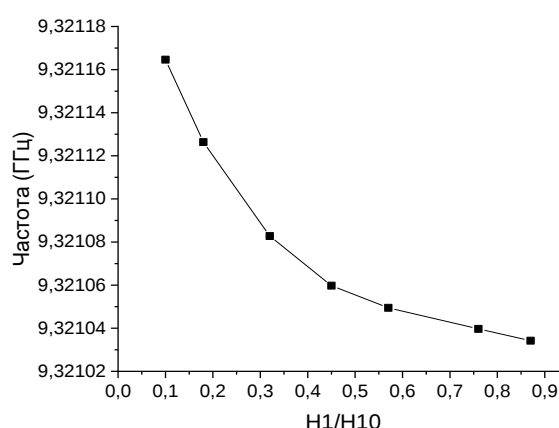


Рисунок 6 – Зависимость частоты СВЧ излучения от мощности СВЧ в резонаторе

Список литературы

1. Леб, Л. Б. Статическая электризация / Л. Б. Леб. – Москва – Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 408 с.
2. Оджаев, В. Б. Ионная имплантация полимеров / В. Б. Оджаев, И. П. Козлов, В. Н. Попок, Д. В. Свиридов. – Минск : Изд-во Бел. гос. ун-та, 1998. – 197 с.

The electron paramagnetic resonance study made it possible to study in detail the effect of phosphorus ion implantation on the properties of polyethylene terephthalate films. The analysis of the dependence of the EPR parameters on the microwave radiation power revealed the presence of two types of paramagnetic centers with different relaxation times. The results obtained confirm that ion implantation is an effective method of forming conductive layers in polymers, which opens up opportunities for creating new electronic devices based on modified polymer materials.

Мироненко Олег Сергеевич, физический факультет Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, olmir98765@gmail.com.

Научный руководитель – Лапчук Наталья Михайловна, кандидат физико-математических наук, доцент, физический факультет Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, lapchukn@gmail.com.

УДК 548.4

М. С. КАЗАКЕВИЧ

ЧАСТОТЫ ПЕРЕХОДОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ОРИЕНТАЦИЙ NV-ЦЕНТРОВ В ПРИСУТСТВИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В данной работе рассмотрено влияние симметрии алмаза на резонансные частоты переходов спиновых подуровней NV-центров. Установлены зависимости частот переходов от внешних продольных и поперечных магнитных полей для различных ориентаций NV-центров. Изучена зависимость положения линий антипересечений уровней, важная для развития магнитометрии в области слабых магнитных полей (ZFLAC) без использования дополнительных полей СВЧ диапазона.

В современном мире магнитометрия является одной из важнейших задач в прикладной физике. Поиск новых методов измерения магнитного поля остается актуальной задачей и на сегодняшний день. Одним из перспективных методов магнитометрии является использование NV-центров в алмазе. NV-центром называется точечный дефект в алмазе, который состоит из замещающего атома азота в узле кристаллической решетки и вакансии в узле, находящейся рядом.

Основным распространенным методом магнитометрии на NV-центрах является метод оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР). Идея метода заключается в регистрации изменений интенсивности флуоресценции в зависимости от приложенного микроволнового излучения в присутствии внешнего магнитного поля. Так как наличие магнитного поля в NV-центре приводит к расщеплению спиновых уровней, то, сканируя диапазон частот и отслеживая интенсивность флуоресценции, можно определить резонансные частоты переходов между спиновыми подуровнями NV-центра. По полученным значениям частот переходов можно вычислить приложенное магнитное поле.

В структуре NV-центра имеется три электронных уровня: основное и возбужденное триплетные состояния метастабильное синглетное состояние. Основное и возбужденное состояния NV-центра расщепляются на три спиновых подуровня $m_s = 0$, $m_s = +1$ и $m_s = -1$. В отсутствии магнитного поля состояния $m_s = \pm 1$ вырождены.

Вырождение между $m_s = \pm 1$ можно снять, приложив внешнее магнитное поле B_{NV} вдоль оси квантования NV. Магнитное поле заставит два уровня смещаться в противоположных направлениях [1]. Данное разделение уровней связано с эффектом Зеемана и определяется соотношением:

$$\Delta = 2\gamma B_{NV}, \quad (1)$$

где γ – гиромагнитное отношение ($\gamma = 28$ ГГц/Т).

Так как кристаллическая решетка алмаза имеет симметрию C_{3v} , то в зависимости от положения атома азота по отношению к вакансии, возможны четыре различные ориентации NV – центров. Угол θ между ориентациями определяется соотношением $\cos \theta = -1/3$ равен $109,471^\circ$ [2]. Для обозначения ориентаций используют индексы Миллера. Будем полагать, что NV_1 соответствует ориентации $[111]$, NV_2 – ориентации $[1\bar{1}\bar{1}]$, NV_3 – ориентации $[\bar{1}1\bar{1}]$, NV_4 – ориентации $[\bar{1}\bar{1}1]$.

Для изучения частот переходов был использован Гамильтониан, описывающий влияние магнитного поля на спиновые состояния основного электронного состояния NV-центра без учета влияния эффектов электрического поля, ядерных спинов и деформаций [3]:

$$\frac{H}{\hbar} = D(S_z^2 - \frac{2}{3}) + \gamma(B_z S_z + B_x S_x + B_y S_y), \quad (2)$$

где $D = 2,88$ ГГц – величина расщепления, $\hbar$ – приведенная постоянная Планка, B_x , B_y и B_z – проекции магнитного поля на оси X , Y и Z соответственно, S_x , S_y и S_z – матрицы Паули:

$$S_x = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad S_y = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{bmatrix}, \quad S_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

В расчетах примем, что для любой из четырех возможных ориентаций ось NV направлена вдоль оси Z локальной системы координат, а вектор магнитного поля B имеет две составляющие – продольную (направленную вдоль оси Z) и поперечную (направленную перпендикулярно оси Z):

$$B_{\parallel} = B_z e_z, \quad B_{\perp} = B_x e_x + B_y e_y, \quad (4)$$

где e_i – орты выбранной локальной системы координат.

В выбранной системе отсчета характеристическое уравнение, определяющее собственные значения Гамильтониана (2), имеет вид:

$$\lambda^3 - 3p\lambda + 2q = 0, \quad (5)$$

где $3p = \frac{D^2}{3} + \gamma^2 B^2$, $q = \frac{D}{3} \left(\left(\frac{D}{3} \right)^2 + \frac{\gamma^2}{2} (B^2 - 3B_z^2) \right)$, $B^2 = B_x^2 + B_y^2 + B_z^2$. Поскольку Гамильтониан (2) эрмитов, то уравнение (5) имеет три действительных корня. Введя новую переменную $v = \frac{\lambda}{2\sqrt{p}}$, запишем (5) в виде:

$$4v^3 - 3v + \sin 3\varphi = 0, \quad (6)$$

где введен новый параметр φ , определяемый из соотношения $\sin 3\varphi = \frac{q}{p^{3/2}}$, что возможно при $q^2 \leq p^3$.

Используя тригонометрическое тождество $4\sin^3\varphi - 3\sin\varphi + \sin 3\varphi = 0$, решения (5) можно записать в виде:

$$\lambda_1 = 2\sqrt{p} \sin \varphi, \quad \lambda_2 = 2\sqrt{p} \sin \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right), \quad \lambda_3 = 2\sqrt{p} \sin \left(\varphi + \frac{4\pi}{3} \right). \quad (7)$$

Компоненты магнитного поля (4) в базисах $\overrightarrow{NV_1}$, $\overrightarrow{NV_2}$, $\overrightarrow{NV_3}$ и $\overrightarrow{NV_4}$ получим с помощью базисных векторов локальных систем координат, записанных в общей системе координат кристалла:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{z1} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(1, 1, 1), & \mathbf{e}_{x1} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(-1, 1, 0), & \mathbf{e}_{y1} &= \frac{1}{\sqrt{6}}(-1, -1, 2), \\ \mathbf{e}_{z2} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(1, -1, -1), & \mathbf{e}_{x2} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1, 0), & \mathbf{e}_{y2} &= \frac{1}{\sqrt{6}}(1, -1, 2), \\ \mathbf{e}_{z3} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(-1, 1, -1), & \mathbf{e}_{x3} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(-1, -1, 0), & \mathbf{e}_{y3} &= \frac{1}{\sqrt{6}}(-1, 1, 2), \\ \mathbf{e}_{z4} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(-1, -1, 1), & \mathbf{e}_{x4} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(1, -1, 0), & \mathbf{e}_{y4} &= \frac{1}{\sqrt{6}}(1, 1, 2). \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом (8) и полагая, что в базисе $\overrightarrow{NV_1}$ магнитное поле имеет вид $\mathbf{B} = B_z \mathbf{e}_z + B_x \mathbf{e}_x$, получим компоненты этого поля в базисах $\overrightarrow{NV_2}$, $\overrightarrow{NV_3}$ и $\overrightarrow{NV_4}$:

$$\begin{aligned} B_z^{NV2} &= -\frac{1}{3}B_z - \sqrt{\frac{2}{3}}B_x, & B_x^{NV2} &= \sqrt{\frac{2}{3}}B_z, & B_y^{NV2} &= \frac{\sqrt{2}}{3}B_z - \sqrt{\frac{1}{3}}B_x, \\ B_z^{NV3} &= -\frac{1}{3}B_z + \sqrt{\frac{2}{3}}B_x, & B_x^{NV3} &= -\sqrt{\frac{2}{3}}B_z, & B_y^{NV3} &= \frac{\sqrt{2}}{3}B_z + \sqrt{\frac{1}{3}}B_x, \\ B_z^{NV4} &= -\frac{1}{3}B_z, & B_x^{NV4} &= -B_x, & B_y^{NV4} &= \frac{2\sqrt{2}}{3}B_z. \end{aligned} \quad (9)$$

Частоты переходов определим, как разность между собственными частотами:

$$f_1 = \lambda_1 - \lambda_3, \quad f_2 = \lambda_2 - \lambda_3. \quad (10)$$

Используя полученные на основе (7) значения частот переходов (10), построим в среде Matlab их зависимости при наложении различных дополнительных продольных магнитных полей.

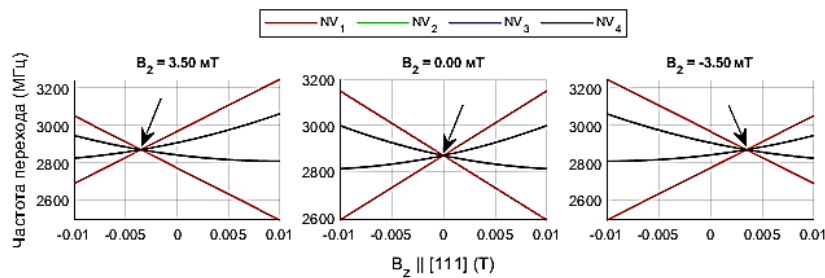


Рисунок 1 – Зависимость частот переходов от продольного магнитного поля для различных ориентаций NV-центров при наложении дополнительных продольных магнитных полей B_2

Аналогично, построим зависимости частот переходов при наложении дополнительных поперечных магнитных полей.

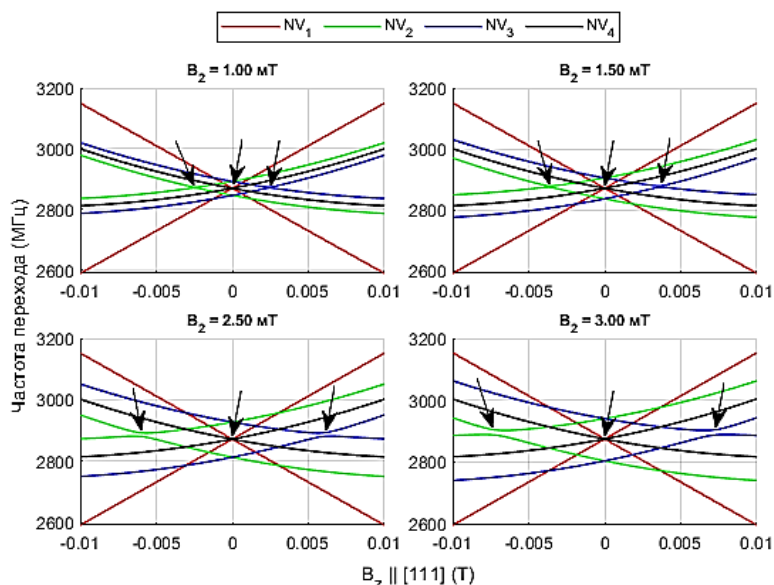


Рисунок 2 – Зависимость частот переходов от продольного магнитного поля для различных ориентаций NV-центров при наложении поперечных магнитных полей B_2

Зависимости на рисунке 1 показывают, что наложение дополнительного продольного магнитного поля B_2 приводит к сдвигу ZFLAC (линий антипересечений уровней в нулевом поле) для NV_1 и NV_4 пропорционально величине B_2 . Кроме того, было установлено, что изменение значений дополнительного продольного магнитного поля не меняет расстояние между линиями антипересечений. Влияние ориентаций NV_2 и NV_3 в данном случае отсутствует, т. к. из-за геометрии NV-центров проекции приложенного продольного магнитного поля на их оси равны нулю.

В свою очередь, зависимости на рисунке 2 показывают, что при наложении поперечного магнитного поля B_2 добавляется влияние ориентаций NV_2 и NV_3 . Было установлено, что изменение поперечного магнитного поля B_2 сдвигает линии антипересечений для NV_2 и NV_3 пропорционально величине B_2 . Кроме того, расстояние между линиями антипересечений изменяется также пропорционально приложенному магнитному полю B_2 . Сдвига для NV_1 и NV_4 не наблюдается, т. к. проекции приложенного поперечного магнитного поля на их оси равны нулю.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейших исследований в области магнитометрии на основе NV-центров.

Список литературы

1. Magnetometer with nitrogen – vacancy center in a bulk diamond for detecting magnetic nanoparticles in biomedical applications / A. Kuwahata, T. Kitaizumi, K. Saichi [et al.] // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10, № 2483.
2. Orientation determination of nitrogen-vacancy center in diamond using a static magnetic field / W. Yangpeng [et al.] // Chinese Physics B. – 2023. – Vol. 32, 070301.
3. Isogawa, T. Vector DC magnetic – field sensing with a reference microwave field using perfectly aligned nitrogen-vacancy centers in diamond / T. Isogawa, Y. Matsuzaki, J. Ishi-Hayase // Physical Review A. – 2023. – Vol. 107, 062423.

In this work, the influence of diamond symmetry on the resonance transition frequencies of spin sublevels of NV centers has been considered. The dependences of transition frequencies on external longitudinal and transverse magnetic fields for different orientations of NV centers have been established. The position dependence of anti-crossing level lines, which is important for themagnetometry in weak magnetic fields (ZFLAC) without using additional microwave fields, has been studied.

Казакевич Маргарита Сергеевна, магистрант второго курса, Университет Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь, kazakevich.mc@gmail.com.

Научный руководитель – Килин Сергей Яковлевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий Центром «Квантовая оптика и квантовая информатика» Института физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь, kilin@dragon.bas-net.by.

Н. Д. ГУТЕНКО, Е. Ю. ПЕРЕПЕЧКО

ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК АЛЮМИНИЯ ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННОГО ПУЧКА

Экспериментально исследовано влияние плотности тока и энергии ионов на скорость нанесения и оптические характеристики пленок из алюминия, полученных прямым осаждением из ионных пучков. Установлено, что скорость нанесения линейно зависела от плотности тока вторичного ионного пучка и незначительно зависела от энергии. Установлено, что скорость нанесения снижалась при увеличении напряжения на диафрагме.

Тонкие пленки широко применяются в микроэлектронике и оптике. Обычно их получают термическим испарением и ионным распылением в вакууме. В последние годы разработаны другие методы нанесения пленок алюминия. Используется осаждение пленок алюминия ионизированным кластерным пучком при температуре, близкой к комнатной. На подложках Si (111) можно было формировать практически идеальные монокристаллические пленки Al. Эти пленки демонстрируют чрезвычайно высокую термическую стабильность и стойкость к электромиграции [1]. Выращены тонкие пленки алюминия с ориентацией (111) методом атомно-слоевого осаждения (АСО) с диметилэтиламиналаном в качестве прекурсора. Постоянная решетки и температура сверхпроводящего перехода тонких пленок алюминия были такие же, как и у объемных. Были получены пленки алюминия методом АСО с использованием паров триметилалюминия (ТМА) и водородной плазмы. Скорость роста пленок составляла 0,15 нм/цикл. Удельное объемное сопротивление составило 10 мкОм·см. Метод прямого ионно-лучевого осаждения был использован для формирования ориентированных пленок алюминия. Рост тонкой пленки осуществлялся путем замедления ионов алюминия до низких энергий 10–200 эВ для прямого осаждения на подложку. Ориентированные пленки были выращены на Si (111) при температурах от 313 до 573 К [2].

Исследования осуществляли с использованием ускорителя с анодным слоем, работающего в режиме ионно-пучкового фокуса. Схема проведения экспериментов представлена на рисунке 1а. Ускоритель 1 генерировал первичный пучок из ионов аргона 6, который распылял алюминиевую диафрагму 2. Магнитное поле, создаваемое дополнительным магнитом 5, способствовало формированию вторичного плазменного разряда 4, состоящего из ионов алюминия и аргона. Вторичный ионный пучок через отверстие в диафрагме попадал на подложку 3. Энергия ионов вторичного пучка зависела от величины положительного напряжения на диафрагме U_d , которое могло варьироваться путем изменения сопротивления переменного резистора 7.

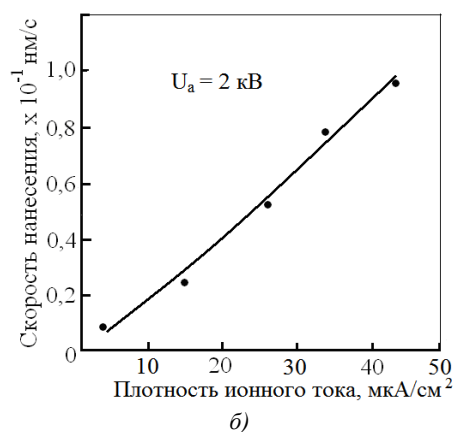
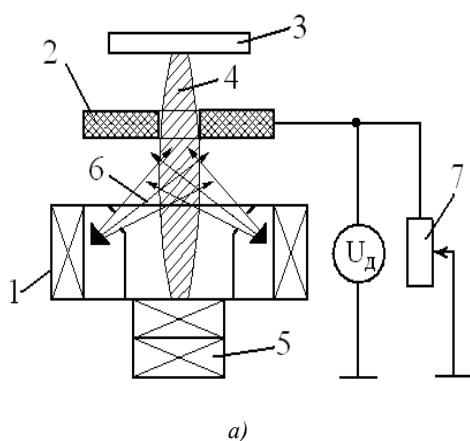


Рисунок 1 – Схема проведения экспериментов (а) и зависимость скорости нанесения от плотности ионного тока (б)

Энергия ионов вторичного пучка зависела от ускоряющего напряжения на аноде ионного источника U_a и изменялась в пределах 35–55 эВ ($U_d = 0$). Покрывают наносили на подложки из кремния и стекла. Толщину покрытий измеряли с использованием микроскопа – микроинтерферометра МИИ-4. Она составила 20100 нм. Установлено, что скорость нанесения V_n линейно зависела от плотности тока вторичного ионного пучка (рисунок 1б). Энергия ионов незначительно влияла на V_n (рисунок 2а). Установлено, что скорость нанесения снижалась при увеличении напряжения на диафрагме U_d (рисунок 2б). Это можно объяснить торможением пучка положительно заряженных ионов алюминия электрическим полем диафрагмы.

Результаты измерений оптических пропускания и отражения алюминиевых пленок толщиной ~20 нм приведены на рисунке 3.

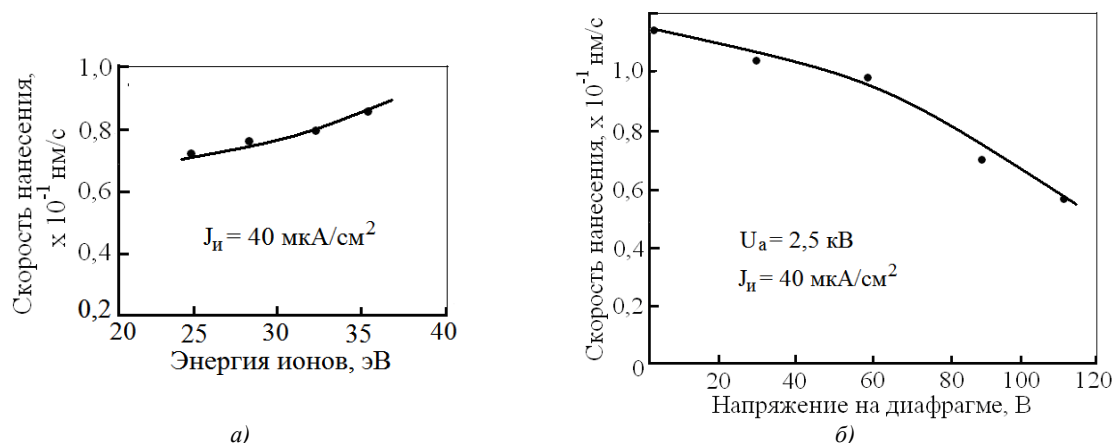


Рисунок 2 – Зависимость скорости нанесения от энергии ионов (а) и от напряжения на диафрагме (б)

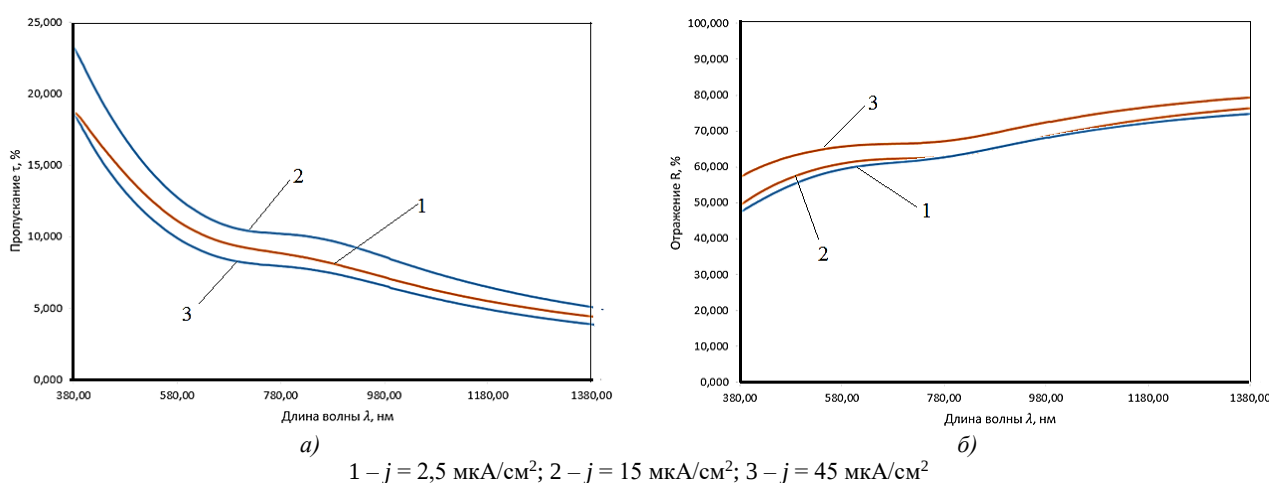


Рисунок 3 – Спектры пропускания (а) и отражения (б) плёнок алюминия в зависимости от плотности ионного тока

Установлено, что плотность ионного тока j незначительно влияла на эти характеристики. При $j = 45 \text{ мкА/см}^2$ наблюдалось некоторое снижение пропускания и рост отражения, что может быть связано с меньшей степенью окисления атомов металла. Это было подтверждено измерением коэффициента преломления на эллипсометре ЛЭФ-3. Пленки, полученные при высоких уровнях j , характеризовались $n = 1,2\text{--}1,22$. При малых значениях плотности ионного тока происходило увеличение коэффициента преломления до $n = 2,1$.

Список литературы

1. Yamada, I. Effects of Ionized Cluster Beam Bombardment on Epitaxial Metal Film Deposition on Silicon Substrates / I. Yamada // MRS Online Proceedings Library (OPL), Vol. 128 : Symposium A – Processing and Characterization of Materials Using Ion Beams. – 1988. – P. 113.
2. Formation of aluminum films on silicon by ion beam deposition: a comparison with ionized cluster beam deposition / R. A. Zuhr [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – Vol. 59. – P. 308–311.

The effect of current density and ion energy on the deposition rate and optical characteristics of aluminum films obtained by direct deposition from ion beams was experimentally studied. It was found that the deposition rate depended linearly on the current density of the secondary ion beam and depended insignificantly on the energy. It was found that the deposition rate decreased with increasing voltage on the diaphragm.

Гутенко Никита Дмитриевич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, ndg0101@yandex.by.

Перепечко Егор Юрьевич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, egorper2000@gmail.com.

Научный руководитель – Телеш Евгений Владимирович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, eteles@mail.ru.

УДК 543.422

И. А. ДЕМЯШКЕВИЧ, Д. М. ЧУМАЧЕНКО

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КРАСИТЕЛЯ ДИАЛКИЛАМИНО-БЕНЗИЛИДЕН-МАЛОНОНИТРИЛА (DBMN)

Исследовано влияние полярности и вязкости растворителя на спектры поглощения и флуоресценции молекулы диалкиламино-бензилиден-малонитрила (DBMN). С увеличением полярности растворителя наблюдается смещение спектра поглощения и флуоресценции в красную область – батохромный сдвиг. Наблюдаемые спектральные сдвиги объясняются на основе теории межмолекулярных взаимодействий.

Флуоресцентные молекулярные зонды широко используются в биофизических исследованиях. В последнее время для решения многих медицинских задач и диагностики применяются зонды, получившие название флуоресцентные молекулярные ротаторы. Особенностью данных зондов является сильная зависимость квантового выхода и длительности затухания флуоресценции от вязкости, а также полярности микроокружения [1; 2]. По этой причине подобные красители считаются удобными сенсорами (зондами) для определения вязкости и полярности растворов в локально малых объемах (капилляры кровеносных сосудов, мембраны клеток) [3]. Исследование таких красителей в растворителях имеющих различную полярность и вязкость является актуальной задачей.

Спектры поглощения растворов регистрировались с использованием спектрофотометра Specord M200 (Carl Zeiss, Германия). Измерение спектров и квантового выхода флуоресценции производили на спектрофлуориметре CM2203 (Солар, РБ). Спектральное разрешение установок составляло 1 нм. Использовался краситель диалкиламино-бензилиден-малонитрил (DBMN) фирмы Sigma-Aldrich (США), без дополнительной очистки. Для исследований использовались спектроскопически чистые растворители различной полярности и вязкости (диоксан, бутанол, вода и глицерин) при комнатной температуре ($\sim 25^\circ\text{C}$) Во всех случаях применялись кварцевые кюветы толщиной 1 см. Математическая обработка результатов проводилась с использованием пакета Origin 6.0.

В результате проведенного эксперимента получено, что при переходе от неполярного к более полярному растворителю, максимум спектра поглощения молекулы DBMN смещается в красную область (батохромный сдвиг) от ~ 420 нм в диоксане до ~ 442 нм в воде ($\Delta\lambda = 22$ нм, рисунок 1а), что является характерной чертой для молекул, обладающих дипольным моментом. Для таких молекул, находящихся в растворе, энергия в поле сил межмолекулярного взаимодействия определяется совокупностью постоянных дипольных моментов молекул, их окружающих, т. е. диэлектрической постоянной растворителя.

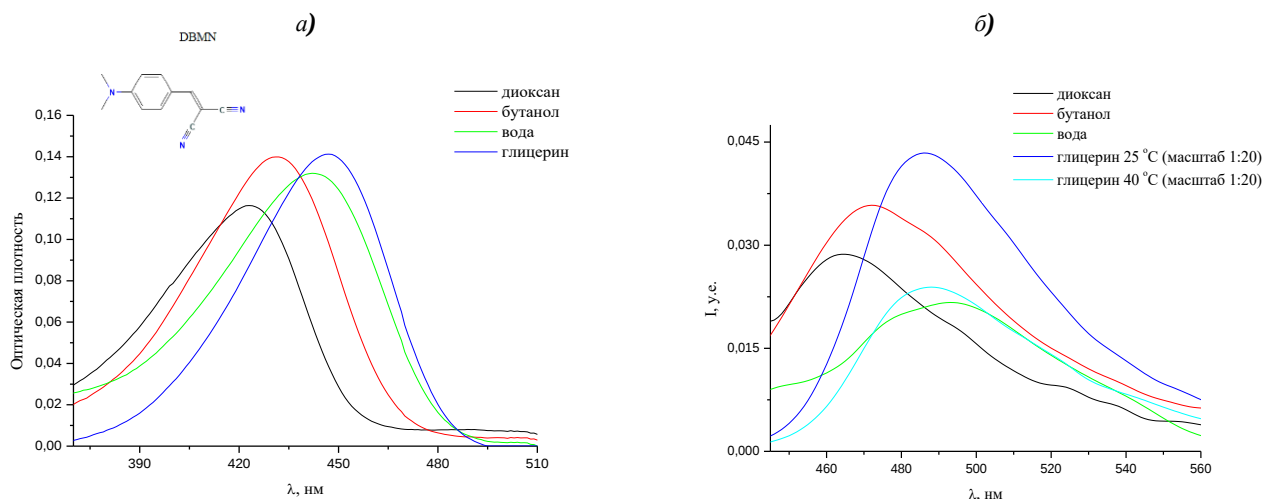


Рисунок 1 – Структурная формула, а также спектры поглощения диалкиламино-бензилиден-малонитрила (DBMN) показаны на рисунке (а); флуоресценция DBMN в различных растворителях – на рисунке (б)

Энергия молекулы понижается за счет межмолекулярных взаимодействий при переходе от неполярного растворителя к полярному растворителю (происходит стабилизация состояния). Поскольку в каждом стационарном состоянии молекула обладает определенными физическими характеристиками (формой, величиной дипольного момента, значением полярности), энергия межмолекулярных взаимодействий, зависящая от этих

характеристик, оказывается различной для каждого из состояний. Следовательно, каждый уровень при переходе от изолированной молекулы к полярному раствору понижается по-разному, что приводит к изменению расстояния между уровнями, т. е. к изменению частоты перехода (длины волны) [4; 5].

Диаграмма уровней с указанием изменений энергии состояний приведена на рисунке 2. В неполярных растворителях энергетический зазор между S_0 и S_1 велик и дипольный момент органической молекулы увеличивается умеренно, т. к. растворитель не стабилизирует зарядово-разделенное состояние (рисунок 2). В более полярных растворителях молекулы самого растворителя переориентируются вокруг молекулы органического красителя (ориентационная сольватация), стабилизируя его возбужденное состояние S_1 (энергия S_1 снижается). При переходе в возбужденное состояние вследствие переноса заряда дипольный момент молекулы, как правило, увеличивается. Это приводит к более значительному снижению энергии возбужденного состояния вещества по сравнению с основным состоянием, что приводит к батохромному сдвигу (красный сдвиг) спектра поглощения вещества. Таким образом, изменение энергии возбужденного состояния при переходе от неполярного к полярному растворителю оказывается более значительным, чем основного состояния ($\Delta E_2 > \Delta E_1$).

Можем предположить, что дипольный момент молекулы DBMN в возбужденном состоянии увеличивается, и этот факт объясняет батохромный сдвиг молекулы DBMN в полярных растворителях.

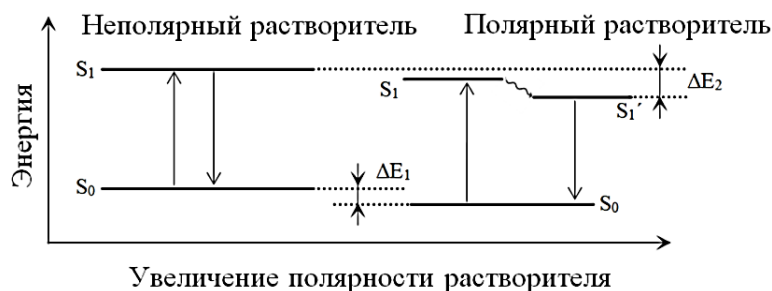


Рисунок 2 – Диаграмма уровней молекулы DBMN в основном и возбужденном состояниях в растворителях различной полярности

Молекула DBMN обладает выраженными донорно-акцепторными свойствами, которые определяют его уникальные спектральные характеристики. Ключевые особенности структуры молекулы DBMN: донор (D) – диалкиламинная группа ($-N(R)_2$), способная легко отдавать электроны; акцептор (A) – малонитрильная группа ($-C(CN)_2$), сильный электроноакцептор благодаря двум циано-группам; π -сопряженная система – бензольное кольцо или стильбеновый мостик, связывающий донор и акцептор. В возбужденном состоянии электрон делокализуется от диалкиламина (являющегося донором) к малонитрилу (акцептору) через π -сопряженную систему. В результате возбуждения молекулы возникает зарядово-разделенное состояние ($D^+ - \pi - A^-$), где донор частично положителен, а акцептор отрицателен. Если молекула в возбужденном состоянии имеет больший дипольный момент, чем в основном, то полярный растворитель снижает его энергию, что в свою очередь приводит к красному смещению (увеличению длины волны излучения). Батохромный сдвиг флуоресценции молекулы DBMN также предполагает эффективный перенос заряда. Так как полярные растворители в большей степени стабилизируют состояния с большим дипольным моментом за счет электростатических взаимодействий (ориентации диполей растворителя вокруг молекулы), наблюдается смещение спектра флуоресценции от ~464 нм в диоксане до ~493 нм в воде ($\Delta\lambda = 29$ нм, рисунок 1б).

В высоковязких средах (например, глицерин, рисунок 1б) интенсивность флуоресценции значительно увеличивается из-за уменьшения вероятности безызлучательных процессов; в этом случае основным каналом дезактивации возбужденного состояния является флуоресценция. Данный эффект хорошо заметен на рисунке 1б, так при повышении температуры растворителя (снижение вязкости глицерина) на 15° C интенсивность флуоресценции уменьшается практически в 2 раза (увеличивается вероятность безызлучательных переходов). Это позволяет использовать молекулы DBMN в качестве чувствительного зонда для анализа полярности и вязкости микроокружения.

В результате проведенных исследований спектров можно сделать вывод о том, что DBMN демонстрирует выраженную зависимость спектральных свойств от вязкости и полярности растворителя, что делает его полезным инструментом для изучения динамических процессов в химии, биологии и материаловедении.

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. Dyes with segmental mobility: molecular rotors / M. A. Haidekker [et al.] // Advanced Fluorescence Reporters in Chemistry and Biology I / Edited by: Demchenko A. – New York : Springe, 2010
4. Свердлова, О. В. Электронные спектры в органической химии / О. В. Свердлова. – 2-е изд. – Л. : Химия, 1985. – 248 с.
5. Введение в молекулярную спектроскопию / Н. Г. Бахшиев. – 2 изд. – Л., 1987. – 216 с.

In this work, the influence of solvent polarity and viscosity on the absorption and fluorescence spectra of dialkylamino-benzylidene-malononitrile (DBMN) was investigated. With increasing solvent polarity, a bathochromic shift (red shift) in both the absorption and fluorescence spectra was observed. The observed spectral shifts are explained based on the theory of intermolecular interactions.

Демяшкевич Игорь Анатольевич, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, digor84@gmail.com.

Чумаченко Даниил Михайлович, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, 25122011den@mail.ru.

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

УДК 544.653.23

В. В. ДУДИЧ, Л. П. ТОМАШЕВИЧ, А. В. ШЕВЕРДЕНКО, Г. Д. АРТЮШКЕВИЧ

САМООРГАНИЗАЦИЯ ЯЧЕЕК ПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ПРИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА АНОДИРОВАНИЯ

Процесс пористого анодирования алюминия используется для темплатного синтеза различных наноструктурированных материалов, а также при изготовлении различных электронных изделий. Проведено исследование процесса локального электрохимического анодирования алюминия в водном растворе серной кислоты. Анализ полученной структуры с помощью растрового электронного микроскопа показал, что она имеет пористую структуру, в которой достигается рекордное значение степени упорядочивания гексагональных ячеек. Степень упорядочивания данных структур составляет 95–98 %. Показано, что степень упорядочивания гексагональных ячеек увеличивается при увеличении анодного напряжения электрохимического процесса и толщины формируемых анодных пленок. Данный показатель открывает новые возможности для развития нанотехнологий, в частности, для темплатного синтеза наноструктурированных материалов.

Локальное пористое анодирование алюминия отличается от обычного пористого анодирования тем, что электрохимический процесс проводится не по всей поверхности алюминия, а по части поверхности, незакрытой маскирующим покрытием [1–4]. Данный процесс используется для формирования встроенной алюминиевой металлизации интегральных схем и различных полупроводниковых приборов [5–12].

При локализации процесса анодирования, за счет эффективного теплоотвода, выделяющегося джоулевого тепла, можно использовать более высокие значения анодного напряжения и анодной плотности тока, что в конечном итоге обеспечивает высокую степень самоупорядочивания гексагональных ячеек пористого оксида.

В данной работе пористый оксид алюминия формировали в водном растворе серной кислоты (0,1 М H_2SO_4) при напряжениях формовки 20–50 В. В качестве анодируемого материала использовалась алюминиевая фольга с маскирующим покрытием из ниобиевой пленки, осажденной на алюминий через теньевую маску. Структуру сформированного оксида исследовали при помощи растрового электронного микроскопа. Оценку уровня самоупорядочивания ячеек ($K_{\text{рег}}$) пористого оксида алюминия осуществляли методом вычисления количества ячеек с пентагональной, гексагональной и гентагональной организацией по формуле:

$$K_{\text{рег}} = \frac{n_6}{n} \cdot 100 \% = \frac{(n - n_5 - n_7)}{n} \cdot 100 \%,$$

где n_5 – количество ячеек с пентагональной организацией;

n_6 – количество ячеек с гексагональной организацией;

n_7 – количество ячеек с гентагональной организацией;

n – количество всех ячеек.

На рисунке 1 представлены фотографии продольного и поперечного сечений трубчатого оксида алюминия толщиной 100 мкм, полученные с помощью растрового электронного микроскопа. Данный оксид был получен методом локального электрохимического анодирования в электролите на основе водного раствора серной кислоты. Из данного рисунка видно, что большинство ячеек граничит с шестью соседними ячейками, т. е. имеют гексагональную структуру. Ячейки, не имеющие шести соседей, считаются дефектными. Данные ячейки на рисунке 1 отмечены пятиугольником. Из рисунка видно, что степень упорядочивания гексагональных структур

пористого оксида алюминия, который получен в электролите на основе водного раствора серной кислоты, составляет 95–98 %.

На рисунке 2 показана зависимость коэффициента регулярности формируемых пленок пористого оксида алюминия от их толщины при различных напряжениях формовки. Как видно из рисунка, при увеличении толщины формируемых пленок коэффициент регулярности увеличивается до значений 90–98 %. Увеличение напряжения формовки также способствует увеличению коэффициента регулярности.

В заключении следует отметить, что самоупорядоченные пленки оксидов вентильных металлов используются при темплатном синтезе различных наноматериалов [13; 14]. Полученные в данной работе пленки пористого оксида алюминия показали высокое значение коэффициента регулярности, что открывает новые возможности для развития нанотехнологий с использованием темплатного синтеза.

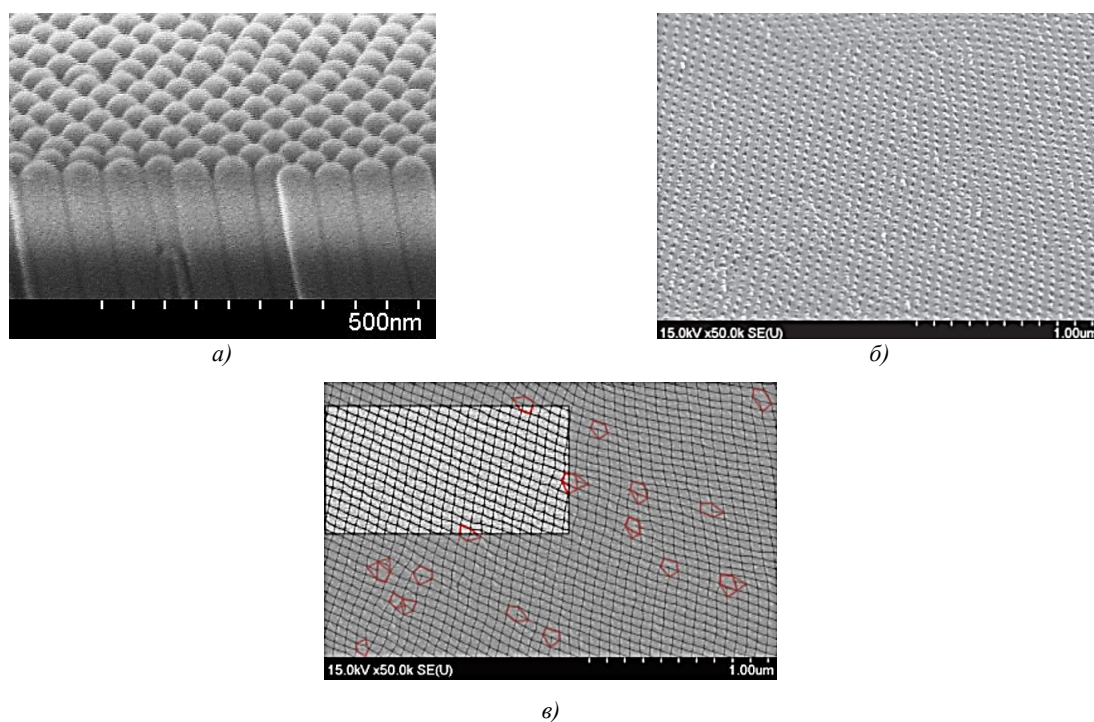


Рисунок 1 – Фотографии, полученные с помощью РЭМ, пористого оксида алюминия, сформированного в водном растворе серной кислоты: а – продольное сечение; б – поперечное сечение; в – поперечное сечение после идентификации дефектных ячеек (прямоугольный домен показывает участок гексагональных (бездефектных) ячеек)

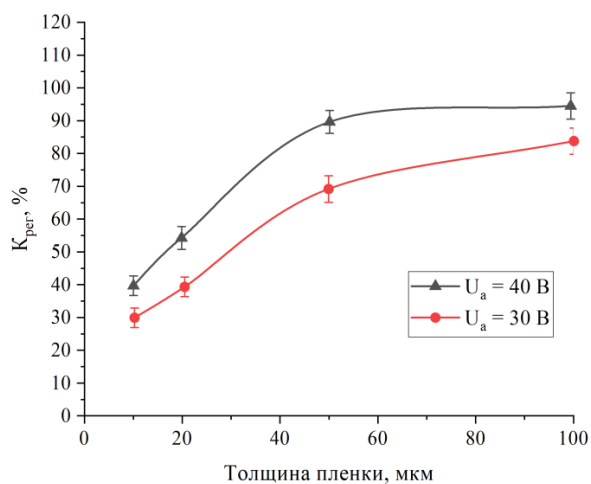


Рисунок 2 – Зависимость $K_{\text{рег}}$ ячеек пористого оксида алюминия от толщины формируемой плёнки для различных напряжений формовки

Список литературы

1. 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.
2. Lazarouk, S. K. Effect of the local electric field on the formation of an ordered structure in porous anodic alumina / S. K. Lazarouk, P. S. Katsuba, A. A. Leshok, V. B. Vysotskii // Technical Physics. – 2015. – № 60. – P. 1343–1347.
3. Lazarouk, S. K. Formation of Tubular Aluminum Oxides by Local Electrochemical Anodization in Organic Electrolytes and Their Anti – Reflection Properties / S. K. Lazarouk [et al.] // Doklady BGUIR. – 2024. – Vol. 21, № 6. – P. 21–28.
4. Lazarouk, S. K. Structure and element composition of anodic alumina films formed in high concentrated sulfuric electrolyte / O. V. Kupreeva, V. B. Vysotski, A. I. Chavychelau, A. S. Letoho // Doklady BGUIR. – 2014. – Vol. 81, № 3. – P. 5–11.
5. Lazarouk, S. K. Efficiency of Avalanche Light – Emitting Diodes Based on Porous Silicon / S. K. Lazarouk, A. A. Leshok, V. A. Labunov, V. E. Borisenko // Semiconductors. – 2005. – Vol. 39, № 1. – P. 136–138.
6. 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. Pershukovich, S. La Monica, G. Maiello // MRS Online Proceedings Library Archive. – 1994. – Vol. 358. – P. 659–664.
7. Lazarouk, S. Electroluminescence from Aluminum – Porous Silicon Reverse Bias Schottky Diodes Formed on the Base of Highly Doped n – Type Polysilicon / S. K. Lazarouk, V. Bondarenko, S. La Monica, G. Maello, G. Masini, P. Pershukovich, A. Ferrari // Thin Solid Films. – 1996. – Vol. 276. – P. 296–298.
8. Katsuba P. Stable Electroluminescence of Nanostructured Silicon Embedded into Anodic Alumina / P. Katsuba, P. Jaguiro, S. Lazarouk, A. Smirnov // Physica E: Low – dimensional Systems and Nanostructures. – 2009. – Vol. 41. – P. 931–934.
9. Optical characterization of reverse biased porous silicon light emitting diode / S. Lazarouk [et al.] // Materials Science and Engineering: B. – 2000. – № 69. – P. 114–117.
10. 3D silicon photonic structures based on avalanche LED with interconnections through optical interposer / S. K. Lazarouk [et al.] // International Journal of Nanoscience. – 2019. – Vol. 18, № 3–4. – P. 1940091.
11. 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.
12. Electroluminescence from nanostructured silicon embedded in anodic alumina / S. K. Lazarouk [et al.] // Semiconductors. – 2007. – Vol. 41. – P. 1109–1112.
13. 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.
14. Lazarouk, S. Effect of flattened surface morphology of anodized aluminum oxide templates on the magnetic properties of nanoporous Co/Pt and Co/Pd thin multilayered films / S. Lazarouk [et al.]. – 2018. – Vol. 427. – P. 649–655.

The process of porous anodization of aluminum is used for template synthesis of various nanostructured materials, as well as in the production of various electronic devices. A study was conducted on the process of localized electrochemical anodization of aluminum in an aqueous solution of sulfuric acid. Analysis of the resulting structure using a scanning electron microscope showed that it possesses a porous structure, achieving a record level of ordering in hexagonal cells. The degree of ordering of these structures is 95–98 %. It was shown that the degree of ordering hexagonal cells increases with an increase of the anode voltage at the electrochemical process and the thickness of the formed anode films. This indicator opens new opportunities for the development of nanotechnology, particularly for the template synthesis of nanostructured materials.

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

Томашевич Леонид Павлович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, lenya.tomashevich.forps@mail.ru.

Шеверденко Алексей Викторович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, 375257699525@inbox.ru.

Артюшкевич Глеб Дмитриевич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, glebarf61@gmail.com.

Научный руководитель – *Лазарук Сергей Константинович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, serg@nano.bsuir.edu.by.

УДК 544.22+537.31/.32

Я. Ю. ЖУРАВЛЁВА

СТРУКТУРА И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ КЕРАМИКИ $\text{Nd}(\text{Ba}, \text{Sr}, \text{Ca})\text{Fe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$

Выполнено исследование кристаллической структуры, микроструктуры, термической стабильности и проводимости слоистых перовскитов $\text{NdBaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ и $\text{NdBa}_{1/3}\text{Sr}_{1/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Fe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$. Изучено влияние изовалентного замещения бария стронцием и кальцием на структуру и свойства полученных соединений. Обнаружено, что указанное замещение приводит к росту термической стабильности и проводимости керамики.

Слоистые кобальтиты РЗЭ-бария $\text{LnBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ (Ln-Y , редкоземельный элемент) часто рассматриваются как электродные материалы среднетемпературных твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), что связано с их высокими значениями удельной электропроводности и электрохимической активности [1; 2]. ТОТЭ являются представителями альтернативной энергетики, работают на водороде или водородсодержащем топливе, их отличают высокая эффективность (КПД достигает 80 %) и экологичность, они широко используются как в промышленности, так и в бытовой сфере [1; 3]. Необходимость разработки новых катодов для ТОТЭ мотивирует улучшать слоистые кобальтиты, к сожалению, проявляющие значительное тепловое расширение, замещением кобальта другими 3d-металлами, бария – другими щелочноземельными элементами магнием, созданием дефицита катионов, а также получением композитов на их основе [1; 2; 4]. В последние годы для корректировки свойств слоистых перовскитов все чаще практикуется другой подход, связанный с получением средне- и высокоэнтропийных оксидов, в которых в одной или нескольких атомных позициях в равных долях находятся сразу несколько химических элементов [5–7]. Высокое значение конфигурационной энтропии обуславливает стабильность их сложной структуры и положительно влияет на их свойства [7]. В связи с вышесказанным, представляется интересным синтез слоистого перовскита $\text{NdBa}_{1/3}\text{Sr}_{1/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Fe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ и изучение его как с позиции изовалентного замещения бария, так и с позиции получения среднеэнтропийного оксида.

Образцы $\text{NdBaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ и $\text{NdBa}_{1/3}\text{Sr}_{1/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Fe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ получали растворным (цитратным) методом. Комплексообразователем выступала лимонная кислота. Содержание нитратов в реактивах контролировали с помощью комплексо-метрического титрования с трилоном Б. Смесь растворов нитратов и лимонной кислоты при перемешивании грели на магнитной мешалке, в результате чего получали гель, который сушили при $T = 400\text{--}473\text{ K}$. Образовавшийся порошок отжигали на воздухе при 873 K в течение 4 ч, прессовали и отжигали при 1173 K 8 ч. Отожженные образцы снова мололи, прессовали и спекали при 1273 K 9 ч.

Идентификацию кристаллической структуры выполняли методами рентгенофазового анализа (РФА) (дифрактометр Bruker D8, $\text{Cu-K}\alpha$ -излучение) и ИК-спектроскопии поглощения (ИК-Фурье спектрометр Nexus E.S.P.). Индекс кислородной нестехиометрии (δ) рассчитывали косвенно на основании данных йодометрического титрования [4]. Пористость определяли по геометрическим размерам и массе образцов [4]. Микротвёрдость измеряли по методу Виккерса с помощью микротвердомера AFFRI-MVDM8 (AFFRI). Термическую стабильность изучали на воздухе в интервале 300–1100 K (термо-аналитическая система TGA/DSC – 1/1600 HF, скорость нагрева 7,5 K/мин). Электропроводность измеряли согласно методике, описанной в литературе [8].

Согласно РФА, образец $\text{NdBaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ имел структуру тетрагонально искаженного перовскита (пр. гр. симм. $P4/mmm$) (рисунок 1а), а $\text{NdBa}_{1/3}\text{Sr}_{1/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Fe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ – кубического (пр. гр. симм. $Pm\bar{3}m$) (рисунок 1б). Оба образца содержали незначительное количество примесных фаз, причем второй образец был менее загрязнен, что может быть связано с влиянием энтропийного фактора, стабилизирующего структуру [7]. Значения параметров элементарной ячейки упали при замещении бария меньшими по размеру стронцием и кальцием, например, параметр (a) уменьшился от 3,912 до 3,836 Å. Данные ИК-спектроскопии подтверждают усиление связей в кристаллической структуре. Величины индекса кислородной нестехиометрии возросли от $\delta = 0,62$ до 0,81.

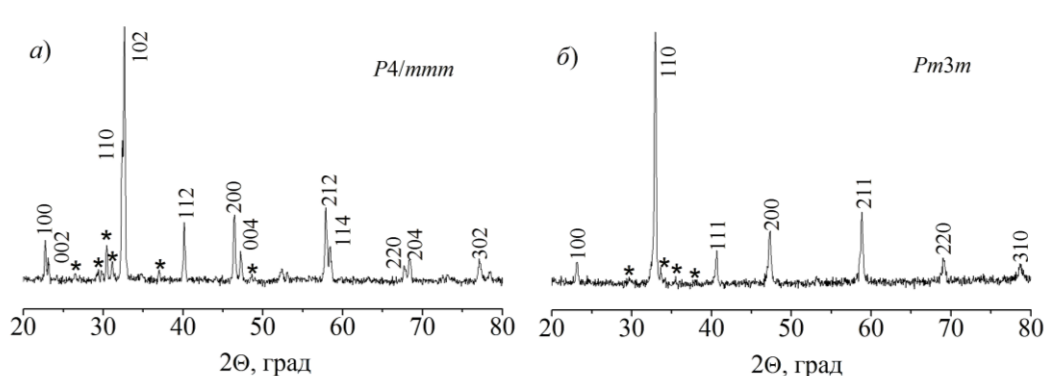


Рисунок 1 – Рентгеновские дифрактограммы порошков $\text{NdBaCo}_{2/3}\text{Fe}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ (а) и $\text{NdBa}_{1/3}\text{Sr}_{1/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Co}_{2/3}\text{Fe}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ (б). Символом * показаны пики примесных фаз

Пористость спеченной керамики при замещении уменьшилась от $\approx 30\%$ для базового состава до 9 %, 2 % для образца, содержащего стронций и кальций. Микротвёрдость замещенного образца составила 880 HV и существенно превысила значение для базового состава $\text{NdBaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ (150 HV). Изменение указанных параметров таким образом свидетельствует об улучшении спекаемости керамики.

Термический анализ показал, что оба образца после $T \approx 600\text{--}700\text{ K}$ теряли массу (до 1 %), что обусловлено выделением из них слабосвязанного кислорода. Термическая стабильность керамики $\text{NdBaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ после введения в нее ионов стронция и кальция возросла, о чем свидетельствует смещение температур начала потери массы в сторону больших величин.

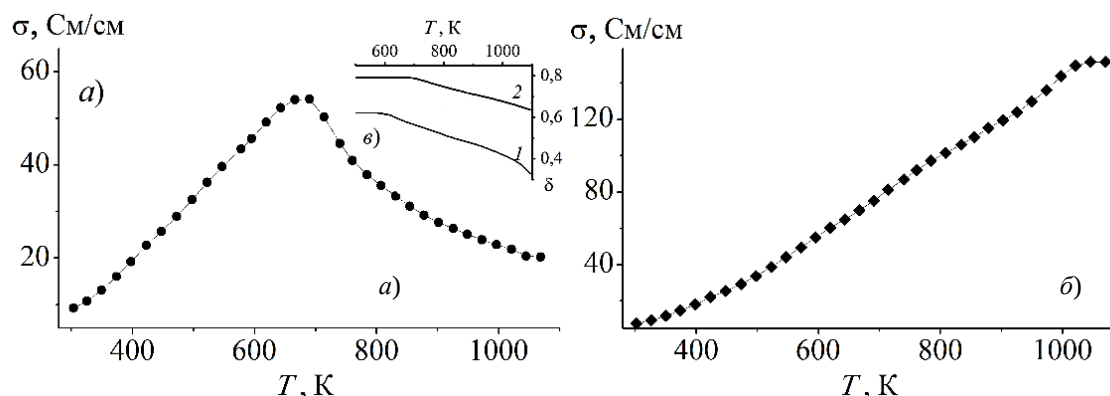


Рисунок 2 – Температурные зависимости электропроводности (а–б) и индекса кислородной нестехиометрии (в) керамики $\text{NdBaCo}_{2/3}\text{Fe}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ (а, 1) и $\text{NdBa}_{1/3}\text{Sr}_{1/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Co}_{2/3}\text{Fe}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ (б, 2)

Ход кривой электропроводности образца $\text{NdBaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ имел максимум (рисунок 2а), после которого полупроводниковый характер ($\partial\sigma/\partial T > 0$) зависимости сменялся на металлоподобный ($\partial\sigma/\partial T < 0$). Смена наклона кривой связана с выделением из образцов слабосвязанного кислорода (рисунок 2б) и уменьшением концентрации носителей заряда («дырок») [4]. Для более «плотного» образца $\text{NdBa}_{1/3}\text{Sr}_{1/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Co}_{2/3}\text{Fe}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ зависимость $\sigma = f(T)$ была полупроводниковой ($\partial\sigma/\partial T > 0$) во всем исследованном интервале температур. Электропроводность замещенного образца при повышенных температурах была существенно выше, чем у $\text{NdBaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$, и при 950 К составила 130 См/см, что в 5 раз выше, чем для базового состава при той же температуре (25 См/см). Рост проводимости при замещении бария стронцием и кальцием может быть связан с увеличением содержания слабосвязанного кислорода в образцах.

Таким образом, в работе изучены сложные оксиды $\text{NdBaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ и $\text{NdBa}_{1/3}\text{Sr}_{1/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Fe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$, определено влияние изовалентного замещения бария стронцием и кальцием на их структуру и свойства. Установлено, что указанное замещение улучшает спекаемость керамики, повышает ее термическую стабильность и удельную электропроводность.

Список литературы

1. Cathode Materials for Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells / J. Nisar [et al.] // *Fuels*. – 2024. – Vol. 5, № 4. – P. 805–824.
2. Doping strategy on improving the overall cathodic performance of double perovskite $\text{LnBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ ($\text{Ln} = \text{Pr}, \text{Gd}$) as potential SOFC cathode materials / F. Chen [et al.] // *J. Materiom.* – 2023. – Vol. 9, № 5. – P. 825–837.
3. Sikstrom, D. A tutorial review on solid oxide fuel cells: fundamentals, materials, and applications / D. Sikstrom, V. Thangadurai // *Ionics*. – 2024. – P. 1–26.
4. Клындюк, А. И. Структура и физико-химические свойства твердых растворов $\text{NdBa}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeCo}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$ ($0,00 \leq x \leq 0,40$) / А. И. Клындюк, Я. Ю. Журавлева // *Журнал неорганической химии*. – 2022. – Т. 67, № 12. – С. 1874–1880.
5. Stable High-Entropy Double Perovskite Cathode $\text{SmBa}(\text{Mn}_{0.2}\text{Fe}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_{0.2}\text{Cu}_{0.2})_2\text{O}_{5+\delta}$ for Intermediate – Temperature Solid Oxide Fuel Cells / Y. Ling [et al.] // *J. Chinese Ceram. Soc.* – 2022. – Vol. 50, № 1. – P. 219.
6. A – Site Engineering of the High – Entropy Perovskite $\text{Pr}_{0.4}\text{La}_{0.4}\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.4}\text{Ca}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_{5+\delta}$ Cathode for Intermediate – Temperature SOFCs / J. Yu [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2024. – Vol. 16, № 29. – P. 36224–36235.
7. High-entropy energy materials: challenges and new opportunities / M. Yanjiao [et al.] // *Energy Environ. Sci.* – 2021. – Vol. 14. – P. 2883–2905.
8. Klyndyuk, A. I. Structure, Thermal Expansion, and Electrical Properties of $\text{BiFeO}_3\text{--NdMnO}_3$ Solid Solutions / A. I. Klyndyuk, E. A. Chizhova // *Inorg. Mater.* – 2015. – Vol. 51. – P. 272–277.

The crystal structure, microstructure, thermal stability and electrical conductivity of $\text{NdBaFe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ and $\text{NdBa}_{1/3}\text{Sr}_{1/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Fe}_{2/3}\text{Co}_{2/3}\text{Cu}_{2/3}\text{O}_{5+\delta}$ layered perovskites were studied. The effect of isovalent substitution of barium with strontium and calcium on the structure and properties of the obtained compounds was studied. It was found that this substitution leads to an increase in the thermal stability and conductivity of the ceramics.

Журавлёва Яна Юрьевна, аспирант Белорусского государственного технологического университета, г. Минск, Республика Беларусь, ya.yu.zhuravleva@mail.ru.

Научный руководитель – Клындюк Андрей Иванович, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры физической, коллоидной и аналитической химии Белорусского государственного технологического университета, г. Минск, Республика Беларусь, klyndyuk@belstu.by.

ЭЛЕМЕНТНЫЙ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ TiCrN

Методом вакуумно-дугового осаждения при совмещении плазменных потоков титана и хрома переменной плотности сформированы градиентные покрытия Ti – Cr – N. Обнаружено, что при изменении плотности плазменных потоков титана и хрома формируются покрытия TiCrN с переменным распределением титана и хрома по глубине. Выявлено, что градиентные покрытия представляют собой твердые растворы замещения (Ti, Cr)N с переменной концентрацией металлических компонентов по глубине.

Нанокompозитные градиентные покрытия – это материалы, которые сочетают в себе преимущества нанотехнологий и плавного изменения свойств от одного слоя к другому. Они нужны для решения сложных задач в различных отраслях. В промышленности такие покрытия защищают поверхности от износа, коррозии и механических повреждений, значительно продлевая срок службы деталей и оборудования. В аэрокосмической и автомобильной промышленности они помогают создавать легкие, но прочные конструкции, устойчивые к экстремальным температурам и нагрузкам [1].

Покрyтия Ti – Cr – N синтезировали методом конденсации с ионной бомбардировкой поверхности образцов при совмещении плазменных потоков титана и хрома переменной плотности в остаточной атмосфере азота. Градиентные покрытия Ti – Cr – N получали при изменении плотности плазменных потоков титана и хрома, как показано в таблице 1. Толщина сформированных покрытий составила 0,7–0,9 мкм.

Таблица 1 – Режимы формирования покрытий TiCr

Режим	Ток горения дуги катода, А		Плотность плазменного потока, мА/см ²		Отношение плотностей j_{Ti}/j_{Cr}	Суммарная плотность $j_{Ti} + j_{Cr}$, мА/см ²	Время осаждения, мин.
	титан	хром	титан	хром			
1	100	100	7,6	9,6	0,8	17,2	1,50
2	60–100	100–60	2,5–7,6	9,6–3,2	0,3–2,4	12,1–10,8	2,25
3	100–60	60–100	7,6–2,5	3,2–9,6	2,38–0,3	10,8–12,1	2,25

Плотность плазменных потоков титана и хрома определяли, как плотность соответствующего ионного тока, т. к. для метода КИБ тугоплавкие металлы характеризуются высокой степенью ионизации испаренного материала (до 100 %). Результаты исследования элементного состава покрытий, полученные методом оже-электронной спектроскопии (ОЭС), представлены на рисунках 1–3.

Как видно из рисунков 1–3, покрытие, сформированное при режиме 1, состоит из двух слоев: приповерхностного и переходного. В первом слое концентрация титана, хрома и азота постоянная и равна приблизительно 29,21 и 50 ат. % (рисунки 1–3), соответственно. Покрытие, сформированное при режиме осаждения 2, имеет значительную разницу в элементном составе в сравнении с покрытием постоянного состава. Отличие заключается в изменяющейся концентрации титана и хрома в основном слое. В приповерхностном слое концентрация азота постоянная и равна приблизительно 50, титан и хром имеют переменную концентрацию. Концентрация титана постепенно увеличивается от 12 до 36 ат. %. Концентрация хрома также постепенно уменьшилась от 38 до 14 ат. %. Для режима формирования 3 видим схожие данные с образцом с переменной концентрацией элементов, как видно из рисунков 1–3. Концентрация азота постоянна и равняется приблизительно 50 ат. %. Концентрация титана уменьшается от 39 до 31 ат. %. Концентрация хрома увеличивается от 11 до 19 ат. %. Для покрытий TiCrN в области переходного слоя видна область с повышенной концентрацией хрома, сформированной при предварительной обработке ионами хрома.

Результаты исследования фазового состава тройных покрытий TiCrN представлены на рисунке 4. Известно, что нитриды титана и хрома образуют непрерывный ряд твердых растворов замещения на основе квазибинарной системы TiN – CrN, в решетке которой некоторое количество атомов титана замещено на атомы хрома. При этом угловое положение дифракционного пика полученного твердого раствора будет находиться между пиками, соответствующими моонитридам титана и хрома, смещенное в сторону того нитрида, концентрация которого в покрытии выше. Анализ рентгенограмм тройных нитридов TiCrN и углового положения дифракционных пиков, соответствующих отражениям от нитридов титана и хрома свидетельствует, что основной фазой в тройных покрытиях TiCrN является ГЦК твердый раствор замещения (Ti, Cr)N с кубической решеткой.

Для покрытия (режим 2) также обнаружено присутствие дополнительной нитридной фазы – TiN с гранцентрированной кубической решеткой, как видно из рисунка 4б. Для остальных режимов (1 и 3) присутствие дифракционных пиков, соответствующих отражениям от фаз бинарных нитридов титана и хрома, не обнаружено. На рентгенограммах также отсутствуют дифракционные пики оксида титана.

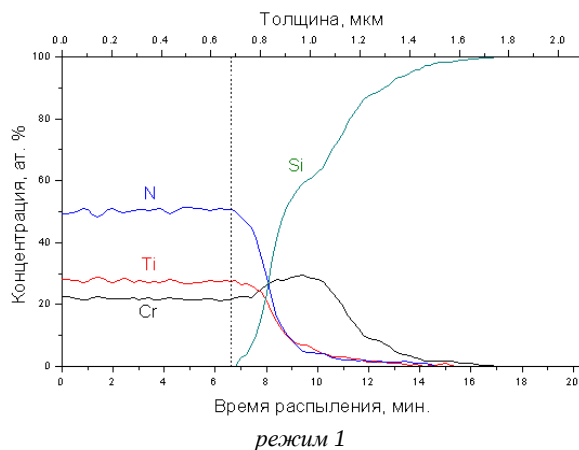


Рисунок 1 – Распределение элементов по глубине в покрытиях TiCrN, сформированных при различных режимах осаждения на кремниевой подложке

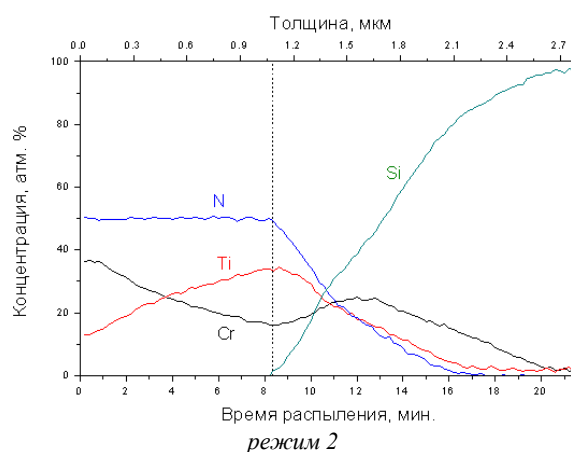


Рисунок 2 – Распределение элементов по глубине в покрытиях TiCrN, сформированных при различных режимах осаждения на кремниевой подложке

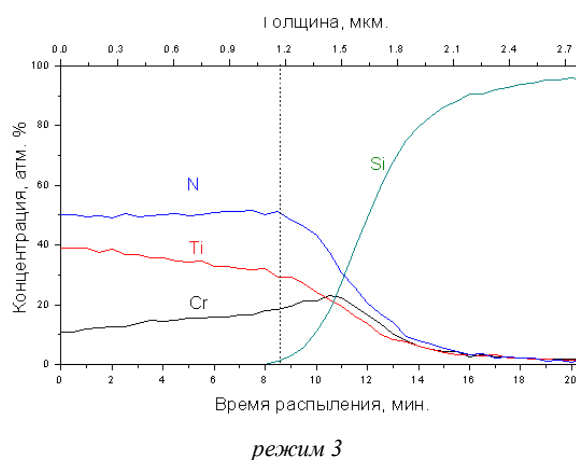


Рисунок 3 – Распределение элементов по глубине в покрытиях TiCrN, сформированных при различных режимах осаждения на кремниевой подложке

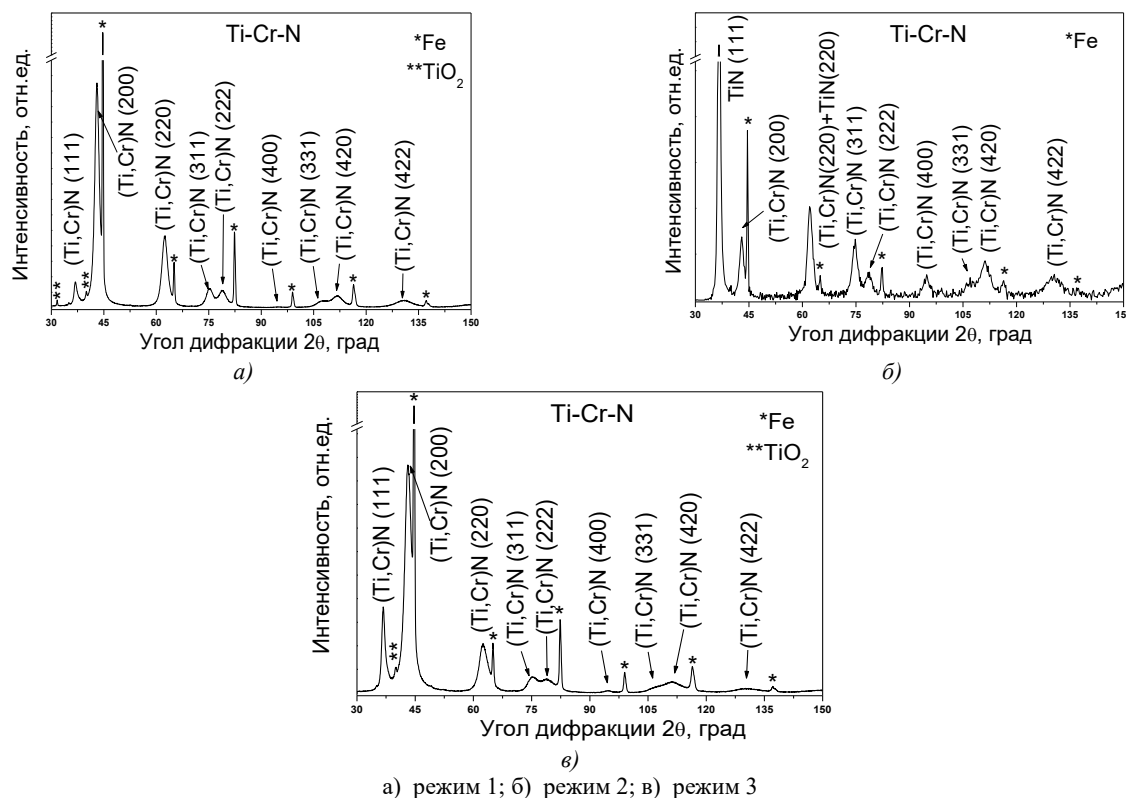


Рисунок 4 – Рентгенограммы покрытий TiCrN на стальной подложке

Таким образом, для покрытия, полученного при уменьшении j_{Ti} и увеличении j_{Cr} , как и для покрытия, сформированного при постоянных j_{Ti} и j_{Cr} , образуется однофазная система – ГЦК (Ti, Cr)N. А для покрытия, сформированного при увеличении j_{Ti} и уменьшении j_{Cr} , образуется двухфазная система: ГЦК (Ti, Cr)N + ГЦК TiN. В этом случае образование данной фазы происходит в области с высоким содержанием титана (приповерхностный слой, рисунок 3), в которой практически отсутствует хром, что обусловлено низкой j_{Cr} . Анализ полученных рентгенограмм и сравнение значений интенсивностей дифракционных линий с эталонными свидетельствует, что твердому раствору соответствует преимущественная ориентация (200), а нитриду титана – (111). Анализ рентгенограмм градиентных покрытий выявил увеличение ширины на полувысоте дифракционного пика (200) твердого раствора по сравнению с покрытием постоянного состава. Были проведены рентгеноструктурные исследования фазового состава градиентных покрытий по глубине.

По полученным при разных углах скольжения рентгеновского излучения α рентгенограммам был рассчитан параметр решетки твердого раствора (Ti, Cr)N и построены зависимости параметра решетки от угла падения (глубины проникновения рентгеновского пучка τ), как видно из рисунка 5. Значение параметра решетки твердого раствора (Ti, Cr)N тройных покрытий для всех глубин τ находится между значениями соответствующим моонитридам TiN и CrN, как видно из рисунка 5, что подтверждает формирование квазибинарной системы TiN – CrN (твердого раствора замещения) по всей глубине покрытия.

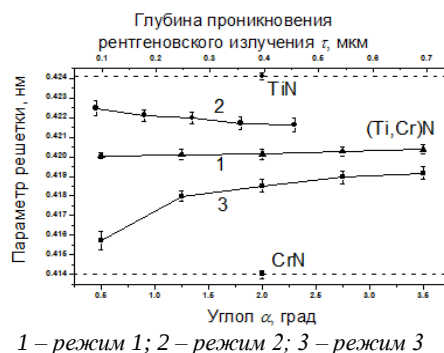


Рисунок 5 – Зависимость параметра решётки твёрдого раствора покрытий TiCrN от угла скольжения α (глубины проникновения τ) рентгеновского пучка

Анализ изменение параметра решетки (Ti, Cr)N твердого раствора тройных покрытий от глубины проникновения рентгеновского пучка выявил ряд закономерностей. Во-первых, параметр решетки твердого раствора градиентных покрытий изменяется с глубиной (рисунок 5, режим 2 и 3), а для покрытия постоянного состава остается постоянным (рисунок 5, режим 1).

Во-вторых, для режима Б1 параметр решетки уменьшается, а для режима Б2 увеличивается. Сравнение зависимости $a(\tau)$ с концентрационными профилями титана и хрома (рисунки 1–3) показывает, что рост (уменьшение) параметра решетки коррелирует с увеличением (снижением) концентрации титана в покрытии с глубиной. Формирование в градиентных покрытиях основной фазы – твердого раствора (Ti, Cr)N и корреляция между изменением параметра решетки твердого раствора с глубиной и концентрационными профилями титана и хрома свидетельствуют о формировании твердого раствора $Ti_xCr_{1-x}N$ с переменной концентрацией титана (x) и хрома по глубине. Уменьшение (рост) параметра решетки твердого раствора с увеличением τ коррелирует со снижением (увеличением) концентрации титана в твердом растворе от поверхности покрытия к подложке.

Методом вакуумного осаждения при изменении плотности плазменных потоков сформированы градиентные по составу покрытия TiCrN. Градиентные покрытия представляют собой твердые растворы замещения (Ti, Cr)N с переменной концентрацией металлических компонентов по глубине.

Список литературы

1. Xianting, Zeng. Development of graded Cr – Ti – N coatings / Zeng Xianting, Zhang Sam, Hsieh Joe // Surface and Coatings Technology. – 1998. – Vol. 102. – P. 108–112.

Gradient Ti – Cr – N coatings were formed by vacuum-arc deposition with the combination of titanium and chromium plasma flows of variable density. It was found that TiCrN coatings with variable distribution of titanium and chromium by depth are formed with changing density of titanium and chromium plasma flows. It was revealed that gradient coatings are solid substitution solutions (Ti, Cr)N with variable concentration of metallic components by depth.

Зазыбо Назар Андреевич, учреждение образования «Национальный детский технопарк», г. Минск, Республика Беларусь, zazybonn@gmail.com.

Научный руководитель – Злоцкий Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, Zlotski@bsu.by.

УДК 66955

Д. С. ЗЕМЛЯКОВ

ТВЁРДОСТЬ И СТРУКТУРА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al – Zn

Сплавы состава Al – Zn широко применяются в промышленности при изготовлении изделий и их покрытий. Это связано с хорошими прочностными характеристиками сплавов, мелкозернистой структурой и удобством их литья под давлением при сравнительно низких температурах. Данные сплавы имеют малую плотность, плохо растворяют в себе железо и стойки к окислению, что приводит к их широкому использованию в качестве покрытий изделий из различных марок стали. Ввиду этого исследование структурных и механических свойств системы Al – Zn представляет прикладной интерес.

В данной работе рассмотрена зависимость твёрдости сплавов системы от состава, структура некоторых сплавов, теоретически обоснованы наблюдаемые результаты. Твёрдость сплавов измерена методом Виккерса, изображения микроструктуры сплавов получено на растровом электронном микроскопе.

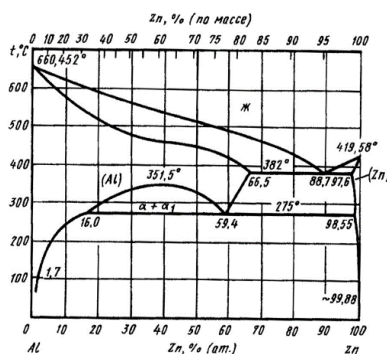
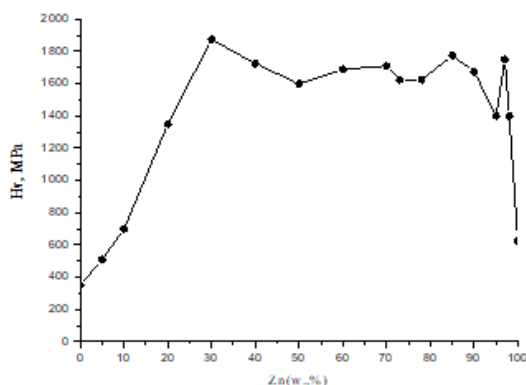
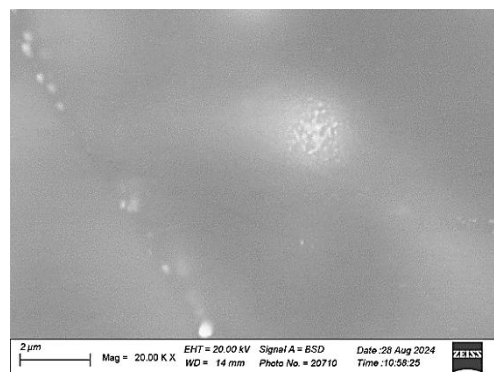
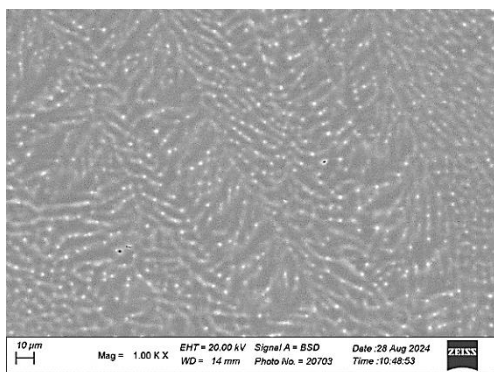
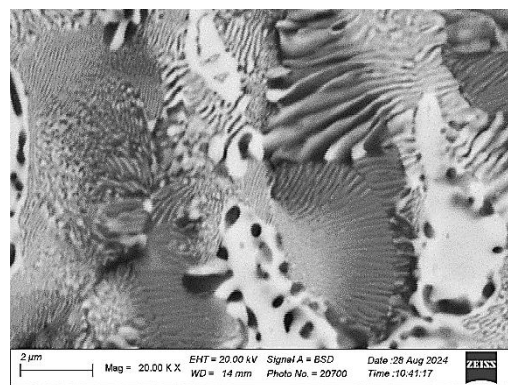
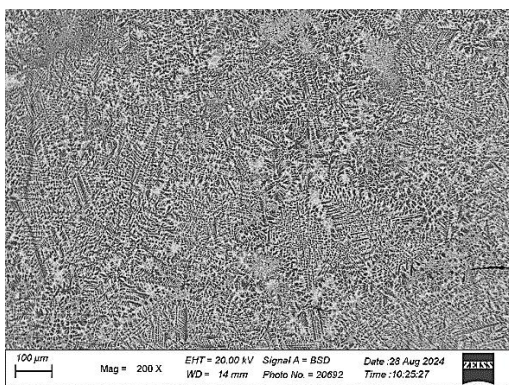


Рисунок 1 – Диаграмма состояний системы Al – Zn

Рисунок 2 – Зависимость твердости от содержания *Zn*

Анализируя диаграмму состояний и зависимость твердости от концентрации *Zn* в сплаве, можно прийти к выводу, что твердость сплава снижается в области спинодального распада и в приэвтектических областях. Это можно объяснить тем, что в обозначенных областях концентраций происходит выраженное расслоение материала на фазы и соответствующему росту межфазных границ. Рост твердости на краях концентраций *Zn* подтверждается результатами работ [7–13]. Механизмом роста твердости предполагается увеличение площади межфазной границы за счёт начального выделения второй фазы в сплаве.

Структура сплавов рассматривалась для сплавов с концентрациями *Zn*, равными 18,64,75 и 96 % по массе. Для сплавов с концентрациями *Zn* 64 и 75 % наблюдается дендритная структура: системы алюминиевых и вторичных цинковых дендритов, междендритное пространство заполнено эвтектикой. В сплавах с массовой долей *Zn* 64–96 % имеются мелкие выделения *Al* в обогащённой *Zn* фазе. Пользуясь диаграммой состояния системы и правилом рычагов несложно определить порядок кристаллизации и составы фаз при охлаждении расплава. Данный анализ показывает, что для любого, за исключением эвтектического, состава системы *Al* – *Zn* будет характерна дендритная структура. В работах [8; 11–13] отмечалось наличие дендритной структуры у двойных сплавов системы *Al* – *Zn*, что согласуется с полученными результатами. Структуры сплавов изображены на рисунках 3–6.

Рисунок 3 – Структура сплава с содержанием *Zn* 18 %Рисунок 4 – Структура сплава с содержанием *Zn* 64 %

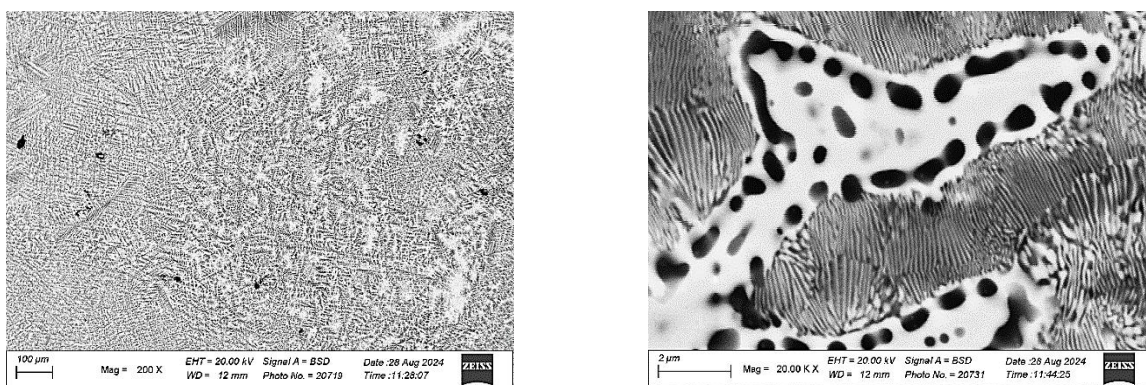


Рисунок 5 – Структура сплава с содержанием Zn 75 %

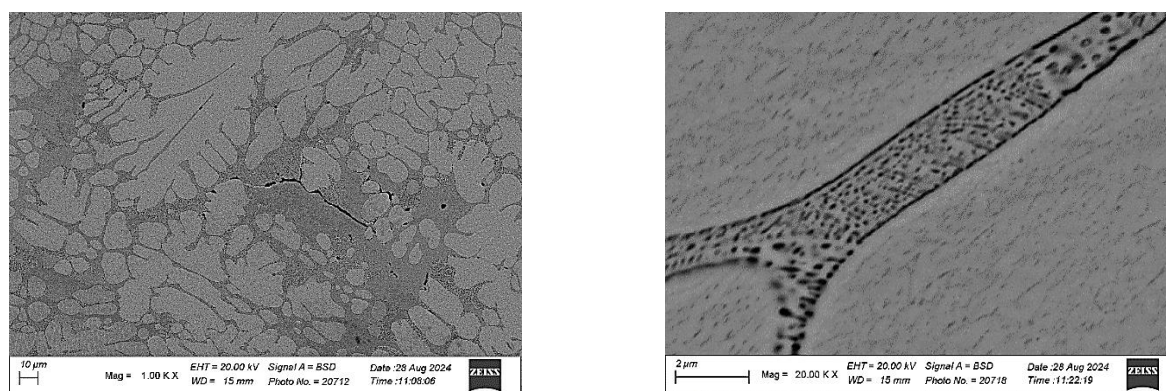


Рисунок 6 – Структура сплава с содержанием Zn 94 %

Список литературы

1. Углов, В. В. Современные функциональные материалы : пособие / В. В. Углов, В. Г. Шепелевич. – Минск : БГУ, 2020. – 263 с.
2. Шепелевич, В. Г. Структурно-фазовые превращения в металлах : пособие / В. Г. Шепелевич. – Минск : БГУ, 2021. – 203 с.
3. Фридман, Я. Б. Механические свойства металлов : в 2 ч. Ч. 1. Деформация и разрушение / Я. Б. Фридман. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1974. – 473 с.
4. Золоторевский, В. С. Механические свойства металлов : учеб. / В. С. Золоторевский. – 2-е изд. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.
5. Бернштейн, М. Л. Механические свойства металлов / М. Л. Бернштейн, В. Ф. Займовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1979.
6. Диаграмма состояния двойных металлических систем : справ. : в 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М. : Машиностроение, 1996. – Т. 1.
7. Savaskan, T. Developing aluminium – zinc – based a new alloy for tribological applications / T. Savaskan, O. Bican, Y. Alemdag // J Mater Sci. – 2009. – 26 February.
8. Alemdag, Y. Mechanical and tribological properties of Al – 40Zn – Cu alloys / Y. Alemdag, T. Savaskan // Tribology International. – 2008. – 6 June.
9. Bayraktar, Ş. Effect of Zinc Content and Cutting Tool Coating on the Machinability of the Al(5–35) Zn Alloys / Ş. Bayraktar, A.P. Hekimoğlu // Metals and Materials International. – 03.01.2020.
10. Gaber, A. Mechanical and resistometry studies on Al – Zn alloys / A. Gaber // Journal Of Materials Science : Materials in electronics. – 1990 – P. 137–142.
11. Ilangovan, S. Effect of Zn and Cu Content on Microstructure, Hardness and Tribological Properties of Cast Al – Zn – Cu Alloys / S. Ilangovan, S. Arul, A. Shanmugasundaram // International Journal of Engineering Research in Africa. – 15.12.2016.
12. Microstructures and Mechanical Properties of Binary Al – Zn Alloys Fabricated by. Casting and Heat Treatment / W. B. Zhou // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2017. – 4 August.
13. Effect of the microstructure of Zn – Al and Zn – Al – Mg model alloys on corrosion stability / T. Proseka [et al.]. – Elsevier, 22.04.2001.

Al – Zn alloys are widely used in industry for manufacturing products and their coatings. This is due to the good strength characteristics of their alloys, fine-grained structure and ease of their die casting at relatively low temperatures. These alloys have low

density, poorly dissolve iron and are resistant to oxidation, which leads to their widespread use as coatings for products made of various grades of steel. In view of this, the study of the structural and mechanical properties of the $Al - Zn$ system is of applied interest. This paper examines the dependence of the hardness of the system's alloys on the composition, the structure of some alloys, and theoretically substantiates the observed results. The hardness of the alloys was measured by the Vickers method, and the images of the microstructure of the alloys were obtained using a scanning electron microscope.

Земляков Дмитрий Сергеевич, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, zemlakovdima333@gmail.com.

Научный руководитель – *Шепелевич Василий Григорьевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, shepelevich@bsu.by.

УДК 538.1:548

З. М. ЗОКИРОВА, М. З. ШАРИПОВ, Ш. К. НИЗОМОВА

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ C_3 СИММЕТРИИ НА ДОМЕННУЮ СТРУКТУРУ БОРАТА ЖЕЛЕЗА

Приведены результаты влияния механических напряжений C_3 симметрии на доменную структуру, магнитное состояние и процесс технического намагничивания легкоплоскостного слабого ферромагнетика бората железа ($FeBO_3$). Показано, что возникающие в кристалле напряжения приводят к существенному изменению его основных магнитных характеристик (коэрцитивной силы, начальной магнитной восприимчивости, формы петли гистерезиса).

Поиск путей создания нужного вида доменных конфигураций с заданной совокупностью статических и динамических свойств привел к более глубокому экспериментальному и теоретическому изучению доменных структур, как в ферромагнетиках, так и в других магнитоупорядоченных средах. Исследования, выполненные за последние десятилетия, привели к открытию новых типов доменов и доменных стенок и связанных с ними новых эффектов, а также к более ясному пониманию физических механизмов, формирующих доменную структуру магнитоупорядоченной среды. В частности, было установлено, что физика магнитных доменов вплотную соприкасается с физикой нелинейных явлений, с физикой примесных состояний, с физикой фазовых переходов и т. д., после чего стало очевидно, что исследования доменных структур имеют не только прикладное значение, но и представляют значительный интерес с точки зрения фундаментальной науки [1; 2].

Борат железа практически единственный из прозрачных в видимой области спектра кристаллов, имеющий спонтанный магнитный момент при комнатной температуре. Сочетание этих свойств делает $FeBO_3$ перспективным материалом для использования в качестве активной среды в элементной базе различных приборов интегральной оптики. В качестве метода исследований влияния механических напряжений на доменную структуру и основные магнитные свойства кристалла $FeBO_3$ использовалась магнитооптическая визуализация доменной структуры этого слабого ферромагнетика и ее эволюция под действием механических напряжений, температуры и внешнего магнитного поля.

Для создания в кристалле напряжений симметрии C_3 образец приклеивался к шайбе так, как показано на рисунок 1, а. На основании рисунка 1, в можно заключить, что возникающие напряжения наводят в $FeBO_3$ так называемую вращающуюся анизотропию, ось которой поворачивается в базисной плоскости, описывая некоторую замкнутую кривую вокруг геометрического центра кристалла. Последнее приводит к преобразованию его доменной структуры (ДС) из 180° -й в ДС с границами между доменами, составляющими между собой угол $\sim 120^\circ$ и ориентирующимися вдоль направлений, перпендикулярных C_2 -осям, существовавшим в кристалле в отсутствии напряжений [3].

При этом каждый домен разделен по толщине кристалла на два слоя с антипараллельными векторами m . Следует отметить, что в отличие от обычной 120° -й ДС, где угол между векторами m в соседних доменах постоянен вдоль доменной границы, в наблюдаемой ДС «приклеенного» образца вследствие пространственной неоднородности возникающих напряжений (рисунок 1а) ориентация векторов m по обе стороны от доменной границы меняется вдоль ее длины.

Из общих физических представлений о намагничивании многодоменного кристалла известно, что механические напряжения увеличивают его неоднородность и, как следствие, вызывают рост коэрцитивной силы H_c , что наблюдается экспериментально. В частности, из сравнения зависимостей $F(H)$, полученных при $T = 80$ К (рисунок 2), было установлено, что петли гистерезиса «приклеенного» образца характеризуются большей коэрцитивностью, причем при намагничивании вдоль X -оси величина H_c оказывается больше, чем при $H \perp X$ (для «ненапряженного» кристалла в пределах ошибок эксперимента H_c не зависит от ориентации H и практически не меняется с температурой) (рисунок 2б) [4]. Кроме того, при квазистатическом режиме развертки магнитного поля вид кривой $F(H)$ существенно меняется в зависимости от направления намагничивания: зависимость $F(H)$

«приклеенного» образца, наблюдаемая при $H \perp X$, при выходе на насыщение имеет практически «безгистерезисный» квазилинейный участок, отсутствующий у кривой $F(H)$, полученной при $H \parallel X$ (рисунок 2а).

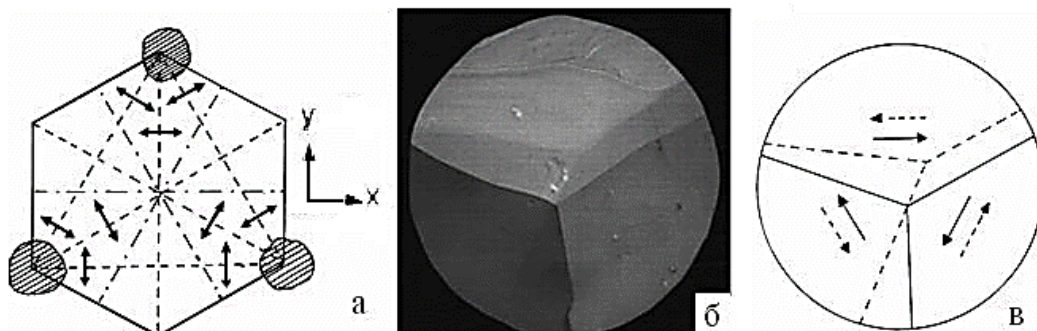


Рисунок 1 – Схематическое изображение исследованного образца (а), доменная структура (б) и ориентация векторов m в различных доменах (в) при $T = 80$ К (сплошными линиями и сплошными стрелками показаны соответственно доменные границы и направления вектора m в верхнем доменном слое, пунктирными линиями и пунктирными стрелками – то же в нижнем доменном слое)

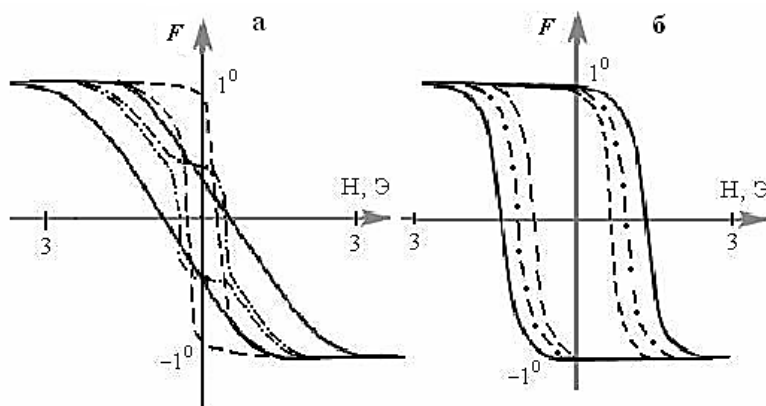


Рисунок 2 – Полевые зависимости эффекта Фарадея в FeBO_3 , полученные при:
а – квазистатическом режиме намагничивания, б – при перемагничивании кристалла с частотой 95 Гц.
Пунктирная линия – зависимость $F(H)$
для «ненапряжённого» кристалла, сплошная и штрих – пунктирная линии – зависимости $F(H)$
для «приклеенного» образца, наблюдаемые при $T = 80$ К при ориентации поля $H \parallel X$ и $H \perp X$ соответственно

Если считать, что направление m в каждом домене не меняется по всей площади домена, то подставляя значения углов между векторами m и H в (1), для давления, действующего на ДГ, получим:

$$|P(H \parallel X)| = mH |\cos 0^\circ - \cos 60^\circ| = \frac{1}{2}mH,$$

$$|P(H \perp X)| = mH |\cos 90^\circ - \cos 30^\circ| = \frac{\sqrt{3}}{2}mH,$$

т. е. при прочих равных условиях для начала необратимого смещения доменных границ при $H \perp X$ требуется поле примерно в 1,7 раза меньше, чем при $H \parallel X$. С учетом соотношения $H_c \propto \frac{1}{P}$ следует: $H_c(H \parallel X) \approx 1,7 H_c(H \perp X)$, что коррелирует с результатами нашего эксперимента, согласно которым

$$\frac{H_c(H \parallel X)}{H_c(H \perp X)} \approx 1,5.$$

Таким образом, можно заключить, что наличие в базисной плоскости кристалла FeBO_3 механических напряжений S_3 – симметрии приводит к перестройки его доменной структуры из 180-ти в 120-ти градусную, в которой в отличие от обычной доменной структуры вектор спонтанной намагниченности плавно изменяет свой азимут в базисной плоскости вдоль направления доменных границ. А также возникновение 120-ти градусной доменной структуры приводит к существенному росту магнитной анизотропии в базисной плоскости напряженного кристалла, что приводит к изменению его магнитной восприимчивости и кривой намагничивания.

Список литературы

1. Привороцкий, И. А. Термодинамическая теория ферромагнитных доменов / И. А. Привороцкий // УФН. – М., 1972. – Т. 108, № 1. – С. 43–80.
2. Scott, G. B. Magnetic domain properties of FeBO_3 / G. B. Scott // J. Phys. D: Appl. Phys. – London, 1974. – Vol. 7, № 11. – P. 1574–1587.
3. Магнитооптический метод исследования пространственной магнитной неоднородности легкосплавных антиферромагнетиков со слабым ферромагнетизмом / С. Р. Бойдедаев [и др.] // Оптика и спектроскопия. – СПб., 2008. – Т. 104. – № 4. – С. 670–676.
4. Джураев, Д. Р. Влияние напряжений гексагональной симметрии на доменную структуру и процесс намагничивания монокристалла FeBO_3 / Д. Р. Джураев, М. З. Шарипов // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2009. – Т. 11, № 3. – С. 212–218.

The article presents the results of the influence of mechanical stresses of C3 symmetry on the domain structure, magnetic state and process of technical magnetization of the easy-plane weak ferromagnet iron borate (FeBO_3). It is shown that the stresses arising in the crystal lead to a significant change in its main magnetic characteristics (coercive force, initial magnetic susceptibility, hysteresis loop shape).

Низомова Шахноза Кахрамоновна, аспирант Бухарского государственного университета, г. Бухара, Узбекистан, shahnozanimova39@gmail.com.

Зокирова Зархал Мирзоевна, студент Бухарского государственного университета, г. Бухара, Узбекистан, zokirovazarhal@gmail.com.

Научный руководитель – *Шарипов Мирзо Зокирович*, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Бухарского государственного университета, г. Бухара, Узбекистан, m.z.sharipov@buxdu.uz.

УДК 538.91

А. С. КИРКОВ

СТРУКТУРА НИТРИДА ЦИРКОНИЯ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Изучено изменение структурного состояния нитрида циркония при высокотемпературном воздействии. Оценено содержание нитрида циркония в исследуемом образце до и после высокотемпературного воздействия. Измерена микротвёрдость покрытия из нитрида циркония до и после высокотемпературного воздействия.

Покрyтия из нитрида циркония, благодаря своей высокой твёрдости, химической инертности и высокой износостойкости, активно применяются как защитные покрытия, а также в качестве функциональных слоёв устройств в твердотельной электронике [1]. Кроме того, цирконий и его сплавы широко применяются в атомной энергетике в качестве материала для создания оболочек тепловыделяющих элементов ядерного реактора [2]. В данных областях применения для материалов существенно важна термическая стабильность при воздействии на них высокой температуры в окислительной среде. При долгом высокотемпературном воздействии свойства материала могут существенно измениться, что происходит из-за процесса окисления, приводящего к изменению фазовой структуры, поэтому важно изучить поведение нитрида циркония при таком воздействии и изучить кинетику процессов, происходящих в материале, для дальнейших попыток модификации нитрида циркония, позволивших в будущем повысить его термическую стабильность.

В работе использовались образцы титана, на поверхность которого наносилось покрытие нитрида циркония толщиной около 4 мкм. Полученные образцы отжигались в муфельной печи при атмосферном давлении. В качестве рабочей температуры были выбраны значения в 400 °C и 600 °C. Температура в 400 °C была выбрана как средняя температура теплоносителя в ядерном реакторе. Температура в 600 °C взята как температура, при которой, по известным данным [3], окисление нитрида циркония происходит существенно быстрее. Время отжига при 400 °C достигло 21 часа. Точность поддержания температуры составляла ± 10 °C. Охлаждение образцов проходило вне печи при комнатной температуре. Фазовый состав образцов нитрида циркония после окисления на воздухе определяли методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Ultima IV Rigaku в геометрии параллельных пучков (фокусировка Брэгга – Брентано) при длине волны рентгеновского излучения 0,154178 нм. Рентгеновские дифрактограммы записывались в диапазоне углов дифракции 2θ от 20° до 100° с шагом 0,05° при скорости движения детектора 2 град/мин. Кроме того, в работе измерялась микротвёрдость покрытия нитрида циркония до и после высокотемпературного воздействия. Микротвёрдость определялась по методу Виккерса с нагрузкой 50 г.

При проведении фазового анализа с помощью рентгеноструктурного анализа в исследуемом образце обнаружены фазы титана и нитрида циркония (рисунок 1).

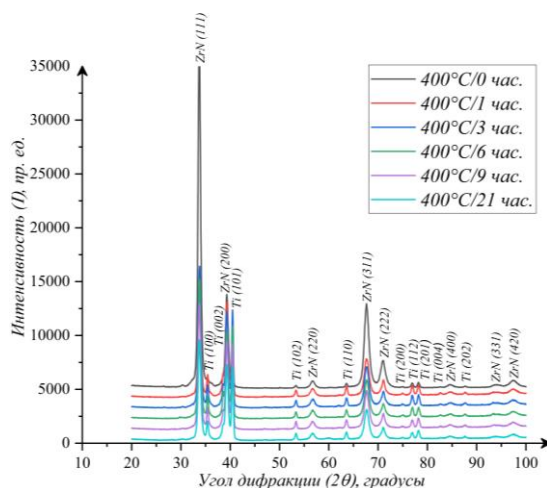


Рисунок 1 – Рентгеновские дифрактограммы ZrN/Ti после высокотемпературного воздействия

На рентгенограммах можно увидеть снижение интегральной интенсивности дифракционных линий нитрида циркония с увеличением времени отжига при температуре 400 °С, что указывает на уменьшение его объемного содержания в образце.

Для того, чтобы оценить изменение содержания нитрида циркония был введен параметр относительной интенсивности $\gamma = \frac{\sum I_{ZrN}}{\sum I_{ZrN} + I_{Ti}}$. Так как интегральная интенсивность дифракционных линий пропорциональна содержанию той или иной фазы в исследуемом образце, то по эволюции параметра γ со временем отжига (рисунок 2) можно судить и об изменении концентрации нитрида циркония.

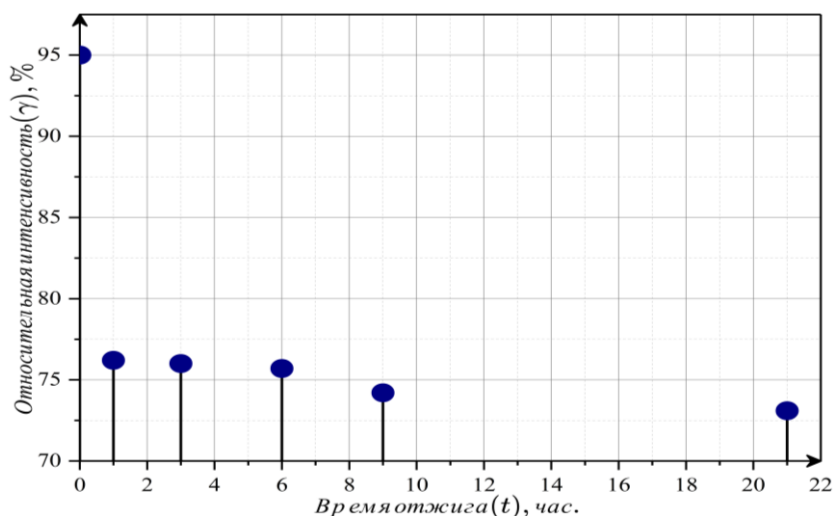


Рисунок 2 – Зависимость относительной интенсивности максимумов ZrN от времени отжига

На графике видно, что максимальное изменение параметра γ достигается после первого часа отжига, в дальнейшем же наблюдается лишь незначительное его уменьшение.

Также по методу Викерса была измерена микротвёрдость покрытия нитрида циркония без отжига при нагрузке в 50 г: $H_D = (1089 \pm 24)$ HV, $\varepsilon = 2$ %; $d_1 = (9,35 \pm 0,41)$ μm , $\varepsilon = 4$ %; $d_2 = (9,09 \pm 0,46)$ μm , $\varepsilon = 5$ %. После 21 часа отжига Микротвёрдость исследуемого образца имела значения: $H_D = (1075 \pm 39)$ HV, $\varepsilon = 4$ %; $d_1 = (9,32 \pm 0,40)$ μm , $\varepsilon = 4$ %; $d_2 = (9,11 \pm 0,32)$ μm , $\varepsilon = 4$ %. Таким образом, из полученных данных можно заметить, что Микротвёрдость нитрида циркония после 21 часа отжига при температуре 400 °С уменьшается незначительно.

Кроме того, для титана и нитрида циркония были посчитаны параметры кристаллической решетки, исходя из положения дифракционных линий. Для нитрида циркония использована дифракционная линия, соответствующая фазе ZrN(420), для титана – две дифракционные линии, соответствующие фазам Ti(112) и Ti(201). Значение параметра для кубической решетки нитрида циркония и параметров a и c гексагональной решетки

титана со временем не изменилось: $a = (4,584 \pm 0,004) \text{ \AA}$, $\varepsilon = 0,008 \%$; $a = (2,925 \pm 0,0001) \text{ \AA}$, $\varepsilon = 0,004 \%$, $c = (4,651 \pm 0,0002) \text{ \AA}$, $\varepsilon = 0,004 \%$.

Аналогичные исследования проводились с образцом нитрида циркония после отжига с температурой 600 °С.

Таким образом, в работе показано поведение нитрида циркония при высокотемпературном воздействии 400 °С и 600 °С. Оценено изменение концентрации нитрида циркония и таких его свойств, как микротвёрдость и параметры кристаллической решетки после 21 часа отжига при температуре 400 °С.

Список литературы

1. Investigations on the oxidation of zirconium nitride films in air by nuclear reaction analysis and backscattering spectrometry / G. L. N. Reddy [et al.] // Applied Surf. Sci. – 2007. – Vol. 253. – P. 7230–7237.
2. Окисление циркониевого сплава, обработанного компрессионными плазменными потоками / В. И. Шиманский [и др.] // Поверхность. Рентген., синхротрон, и нейтрон. исслед. – 2022. – № 4. – С. 93–101.
3. Войтович, Р. Ф. Окисление карбидов и нитридов / Р. Ф. Войтович. – Киев : Наук. думка, 1981. – 192 с.

There sultsof studying zirconium nitride under high – temperature influence of 400 °С and 600 °С are presented. The change in the concentration of zirconium nitride and its properties such as microhardness and lattice parameters after 21 hours of annealing at 400 °С was evaluated.

Киркоров Алексей Сергеевич, студент 3 курса Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, ptttrrrffgd@gmail.com.

Научный руководитель – *Шиманский Виталий Игоревич*, кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, shymanskiv@mail.ru.

УДК 538.911

А. А. КОРХОВ

ПОЛУЧЕНИЕ ВОЛЬФРАМ-МЕДНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ

Образцы вольфрама с покрытиями из меди и меди с цирконием обрабатывались компрессионными плазменными пучками (КПП) с целью получения вольфрам-медных сплавов.

В реализации международного проекта термоядерного реактора ИТЕР вольфрам, как конструкционный материал, выбран для покрытия разнообразных элементов дивертора, а также, рассматривается вопрос применения вольфрама в создании первой стенки термоядерного реактора – токамака [1]. Помимо применения в реакторах с магнитным удержанием плазмы, активно реализуются проекты создания реакторов для ядерного синтеза с инерциальным удержанием плазмы, установка NIF в Ливерморской Национальной лаборатории им. Лоуренса, где вольфрам рассматривается как материал узлов и деталей камеры установки [2]. В связи с этим активно ведутся работы по испытанию материалов под воздействием высоких тепловых и плазменных нагрузок, однако помимо реакций конструкционного материала, обусловленных непосредственным плазменным воздействием, таких как деградация структурно-фазового состояния (дуговая эрозия, появление микротрещин, плейтлетов и блистеров, и т. д.), деградация физико-механических свойств и значительное снижение радиационной стойкости материала, существенно также влияние облучения нейтронами в DT-реакции, способного вызвать реакции с образованием водорода, гелия и других элементов, и последующего облучения их ионами [1; 3; 4].

Для борьбы с нежелательной деградацией и дуговой эрозией вольфрама и улучшением его радиационной стойкости, в настоящее время активно продвигаются идеи предварительной ионной модификации поверхности [5; 6]. Так для упрочнения поверхности и износостойкости прибегают к использованию обработки высокотемпературной импульсной плазмы и компрессионных плазменных пучков [5; 6].

В данной работе рассматривается влияние обработки компрессионными плазменными потоками (КПП) на структуру поверхностного слоя после легирования цирконием и медью.

Таким образом ожидается улучшение не только физико-механических свойств (увеличение твердости и износостойкости поверхностного слоя), но и повышение стойкости к окислению при высоких температурах, теплопроводности, радиационной и эрозионной стойкости.

В работе исследовался образец технически чистого вольфрама размером 10×10 мм и толщиной 2 мм, который обрабатывался компрессионными плазменными потоками (КПП), генерируемыми в магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии в среде остаточного газа (азота) при давлении 400 Па. Длительность разряда составляла 100 мкс. Напряжение на системе конденсаторов составляло 4,0 кВ. Воздействие КПП с предварительным нанесением покрытий меди и циркония позволило сформировать в образцах вольфрама приповерхностный слой, легированный соответствующими металлами.

Фазовый состав модифицированного приповерхностного слоя изучался с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Rigaku Ultima IV в медном излучении $\text{CuK}\alpha$ (длина волны 0,154178 нм). Съёмка велась в геометрии скользящего пучка под углом $\alpha = 5^\circ$. Это позволило анализировать тонкий приповерхностный слой, сопоставимый с глубиной имплантации ионов гелия.

На рисунке 1 (а и б) приведены рентгенограммы образцов вольфрама с покрытием меди (рисунок 1а) и покрытиями циркония и меди (рисунок 1б). Из рисунка 1 видно, что образования новых фаз вольфрама и меди не наблюдается, только один дифракционный максимум оксида меди, что может говорить об окислении только меди, но не вольфрама. На рисунок 2 помимо различных аллотропных модификаций циркония, можно заметить дифракционные максимумы нитрида циркония, также оксидная фаза CuWO_4 .

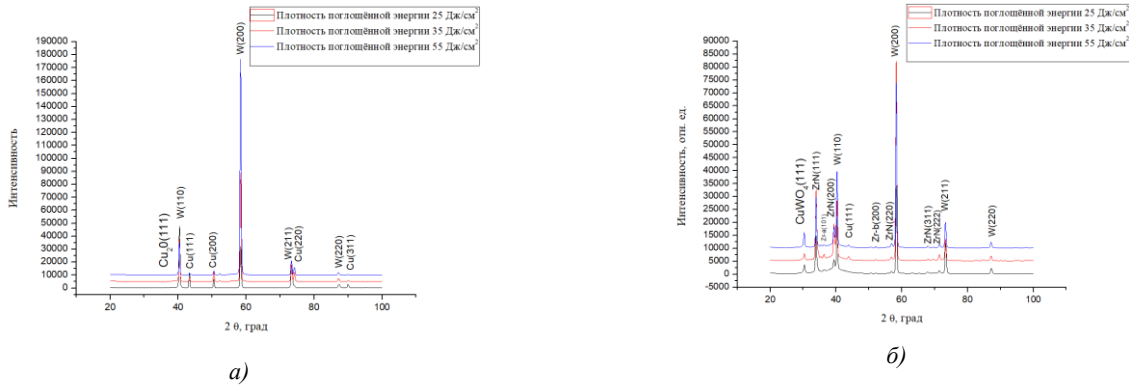


Рисунок 1 – Рентгенограммы образцов вольфрама с покрытием меди (а) и с покрытиями циркония и меди (б), облучённых КПП

Из рисунка 2 можно наблюдать зависимость глубины расплавленного слоя от температуры в разных образцах вольфрама. Результаты полученных измерений представлены в таблице 1. Анализируя полученные данные, можно заметить, что добавление меди или циркония увеличивает глубину расплавленного слоя, что является следствием повышения теплопроводности приповерхностной области.

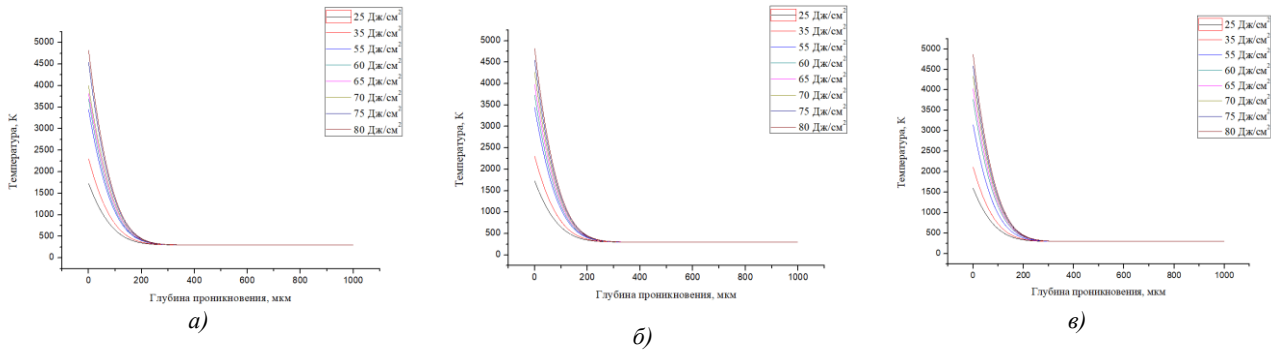


Рисунок 2 – Зависимость температуры от глубины в вольфраме (а), в вольфраме с покрытием меди (б), в вольфраме с покрытием циркония (в)

Таблица 1 – Результаты расчёта глубины проникновения при $T_{\text{плавления}} = 3695 \text{ K}$

W		W+ Cu		W+ Zr	
Плотность поглощённой энергии, Дж/см ²	Глубина проникновения, мкм	Плотность поглощённой энергии, Дж/см ²	Глубина проникновения, мкм	Плотность поглощённой энергии, Дж/см ²	Глубина проникновения, мкм
60	-	60	1	60	2
65	2	65	7	65	8
70	7	70	13	70	15
75	18	75	19	75	20
80	23	80	24	80	24

В заключение можно сделать вывод о том, что воздействие компрессионными плазменными потоками с плотностью поглощенной энергии 25–55 Дж/см² на вольфрам с предварительным нанесением покрытий меди или циркония позволяет легировать приповерхностный слой, глубиной до 24 мкм.

Список литературы

1. Радиационно-повреждённый вольфрам: получение и исследование в потоке стационарной плазмы / Б. И. Хрипунов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. – 2017. – Т. 40, № 4. – С. 40–49.
2. Иванов, Л. И. Взаимодействие мощных импульсных потоков энергии с материалами / Л. И. Иванов, В. Н. Пименов, В. А. Грибков // Физика и химия обработки материалов. – 2009. – Т. 1. – С. 23–37.
3. Шарапов, В. М. Структурные нарушения в вольфраме после взаимодействия с низкоэнергетичной гелиевой плазмой с допороговыми энергиями ионов / В. М. Шарапов, С. Л. Канащенко // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – Т. 2. – С. 20–25.
4. Эффекты дугообразования при действии плазмы на вольфрамовые компоненты первой стенки в токамаке / В. П. Будаев [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. – 2019. – Т. 42, № 1. – С. 51–56.
5. Упрочнение поверхности и повышение износостойкости металлических материалов при обработке потоками высокотемпературной импульсной плазмы / Б. А. Калинин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – Т. 2. – С. 21–27.

In this work, tungsten samples with copper and copper-zirconium coatings were processed by compression plasma beams (CPB) to obtain tungsten-copper alloys.

Корхов Александр Андреевич, студент 5 курса физического факультета Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, korkhoff.aliaxander@gmail.com.

Научный руководитель – *Шиманский Виталий Игоревич*, кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, shymanskiv@mail.ru.

УДК 535.35;533.9.082.5;533.924;621.373.8

Н. Н. КРАСНОПЕРОВ, К. Ф. ЕРМАЛИЦКАЯ

ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ ТИТАНА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОЙ МИШЕНИ СЕРИЯМИ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

Изучено влияние энергии импульсов, величины расфокусировки лазерного пучка и количества сдвоенных наносекундных лазерных импульсов на целенаправленное формирование развитой поверхности титановой мишени методом лазерной искровой спектрометрии (спектрометр LSS-1). Показана возможность формирования на поверхности мишени из титана пленок из микро- и наночастиц из оксидов титана сериями сдвоенных лазерных импульсов в воздушной атмосфере. Проведенные исследования показали, что расфокусировка на ± 5 мм благоприятна для формирования развитой оксидированной поверхности.

На сегодняшний день диоксид титана является одним из востребованных сорбентов и фотокатализаторов благодаря высокой фотокоррозионной устойчивости, малой стоимости и каталитической активности. В последнее десятилетие увеличился интерес к получению и изучению наноразмерных покрытий из диоксида титана на титане. Связано это с тем, что за счет уменьшения размеров частиц возрастает удельная поверхность диоксида титана, что позволяет количественно повысить число реакций, происходящих на поверхности. В связи с чем, получение наночастиц TiO_2 является одним из способов снижения степени рекомбинации зарядов и увеличения активной площади поверхности оксида.

Одним из перспективных способов является получение катализаторов в виде пленок оксидов титана на развитой поверхности пластинки из титана при воздействии лазерных импульсов [1–4]. Для получения структур на поверхности материала с минимальными размерами (десятки нанометров), следует выбирать режим воздействия ультракороткими лазерными импульсами без абляции с плотностью энергии импульса ниже порога абляции, но выше порога плавления, обеспечивающий процессы сверхбыстрого нагрева, плавления и рекристаллизации поверхности металла. Другими словами, технологии создания на поверхности металла структур минимального размера в наномасштабной области основываются на физических процессах, приводящих к затвердеванию поверхности вещества при сверхвысоких скоростях охлаждения после окончания воздействия лазерными импульсами.

При использовании режима сдвоенных импульсов на первичные процессы плазмообразования будут накладываться процессы нагрева и испарения аэрозолей, обусловленные действием второго импульса. Температура плазмы, доходящая до нескольких десятков тысяч градусов, определяет наличие в ней ионов, электронов, радикалов и нейтральных частиц, находящихся в возбужденном состоянии. Наличие таких частиц приводит к высоким скоростям взаимодействия частиц и быстрому протеканию реакций (10^{-5} – 10^{-8} с) в плазме и на

поверхности твердого тела. Выбирая энергию импульсов и между импульсный интервал можно управлять процессами поступления атомов и ионов титана, как в плазму, так и на поверхности твердого тела.

Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Лазер может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Временной сдвиг между двоянными импульсами может изменяться от 0 до 100 мкс с шагом 1 мкс. Лазерное излучение фокусировалось на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 104 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм.

Исследована динамика процессов формирования развитой поверхности, при воздействии серий последовательных двоянных лазерных импульсов на пластинки из титанового сплава BT1-0 (толщина 500 мкм). Для уменьшения плотности мощности, воздействующей на поверхность использовался вариант расфокусировки лазерного пучка. На рисунке 1 приведены зависимости интенсивности ряда линий титана от величины расфокусировки, при энергии импульсов 5 мДж и интервале между импульсами 10 мкс. Использовались серии из 20 двоянных импульсов на отдельную точку.

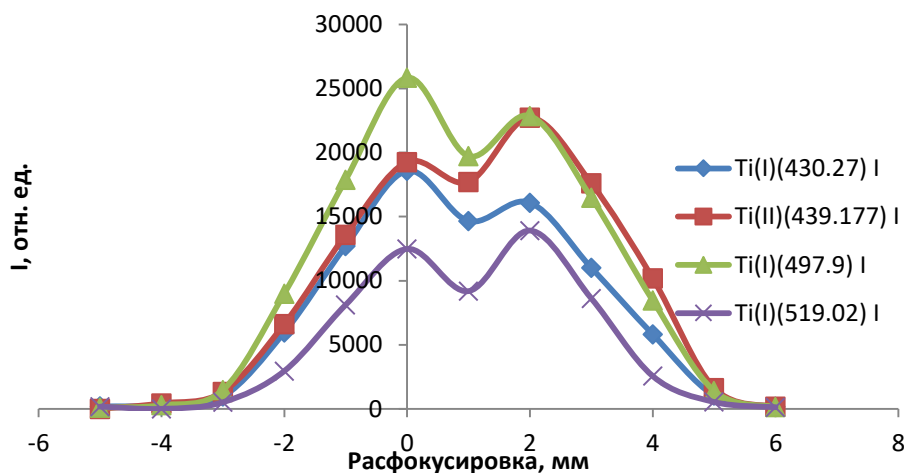


Рисунок 1 – Зависимости интенсивности атомных и ионных линий титана от величины расфокусировки лазерного пучка

Как видно из приведенного графика при расфокусировке порядка ± 5 мм и более процессы абляции поверхности маловероятны.

Изображения поверхности оксидированного титана с нанесенными пленками, полученные с помощью оптического микроскопа Webbers, совмещенного с цифровой камерой (отраженный свет) приведены на рисунок 2а–2е.

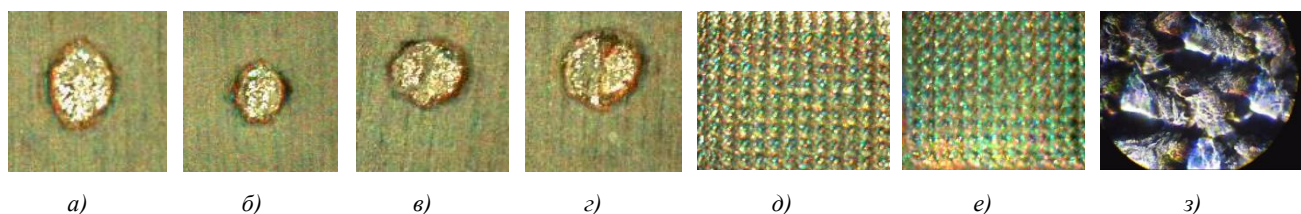


Рисунок 2 – Изображение поверхности оксидированного титана после точечной обработки:
а, б, в и г расфокусировка -5 , -4 , $+4$ и $+5$ мм соответственно; д, е – по площади,
з – фрагмент точки кадра е (увеличение 500 раз, микроскоп МИИ-4)

Размер пятен на рисунке 2а – 410×550 мкм, а на рисунке 2г – 450×450 мкм. При отрицательной расфокусировке пятна более однородны. Все кратеры окаймлены черными поясами, образующимися в результате обратного осаждения оксидов титана.

Формирование микро- и наноструктур на поверхности материала в значительной степени определяется процессом перехода из жидкого состояния в твердое. На ход этого процесса влияют такие параметры лазерного излучения, как длина волны, длительность, плотность энергии, частота следования импульсов. Из анализа вли-

ания данных параметров, проведенных в [4], следует, что для формирования микро и наноструктур важным параметром является время, в течение которого среда находится в жидком состоянии. Время жизни расплава зависит от энергии излучения и показателя поглощения. Чем больше глубина проникновения излучения в материал, тем короче должна быть длительность импульса. Для получения структур с характерными размерами меньше нескольких микрон нужно использовать импульсы короче нескольких десятков наносекунд.

Характер образующихся структур и их размеры сильно зависят от окружающей газовой среды. Например, при обработке в воздухе в периферийной зоне пятна наблюдаются осажденные продукты реакций, проходящих при абляции. Эти продукты в ряде случаев являются нежелательными, т. к. препятствуют образованию микро- и наноструктур.

Интенсивность лазерного излучения была максимальной в центре пятна облучения и спадала к его периферии. При многократном импульсном воздействии на один и тот же участок поверхности в центре пятна возникал глубокий кратер, из которого произошло удаление материала. Однако на периферии, где интенсивность лазерного излучения снижалась, наблюдалось только оплавление поверхности. Как видно из снимков в центральной высокоинтенсивной части пятна не видно структур субмикронных размеров. Формирование интересующих нас микро- и наноструктур оксидов титана наблюдается в периферийной низкоинтенсивной части зоны облучения.

Для получения однородной поверхности, покрытой микро- и наноразмерными структурами мы использовали обработку поверхности титана последовательными из 20 импульсов на точку с шагом 150 мкм. На рисунках 2д (–5 мм) и 2е (+5 мм) приведены снимки поверхностей, полученных при обработке поверхности титана размером 2×2 мм сериями из 20 импульсов на точку с шагом 150 мкм

После обработки наносекундным лазерным излучением на поверхности титана в периферийной низкоинтенсивной области пятна наблюдаются шероховатости с характерными размерами вдоль поверхности около 300–600 нм и высотой 100–200 нм, а также наложенная на нее мелкомасштабная шероховатость в виде выпуклостей с характерными размерами 50–60 нм (рисунок 2з).

Как видно из последних снимков на поверхности пластинки видна развитая структура. Островки имеют размер порядка нескольких десятков микрометров, покрытых тонким слоем оксидов титана. Толщина оксидного слоя определяет цвет, который отражается от пленки. Толщина слоев изменяется примерно в пределах 10–100 нм [2; 3]. Поверхность, обработанная импульсами с положительной расфокусировкой, более интенсивно окрашена. Последнее может быть обусловлено дополнительным получением оксидов титана при небольшой абляции поверхности (рисунок 1).

Проведенные исследования продемонстрировали возможность формирования оксидных микро и наноструктур на поверхности титана при ее обработке двоянными лазерными импульсами. Измерения показали образование нанорельефа с характерными размерами вдоль поверхности около 300–600 нм и высотой 100 нм, а также наложенной на нее мелкомасштабной шероховатости в виде выпуклостей с характерными размерами 50–60 нм.

Список литературы

1. Обработка поверхности титана наносекундным лазерным излучением / Ю. А. Железнов [и др.] // Письма о материалах. – 2014. – Т. 4, № 1. – С. 45–48.
2. Метод изменения цвета поверхности титана при локальном окислении наносекундными лазерными импульсами. В. П. Вейко [и др.] // Изв. вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 3. – С. 243–248.
3. Антонов, Д. Н. Окрашивание поверхности металлов под действием импульсного лазерного излучения / Д. Н. Антонов, А. А. Бурцев, О. Я. Бутковский // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, вып. 10.
4. Kolasinski, K. W. Solid structure formation during the liquid/solid phase transition / K. W. Kolasinski // Curr. Opin. Solid State Mater. Sci. – 2007. – Vol. 11 (5–6). – P. 76.

The influence of pulse energy, the magnitude of laser beam defocusing and the number of double nanosecond laser pulses on the targeted formation of a developed surface of a titanium target was studied using the laser spark spectrometry method (LSS-1 spectrometer). The possibility of forming films of micro and nanoparticles of titanium oxides on the surface of a titanium target by series of double laser pulses in an air atmosphere is shown. The conducted studies have shown that defocusing by ± 5 mm is favorable for the formation of a developed oxidized surface.

Красноперов Никита Николаевич, магистрант физического факультета Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, nikitakrasnoperov2710@gmail.com.

Научный руководитель – *Ермалюк Ксения Фёдоровна*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, ermalitskaia@gmail.com.

Н. В. ЛАБОДА, Р. К. ТРАВКИНА

**ФОТОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВОГО КРАСИТЕЛЯ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С МИКОБАКТЕРИЯМИ**

Приведены результаты исследования фотофизических свойств индотрикарбоцианинового красителя, содержащего в структуре трегалозу, после инкубации с микобактериями. Установлено, что фотофизические свойства красителя после инкубации претерпевают изменения. Положение максимума спектров поглощения, флуоресценции и возбуждения флуоресценции сдвигаются в длинноволновую область по сравнению с таковыми в ФСБ или МПБ, при этом время затухания флуоресценции почти не отличается. Для полиметиновых красителей характерным является сольватохромия и сольватифлуорохромия, поэтому по изменению спектральных свойств красителя можно судить об окружении его молекул. Поскольку фотофизические свойства красителя после инкубации с микобактериями отличаются от таковых в растворе ФСБ и МПБ как с, так и без TWEEN-80 или БСА и свободно плавающих молекул в красителе удаляется вследствие промывания, можно предположить, что индотрикарбоцианиновый краситель связывается со стенками микобактерий.

Появление и распространение устойчивых к антибиотикам болезнетворных бактерий является серьезной проблемой в сфере здравоохранения. Это приводит к трудностям в лечении ранее легко излечимых болезней. *Mycobacterium tuberculosis* является болезнетворной бактерией, вызывающей туберкулез. Одним из перспективных методов борьбы с бактериальными инфекциями устойчивыми к антибиотикам является антибактериальная фотодинамическая терапия. Суть её заключается в применении фотосенсибилизаторов способных накапливаться в патогенных бактериях и после облучения конкретной длиной волны деактивировать их путем выработки активных интермедиатов. Перспективными фотосенсибилизаторами являются полиметиновые красители, максимум поглощения которых приходится на область терапевтического окна биологических тканей, что потенциально позволяет проводить лечение на большей глубине. Известны публикации, в которых сообщается об использовании трегалозы и её производных в качестве модифицирующих заместителей, для флуоресцентных зондов, позволяющих проводить изучение процессов с участием микобактерий [1–3]. В связи с этим, возможно использование трегалозы для улучшения накопления и фотодеактивации фотосенсибилизатором микобактерий [4; 5]. В данной работе приведены результаты исследования фотофизических свойств индотрикарбоцианинового красителя, модифицированного трегалозой после инкубации с микобактериями, на основе изменений которых можно судить о том, что краситель взаимодействует со стенками микобактерий.

В качестве модельной биологической системы использовались *Mycobacterium Smegmatis*. Микобактерии добавлялись в мясо-пептонный бульон (МПБ). В МПБ также добавлялся 0,1 % TWEEN-80 или 5 % бычьего сывороточного альбумина (БСА), которые должны препятствовать агрегации бактерий, но в тоже время было выявлено, что они препятствуют образованию ассоциатов исследуемого полиметинового красителя (рисунок 1). Краситель в образцы с микобактериями добавлялся через раствор DMSO при концентрации красителя 4 мМ, а в МПБ добавлялся 1 % данного маточного раствора, что обеспечивало концентрацию красителя в растворах с микобактериями 40 мкМ. Растворы с красителем и микобактериями инкубировались в течении 2 или 24 часов при температуре в 37 °С. Далее они промывались фосфатно-солевым буфером (ФСБ). Главной целью промывания являлось удаление молекул красителя не связавшихся со стенками микобактерий.

Спектры поглощения полученных образцов снимались с помощью спектрофотометра PV 1251 фирма SOLAR, рабочий диапазон длин волн которого 315–995 нм. Спектры флуоресценции и спектры возбуждения флуоресценции измерялись на модифицированном спектрофлуориметре Fluorolog. Он позволяет записывать спектр 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 Белорусского государственного университета. Он создан на основе модификации спектрофлуориметра Fluorolog.

В растворах на спектральные и фотофизические свойства полиметиновых красителей сказываются различные физические процессы, которые определяются природой растворителя. Молекула находится в сольватной оболочке, что проявляется в сольватохромии и сольватифлуорохромии. Поэтому по изменению фотофизических свойств красителя можно судить о микроокружении его молекулы.

Фотофизические свойства красителя после инкубации с микобактериями сравнивались с его раствором в ФСБ и МПБ. В ФСБ индотрикарбоцианиновый краситель с трегалозой имеет максимум спектра поглощения при 743 нм, спектра флуоресценции – 772 нм, спектра возбуждения флуоресценции – 743 нм. Время затухания флуоресценции составляет 0,53 нс. Кинетика затухания флуоресценции хорошо аппроксимируется одной экспонентой. Свойства красителя в ФСБ и МПБ очень близки. Краситель в растворе МПБ имеет максимум спектра поглощения при 745 нм, спектра флуоресценции – 776 нм, спектра возбуждения флуоресценции – 743 нм. Время затухания флуоресценции составляет 0,53 нс. Кинетика затухания флуоресценции так же хорошо аппроксимируется одной экспонентой. При добавлении в МПБ 0,1 % TWEEN-80 или 5 % БСА свойства красителя меняются. Происходит сдвиг максимумов поглощения, флуоресценции и возбуждения флуоресценции в длинноволновую

область и удлинение времени затухания флуоресценции красителя (рисунок 2). В растворе МПБ с 0,1 % TWEEN-80 или 5 % БСА максимум спектра поглощения приходится на 755 и 756 нм, спектра флуоресценции – 790 и 781 нм, спектра возбуждения флуоресценции – 756 и 761 нм соответственно. Время затухания флуоресценции составляет 0,83 нс в растворе с TWEEN-80 и 0,91 нс с БСА. Следует отметить, что после инкубации красителя с TWEEN-80 или БСА в МПБ при 37°C в течение 2 часов никаких изменений в спектрах и длительности затухания флуоресценции красителя не наблюдается.

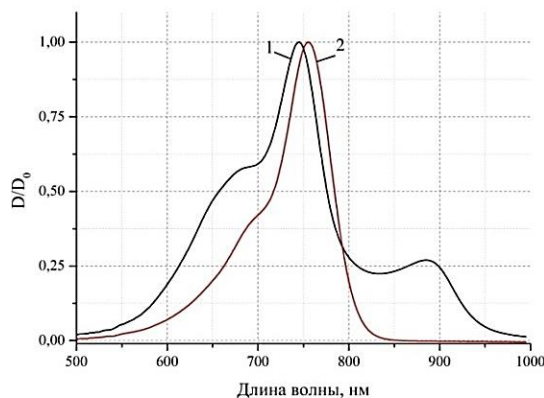


Рисунок 1 – Индотрикарбоцианиновый краситель с трегалозой в МПБ: 1 – нормированный спектр поглощения без TWEEN-80, 2 – нормированный спектр флуоресценции с TWEEN-80

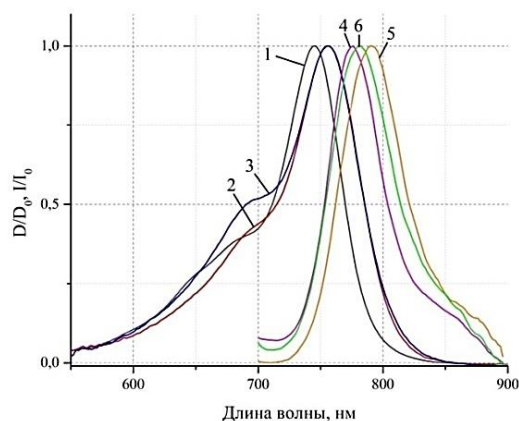


Рисунок 2 – Индотрикарбоцианиновый краситель с трегалозой: 1 – нормированный спектр поглощения в МПБ, 2 – нормированный спектр флуоресценции в МПБ, 3 – нормированный спектр поглощения в МПБ с TWEEN-80, 4 – нормированный спектр флуоресценции в МПБ с TWEEN-80, 5 – нормированный спектр поглощения в МПБ с БСА, 6 – нормированный спектр флуоресценции в МПБ с БСА

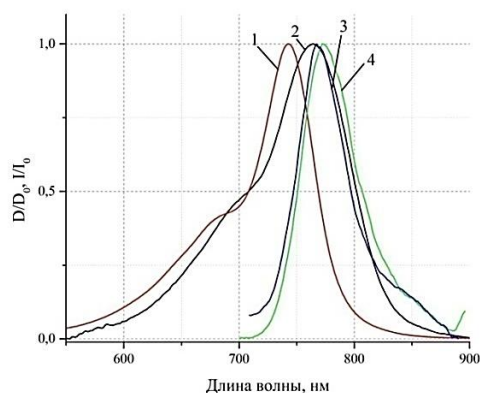


Рисунок 3 – Индотрикарбоцианиновый краситель с трегалозой: 1 – нормированный спектр поглощения в ФСБ, 2 – нормированный спектр флуоресценции в ФСБ, 3 – нормированный спектр поглощения в размороженных микобактериях, 4 – нормированный спектр флуоресценции в размороженных микобактериях

Фотофизические свойства красителя с трегалозой после инкубации с микобактериями претерпевают изменения. Максимумы спектров поглощения, флуоресценции и возбуждения флуоресценции сдвигаются в длинноволновую область, но при этом время затухания флуоресценции почти не отличается от такового в ФСБ или МПБ. В случае разрушенных и размороженных микобактерий наиболее значительно изменения проявляются в сдвиге спектра поглощения (рисунок 3). Максимум поглощения красителя в разрушенных и размороженных бактериях расположен на 761 и 764 нм, флуоресценции – 776 и 774 нм, возбуждения флуоресценции – 745 и 747 нм соответственно. Время затухания флуоресценции составляло 0,56 нс. Для свеже выращенных микобактерий изменения более значительны. Максимум поглощения красителя в бактериях после инкубации 2 и 24 часа расположен у 766 и 771 нм, флуоресценции – 781 и 791 нм, возбуждения флуоресценции – 760 и 759 нм соответственно. Время затухания флуоресценции составляло 0,55 нс после 2 часов инкубации и 0,56 нс после 24 часов.

Фотофизические свойства красителя с трегалозой после инкубации с микобактериями отличаются от таковых в растворе ФСБ и МПБ как с, так и без TWEEN-80 или БСА. Из этого можно сделать вывод, что молекулы красителя находятся в ином окружении. Учитывая то, что в результате промывания свободно плавающих молекул красителя была удалена, можно предположить, что индотрикарбоцианиновый краситель связывается со стенками микобактерий.

Список литературы

1. A fluorogenic trehalose probe for tracking phagocytosed mycobacterium tuberculosis / T. Dai [et al.] // Journal of the American chemical society. – 2020. – Vol. 142, No 36. – P. 15259–15264.
2. Kamariza, M. Imaging mycobacterial thehalose glycolipids / M. Kamariza, P. Shieh, C. R. Bertozzi // Methods in enzymology. – 2018. – Vol. 598. – P. 355–369.
3. Photoactivatable glycolipid probes for identifying mycolate – protein interactions in live mycobacteria / H. W. Kavunja [et al.] // Journal of the American chemical society. – 2020. – Vol. 142, No 17. – P. 7725–7731.
4. Trehalose conjugation enhances toxicity of photosensitizers against mycobacteria / A. K. Dutta [et al.] // ACS Cent. Sci. – 2019. – Vol. 5, No 4. – P. 644–650.
5. Photoinactivation of mycobacterium tuberculosis and mycobacterium smegmatis by near-infrared radiation using a trehalose – conjugated heptamethine cyanine / N. V. Kozobkova [et al.] // Int. J. Mol. Sci. – 2024. – Vol. 25, No 15.

The results of the study of the photophysical properties of an indothricarbocyanine dye containing trehalose in its structure after incubation with mycobacteria are presented. The photophysical properties of the dye undergo changes after incubation. The maxima of the absorption, fluorescence, and fluorescence excitation spectra shift to the long-wavelength region compared to those in PSB or BSA, but the fluorescence attenuation time is almost the same. Polymethine dyes are characterized by solvatochromia and solvato-fluorochromia, therefore, by changing the properties of the dye, one can judge the environment of its molecules. Since the photophysical properties of the dye after incubation with mycobacteria differ from those in PSB and BCA solutions with and without TWEEN-80 or BSA, and most of the free – floating molecules in the dye were removed as a result of washing, it can be assumed that the indothricarbocyanine dye binds to the walls of mycobacteria in some way.

Лабода Николай Вадимович, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, nikolaj.laboda000@gmail.com.

Травкина Рината Константиновна, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь.

Научный руководитель – Самцов Михаил Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, НИИПФП имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, samtsov@bsu.by.

УДК 620.22

Е. В. ВИНОГРАДОВ

ВЛИЯНИЕ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФТОРОПЛАСТА

Исследуется влияние ультрафиолетового излучения на механические свойства фторопласта. Эксперименты показали, что УФ-излучение приводит к изменениям в прочности, эластичности и жесткости материала, а также к деградации структуры при длительном воздействии.

Фторопласт, также известный как тефлон, представляет собой полимер с уникальными свойствами, включая высокую химическую стойкость и прочность. Эти характеристики делают фторопласт востребованным материалом в таких отраслях промышленности, как авиакосмическая, химическая и электротехническая.

Для того чтобы расширить функциональные возможности фторопласта и сделать его более универсальным в применении, разработаны различные методы модификации. Один из таких методов – плазмохимическая обработка. Этот способ позволяет улучшить адгезию поверхности материала, благодаря чему он лучше сцепляется с другими материалами, что особенно важно для сложных конструкций [1]. Также существует радиацион-

ная модификация. Воздействие радиации изменяет физические и химические свойства фторопласта, включая повышение его износостойкости и снижение коэффициента трения. Эти изменения делают материал более устойчивым к износу и пригодным для использования в условиях интенсивной эксплуатации.

Ещё один подход – химическая активация, при которой фторопласт подвергается обработке химическими реагентами. Это увеличивает его адгезионные свойства, что играет важную роль при применении материала в специализированных областях [1].

Современные технологии модификации дают возможность адаптировать фторопласт под самые различные промышленные нужды, включая такие сферы, как машиностроение, медицина и электроника. Такой подход позволяет значительно расширить спектр применения материала, делая его востребованным в самых разных отраслях. Тем не менее, фторопласт часто подвергается воздействию ультрафиолетового излучения, которое может отрицательно влиять на его структуру и эксплуатационные характеристики. При взаимодействии с УФ-лучами в материале происходят процессы, существенно изменяющие его свойства. Ультрафиолет инициирует фотохимические реакции, разрывающие связи в полимерной цепи. Это приводит к сокращению длины молекул фторопласта, вследствие чего материал становится менее прочным и теряет свою эластичность [2].

Под действием УФ-лучей между молекулами могут образовываться новые химические связи. Этот процесс изменяет кристаллическую структуру фторопласта, формируя сшитые сети. Такие изменения увеличивают жесткость и твердость материала, но одновременно снижают его ударопрочность и гибкость. Помимо этого, ультрафиолетовое излучение взаимодействует с фторопластом, формируя активные кислородсодержащие радикалы. Эти радикалы вызывают окисление полимера, что сказывается на его поверхности. Процесс окисления может сопровождаться появлением микротрещин, что значительно ослабляет общий уровень прочности материала. Таким образом, комплекс процессов, вызванных УФ-излучением, приводит к изменениям, которые влияют на эксплуатационные характеристики фторопласта [3].

Целью данной работы является исследование влияния ультрафиолетового излучения на механические свойства фторопласта с последующей разработкой материала, обладающего повышенными эксплуатационными характеристиками.

Для изучения воздействия УФ-излучения на фторопласт «Суперфлувис» 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 источника ионизирующего излучения была выбрана эксимерная лампа криптон – бром (KrBr) – это лампа, которая использует эксимерные молекулы криптона и брома (KrBr) для генерации ультрафиолетового излучения. Лампы такого типа эффективно излучают УФ-излучение на определенных длинах волн, таких как 207 нм и 222 нм. Облучение длилось в течение 60 мин.

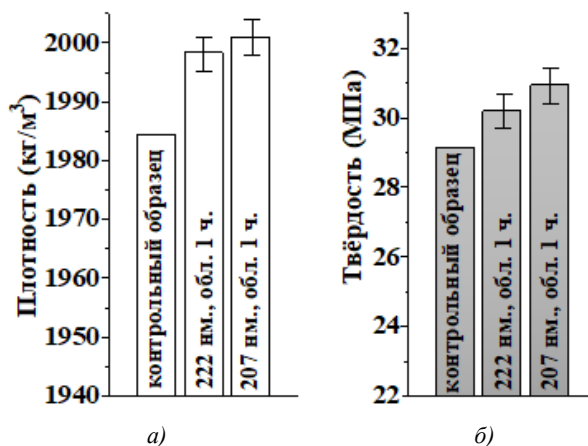


Рисунок 1 – Влияние различных режимов УФ-облучения на плотность (а) и твердость (б) фторопласта

Плотность образцов измерялась методом гидростатического взвешивания колец из фторопласта-4 в соответствии с ГОСТ 15139 [4]. Испытания проходили при температуре дистиллированной воды $23,0 \pm 0,5$ °С. Твердость измерялась по Кнупу с помощью твердомера Kason 59-NV [5]. Испытания на растяжение и определение относительного удлинения (пластичности) проводились на разрывной машине МР-200 в соответствии с ГОСТ 11262 [6]. Сравнительный анализ плотности образцов до и после облучения представлен на рисунке 1а.

На рисунке 1 видно, что под воздействием УФ-излучения плотность фторопласта возрастает. При этом, плотность образцов, подвергшиеся воздействию излучения с длиной волны 207 нм незначительно выше, чем плотность образцов, облученных ультрафиолетовым излучением с длиной волны 222 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 и изменению его физических свойств, таких как твёрдость и жёсткость. Это приводит к уплотнению структуры и увеличению плотности. Зависимость между изменением плотности и твёрдости может быть обусловлена механизмом сшивания молекул, который увеличивает плотность полимера за счёт создания более компактной и жёсткой сетчатой структуры [7].

При определении твердости по Кнупу было обнаружено, что под воздействием УФ-излучения твёрдость фторопласта увеличивается (рисунок 1б). Твёрдость образцов, облучённых УФ-излучением с длиной волны 222 нм, выше на 3,6 %, по сравнению с контрольными образцами. А твёрдость фторопласта под воздействием излучения длиной волны $\lambda = 207$ нм увеличение твёрдости составило 6,1 %. Полученные результаты объясняются тем, что коротковолновое излучение оказывает более значительное воздействие на структуру фторопласта. Это может быть связано с процессами поперечной сшивки (образования новых связей между молекулами), что приводит к уплотнению и упрочнению материала. Более коротковолновое излучение может проникать глубже в материал, вызывая изменения не только на поверхности, но и в более глубоких слоях фторопласта, что также может способствовать как увеличению твёрдости, так и хрупкости фторопласта [8].

На рисунке 2 представлены результаты исследования прочности на разрыв, а также пластичности контрольного фторопласта и образцов, подвергнутых воздействию ультрафиолетового излучения с длиной волны $\lambda = 222$ и 207 нм. Проанализировав сравнительную диаграмму (рисунок 2), можно сделать вывод о том, что УФ-излучение вызывает снижение прочности на разрыв. В частности, под воздействием излучения с длиной волны 207 нм прочность образцов уменьшилась на 5 % по сравнению с контрольным. В то же время излучение с большей длиной волны, $\lambda = 222$ нм, привело к снижению прочности на 1,7 %. Это связано с тем, что более коротковолновое излучение оказывает более значительное воздействие на структуру материала, вызывая большие изменения и, как следствие, большее снижение прочности.

Обнаружено, что УФ-излучение влияет и на пластичность фторопласта (рисунок 2б). Так, при $\lambda = 207$ нм пластичность снизилась на 13,4 %, а при $\lambda = 222$ нм данный параметр снизился на 8,1 % в сравнении с контрольными образцами.

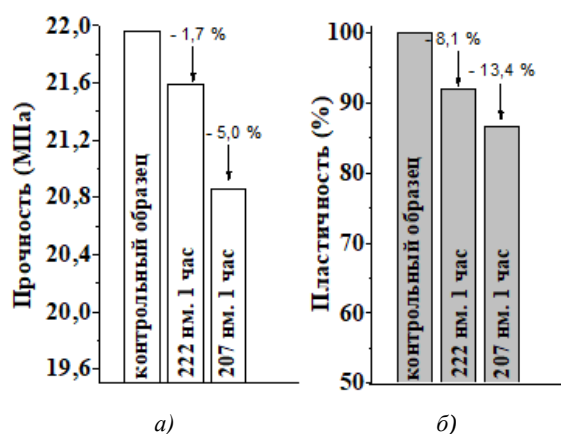


Рисунок 2 – Влияние различных режимов УФ-облучения на прочность (а) и пластичность (б) фторопласта

Уменьшение прочности и пластичности фторопласта после облучения УФ-излучением действительно может быть связано с разрушением молекулярных связей в полимерной матрице. Это подтверждают изменения на молекулярном уровне, вызванные воздействием высокоэнергетического излучения [9].

Проведенные исследования показали, что воздействие ультрафиолетового (УФ) излучения оказывает влияние на механические свойства фторопласта. В результате облучения образцов УФ-излучением с длиной волны 207 нм и 222 нм было обнаружено увеличение плотности фторопласта, что может быть связано с процессами уменьшения свободного объема и поперечной сшивки, происходящими под воздействием излучения [9]. Кроме того, под воздействием УФ-излучения наблюдается увеличение твёрдости фторопласта. Данный эффект объясняется усилением химических связей и изменениями в молекулярной структуре материала [2].

Несмотря на положительные изменения в плотности и твёрдости, облучение УФ-излучением приводит к уменьшению прочности и пластичности данного полимера. Это связано с разрушением молекулярных связей, окислением и деградацией полимерной матрицы под воздействием высокоэнергетического излучения [2].

Результаты проведённых исследований подчеркивают важность учета воздействия УФ-излучения при разработке и эксплуатации полимерных материалов. Полученные данные могут быть полезны для определения оптимальных условий эксплуатации фторопласта и разработки методов улучшения его механических свойств.

Список литературы

1. Спектроскопическое исследование модифицированного политетрафторэтилена / Л. Н. Игнатьева [и др.] // Журнал структурной химии. – 2002. – Т. 1. – С. 69.
2. 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 // Вестн. Евразийского нац. ун-та им. Л. Н. Гумилева. Сер.: Химия. География. Экология. – 2024. – № 1. – Р. 43–55.
3. Шляпинтох, В. Я. Фотохимические превращения и стабилизация полимеров / В. Я. Шляпинох. – М. : Химия, 1979. – 344 с.
4. ГОСТ 15139-69. Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы). – М. : Изд-во стандартов, 1969.
5. ГОСТ Р ИСО 4545-1-2015. Материалы металлические. Метод испытания на микротвёрдость по Кнупу. – М. : Стандартиформ, 2015.
6. ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. – М. : Стандартиформ, 2017.
7. Волкова, Г. А. Лампа для облучения в вакуумной ультрафиолетовой области спектра / Г. А. Волкова, Н. Н. Кириллова, Е. Н. Павловская // Бюллетень изобретений. – 1982. – № 41. – С. 168.
8. 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 [et al.] // Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE – 2024), Tomsk, September 16–21, 2024. – Tomsk : TPU Publishing Hous, 2024. – P. 1332–1335. – <https://doi.org/10.56761/EFRE2024.R5-P-042102>.
9. Study of the structure and properties of Ni/Au composite coatings formed in an X-ray and ultraviolet radiation field / N. G. Valko [et al.] // Journal of Surface Investigation. – 2021. – Vol. 15. – P. 25. – <https://doi.org/10.1134/S1027451022020215>.

This article presents results of investigation of the effects of ultraviolet (UV) radiation on the mechanical properties of fluoroplastic. Experimental data show that UV radiation causes changes in the strength, elasticity, and rigidity of the material, and also contributes to the degradation of its structure with prolonged exposure. The main processes affecting the properties of fluoroplastic include photodegradation, cross-linking, and oxidation. These findings highlight the necessity of considering UV radiation effects in the development and application of polymer materials.

Виноградов Евгений Валентинович, аспирант Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, evgenijvinogradov1993@gmail.com.

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

УДК 543.42.062

Н. Н. КУРЬЯН

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ГЛИНЫ НА ЕЁ СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Проведено исследование лазерно-эмиссионной плазмы, образованной одиночными и сдвоенными лазерными импульсами на поверхности технологических глин. Целью работы является установление основных физических механизмов увеличения интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы металлов при воздействии на них сдвоенными лазерными импульсами. Выявлен рост интенсивности спектральных линий как атомов, так и ионов основных химических элементов исследуемого образца в лазерно-эмиссионной плазме при его нагреве до 700–1100 °С и одноимпульсном лазерном воздействии и при его нагреве до 500–700 °С и воздействии сдвоенными лазерными импульсами.

В настоящее время научные исследования и производство не могут обойтись без изучения состава различных материалов и изделий, которые являются объектами жизнедеятельности человека. Основополагающими требованиями к методам анализа материалов являются: точность, воспроизводимость и экспрессность. Из-за того, что химические методы не всегда могут соответствовать этим требованиям, широкое распространение получили физические и физико-химические методы. Из перечисленных методов наиболее эффективным является метод лазерно-индуцированной спектроскопии (LIBS) [1].

LIBS – это метод спектрального анализа, который используется для количественного и качественного определения исследуемого образца. Ввиду того, что данный спектральный метод имеет возможность проводить анализ и идентификацию химических и биологических материалов в жидкой, твердой и газообразной формах без подготовки образца, он является более универсальным и подходит для проведения анализа в полевых условиях [2].

Из-за удобства данный метод активно используется в материаловедении, медицине, фармакологической и металлургической промышленности, экологических исследованиях, при изучении культурного наследия и ар-

хеологии, для анализа минералов, горных пород, отложений и почвы, при астрономических исследованиях, имеет применение при глубоководных исследованиях и в военной промышленности.

Возросший интерес к изучению взаимодействия сдвоенных лазерных импульсов с веществом в последние годы связан с научно-техническим прогрессом в области лазерных технологий. Промышленность начала производить лазеры, способные генерировать сдвоенные сверхкороткие импульсы и импульсные пучки, что обеспечивает значительные преимущества в их использовании по сравнению с традиционными моноимпульсными лазерами. В этой связи изучение взаимодействия сдвоенных лазерных импульсов с веществом приобрело новую значимость.

В этой связи были созданы новые методы спектрального анализа, включая двухимпульсную атомно – эмиссионную спектроскопию (DP – LIBS), с целью повышения чувствительности и снижения погрешности измерений. В данном методе один лазерный импульс применяется для создания воздушной плазмы на расстоянии нескольких миллиметров над образцом за несколько микросекунд до процесса абляции с целью возбуждения атомов до определенного состояния. Затем второй импульс инициирует излучение от возбужденных атомов. В интервале времени между двумя импульсами система развивается под влиянием возбуждения [3].

Также существуют и другие взгляды на разъяснение этого механизма. Одним из ранних подходов к объяснению нелинейного увеличения яркости излучения плазмы, вызванной эрозией, было предположение о том, что физическая причина усиления излучательной способности лазерной плазмы при замене одиночного воздействия на двойное на изучаемый объект заключается во взрывном поглощении второго импульса на границе парогазовой туманности, образованной первичным импульсом на поверхности цели [4].

Таким образом, порядочное увеличение интенсивности спектральных линий и рост абляции материала объясняются разнообразными физическими механизмами.

Целью настоящей работы является установление физических факторов увеличения интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы технологических глин при воздействии на них сдвоенными лазерными импульсами.

Источником когерентного излучения служил YAG: Nd³⁺-лазер, работающий на длине волны 1,06 мкм. Длительность импульсов генерации составляла ~15 нс. Лазер имел возможность генерировать как одиночные, так и сдвоенные импульсы. Задержка второго импульса относительно первого могла изменяться в диапазоне (1–300) мкс. Энергия одиночного лазерного импульса могла изменяться от 1 до 45 мДж. Была реализована возможность независимой регулировки выходной энергии по каждому каналу путем изменения силы тока и длительности импульса накачки. Это значительно расширило возможности экспериментальной установки. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

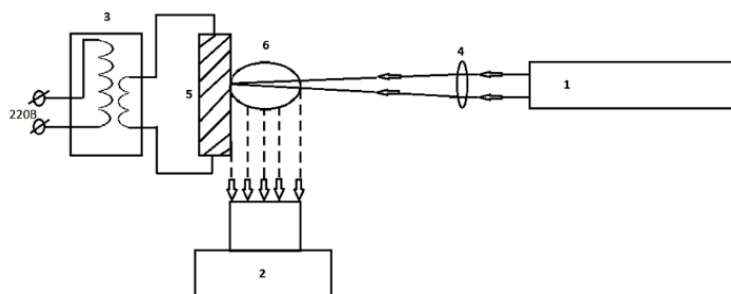


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Излучение лазера 1 посредством встроенного телескопа и линзы 4 направлялось на исследуемый объект 5, расположенный в фокусе. Фокусное расстояние линзы составляло 100 мм. Характерный размер сфокусированного лазерного пятна на объекте составлял ~0,25 мм. Под воздействием лазерного излучения происходила абляция исследуемого вещества, формировался лазерно-эмиссионный факел 6, происходила эрозия, вынос и распыление материала его поверхности.

Излучение лазерно-эмиссионного факела, собранное объективом, вводилось в оптоволокно и направлялось в монохроматор-спектрограф MS 2004i. Регистрация эмиссионного спектра эрозионного плазменного факела на выходе монохроматора-спектрографа осуществлялась с помощью регистратора оптического излучения UC-16H10420-1106 на базе ПЗС-линеек с размером светочувствительной зоны 28,672×0,896 мм. Полученные данные обрабатывались, усреднялись и отображались в виде спектра в компьютерной программе QspClient автоматически. Управление установкой осуществлялось с помощью компьютера.

Для исследования влияния температуры технологических глин на абляционный вынос материала из эрозионного кратера и интенсивность излучения плазменных факелов была предусмотрена возможность их нагрева. Нагрев осуществлялся путем пропускания электрического тока через алюминиевый брусок, на котором находилась технологическая глина.

Для нагрева использовался автотрансформатор 3, который позволял снижать и регулировать сетевое напряжение. Напряжение с выхода автотрансформатора подводилось к исследуемому объекту 6, на котором фокусировалось лазерное излучение и формировалась лазерно-эмиссионная плазма. Температура мишени измерялась с помощью дистанционного оптического измерителя температуры 3, которым являлся ИТ – 3СМ 2.

На рисунке 2 представлены зависимости интенсивности спектральных линий атомов основных компонентов технологических глин от температуры исследуемого образца при воздействии на него одиночными и двойными лазерными импульсами. Видно, что в обоих случаях возрастание температуры исследуемых образцов приводит к росту интенсивности спектральных линий.

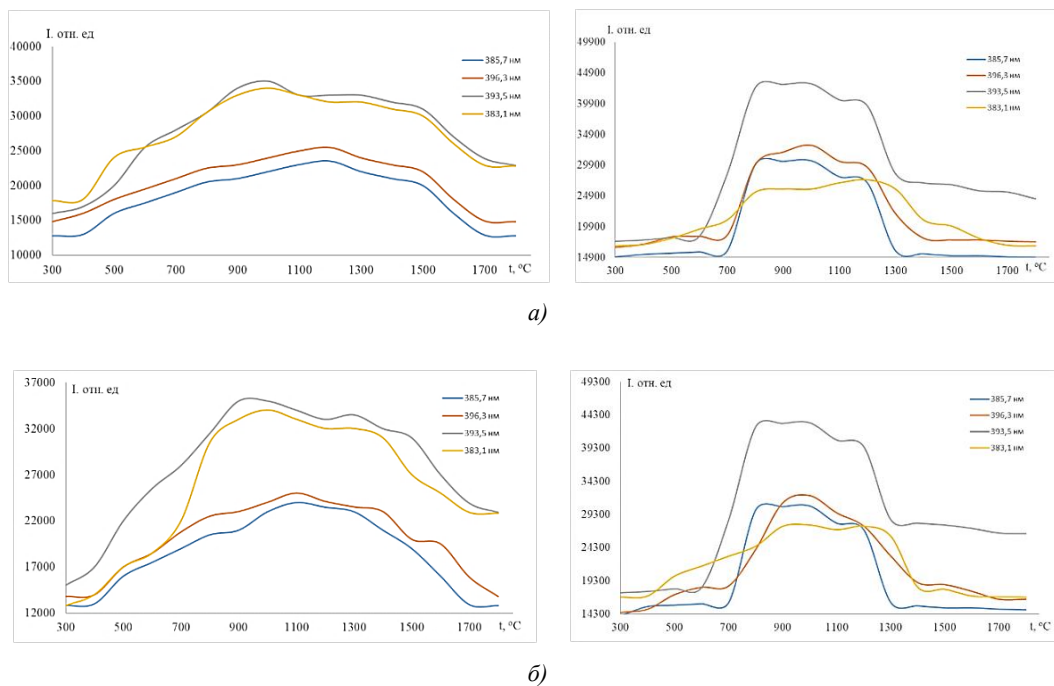


Рисунок 2 – Зависимости интенсивности спектральных линий основных компонентов красной (а) и белой глины (б) от температуры исследуемого образца при одно- (1) и двухимпульсном (2) формировании плазмы

При одноимпульсном воздействии максимум интенсивности спектральных линий приходится на 900 °С, а при воздействии двойными лазерными импульсами – на 720 °С. Интенсивности их возрастают в обоих случаях в 1,5–2,0 раза.

Из представленных выше экспериментальных результатов следует, что температура поверхности исследуемого образца оказывает определяющее влияние на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы. Общим является то, что наблюдается рост интенсивности спектральных линий как атомов, так и ионов основных химических элементов исследуемого образца в лазерно-эмиссионной плазме при его нагреве до 700–1100 °С при одноимпульсном лазерном воздействии, так и при его нагреве до 500–700 °С и воздействии двойными лазерными импульсами. Смещение максимумов зависимостей интенсивности спектральных линий плазмы от температуры исследуемого образца при двухимпульсном возбуждении в сторону меньших температур примерно на 280 °С, по сравнению с одноимпульсным возбуждением плазмы, свидетельствует о том, что первый лазерный импульс в паре дополнительно нагревает кратер.

Для оценки температуры в эрозионном кратере проводилось сравнение интенсивностей исследованных спектральных линий основных компонентов технологических глин при одноимпульсном формировании лазерно-эмиссионной плазмы на нагретом образце с интенсивностями этих же линий при двухимпульсном возбуждении образца, находящегося при комнатной температуре. Сравнивая одинаковые значения интенсивностей спектральных линий, можно оценить температуру эрозионного кратера. На основании полученных экспериментальных данных было определено, что температура эрозионного кратера через 1 мкс после воздействия первого лазерного импульса при двухимпульсном формировании лазерно-эмиссионной плазмы находится в диапазоне 600–700 °С.

Таким образом, температура эрозионного кратера, обусловленная воздействием первого лазерного импульса в паре, является основным фактором роста выноса материала и увеличения интенсивности спектральных линий при двухимпульсном лазерном воздействии на вещество.

Список литературы

1. Double – Pulse and Calibration – Free Laser – Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) on quantitative analysis' / O. B. Garda [et al.]. – Leon de los Aldama, 2013. – P. 19–27.
2. Laser Ablation: Principles and Applications / J. C. Miller [et al.]. – Berlin : Springer Verlag, 1994. – 187 p.
3. Miziolek, A. W. Laser – induced breakdown spectroscopy / A. W. Miziolek, V. Palleschi, I. Schechter. – New York : Cambridge University Press, 2008. – С. 5–7.
4. Першин, С. М. Трансформация оптического спектра лазерной плазмы при двухимпульсном облучении поверхности / С. М. Першин // Квантовая электроника. – 1989. – Т. 16, № 2. – С. 325–330.

The laser emission plasma formed by single and double laser pulses on the surface of technological clays was studied. The aim of the work is to establish the main physical mechanisms of increasing the intensity of spectral lines of laser emission plasma of metals when exposed to double laser pulses. An increase in the intensity of spectral lines of both atoms and ions of the main chemical elements of the studied sample in laser emission plasma was revealed when it was heated to 700–1100 °C and exposed to single-pulse laser action and when it was heated to 500–700 °C and exposed to double laser pulses.

Курьян Николай Николаевич, старший преподаватель кафедры современных технологий программирования факультета математики и информатики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, kurian90@mail.ru.

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

УДК 543.42.062

Н. Н. КУРЬЯН, В. В. СТАСЮКЕВИЧ, М. М. ТРУСОВА

УСТАНОВЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЁННОСТИ ВОДЫ РЕКИ НЕМАН

Использованы сорбенты для улучшения элементного состава и основных химических показателей воды реки Неман. Определена степень загрязнённости проб воды до сорбции путем определения химического и биохимического потребления кислорода. Проведена оценка снижения степени загрязнённости проб воды после сорбции путем определения химического и биохимического потребления кислорода.

Одним из основных показателей качества речной воды является химическое потребление кислорода (ХПК), отражающее количество кислорода, которое необходимо для окисления органических веществ в воде. Измерение ХПК необходимо для оценки уровня загрязнённости водоема и определения его самоочищающей способности. ХПК определяется количеством кислорода необходимым для окисления веществ в одном литре воды за определенный период времени, обычно 5 дней при температуре 20 °C. Этот индикатор помогает оценить уровень органического загрязнения воды [1]. Выше значения ХПК свидетельствуют о большем загрязнении, что может угрожать жизни водных организмов и экосистеме в целом. Высокие уровни ХПК указывают на наличие большого количества органических веществ, часто происходящих из сточных вод, разложения растительности или сельскохозяйственной деятельности. Это может способствовать развитию анаэробных условий, что отрицательно сказывается на жизни рыб и других организмов. За счет изменения состава водной среды высокие значения ХПК могут привести к снижению биоразнообразия, поскольку многие виды не могут выжить в условиях недостатка кислорода. Это может привести к доминированию устойчивых видов и нарушению естественного баланса. Река обладает способностью к самоочищению, однако при высоких концентрациях органических загрязнителей эта естественная система может оказаться перегруженной. Неинтенсивное загрязнение может быть эффективно устранено, но слишком высокие значения ХПК могут привести к биологической гибели [2]. Потребность микроорганизмов в кислороде для окисления органических веществ отражает биологическое потребление кислорода (БПК). По разности между показателями ХПК и БПК судят о составе речной воды и о наиболее предпочтительном методе ее очистки [3].

Общий азот в речной воде является важным показателем, который отражает уровень азотного загрязнения водоемов. Он включает в себя различные формы азота, такие как аммонийный, нитритный, нитратный и органический азот. Изучение общего азота в речной воде имеет ключевое значение для оценки состояния экосистем, а также для разработки мер по охране водных ресурсов [4]. Избыточное количество азота способствует росту водорослей, что может привести к эвтрофикации водоемов. Это, в свою очередь, вызывает снижение уровня кислорода в воде и угнетение других водных организмов. Повышение концентрации азота может изменить состав и структуру водных сообществ, что негативно сказывается на биоразнообразии. Некоторые формы азота, такие как аммоний, могут быть токсичными для водных организмов при высоких концентрациях [5].

Значение водородного показателя (рН) характеризует кислотные свойства среды. Вода водоемов должна иметь нейтральную среду, т. е. находиться в пределах от 6,5 по 8,5. Отклонение в меньшую сторону ведет к

усилению кислотности, в сторону увеличения – к усилению щелочных свойств. Сброс кислых сточных вод и снижение pH с 6 до 4,7 приводит к массовой гибели пресноводных рыб, раковинных моллюсков, водорослей и планктона [6].

Взвешенные вещества в речной воде представляют собой мелкие частицы, которые могут находиться в суспензии и влиять на качество водоемов. Эти вещества могут быть как органического, так и неорганического происхождения и включают в себя песок, ил, органические остатки, микроорганизмы и химические соединения. Изучение взвешенных веществ имеет актуальность для оценки состояния экосистем рек и их способности поддерживать жизнь [4].

Нормирование качества воды рек, проводится в соответствии с санитарными правилами и нормами СанПиН 2.1.2.12-33-2005 «Гигиенические требования к охране поверхностных вод от загрязнения» [5]. В соответствии с данным документом предельно допустимая концентрация по ХПК – не более 30 мгО₂/дм³, по БПК – не более 4 мгО₂/дм³. А также Постановления Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 15 декабря 2023 г. № 15 – Т [6] ПДК по данному нормативному документу для взвешенных веществ составляет не более 25,0 мг/дм³, водородный показатель (pH) в пределах 6,5–8,5.

Исходя из вышеизложенного, цель работы – установление степени загрязненности воды реки Неман, путем определения химического и биохимического потребления кислорода, pH, общего азота и взвешенных веществ.

Отбор проб воды производился по руслу реки Неман (д. Перелом «Образец № 1», д. Польница «Образец № 2», г. Гродно ул. Падольная «Образец № 3», д. Комотово «Образец № 4», д. Богатыревичи «Образец № 5») в летний сезон. Результаты по определению основных показателей, которые свидетельствуют о степени загрязненности, в образцах речной воды, за летний период представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты по обобщенным показателям качества образцов воды до сорбции

Показатель	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4	Образец № 5
БПК, мгО ₂ /дм ³	3,9	1,5	2,1	3,3	2,7
ХПК, мгО ₂ /дм ³	29,7	12,3	16,5	22,6	19,3
Общий азот по Кьельдалю, мг/дм ³	27,6	19,1	17,3	24,2	22,7
pH, ед.	6,8	7,6	6,9	7,9	7,4
Концентрация взвешенных веществ, мг/дм ³	6,9	2,7	3,1	5,2	2,2

В образце № 1 установлено превышение ПДК по показателю общий азот на 10 % и по взвешенным веществам на 1,9 мг/дм³. Данный показатель также превышен в образце № 4 на 0,2 мг/дм³, что может свидетельствовать о попадании в воду рядом с точкой забора, продуктов жизнедеятельности людей, пищевого мусора, навоза, отходов производств. Следует отметить также результаты по определению ХПК и БПК в данных образцах, которые близки к границам предельно допустимых концентраций. pH образцов находился в пределах 6,8–7,9, таким образом, реакция воды в бассейне р. Неман характеризуется как нейтральная, слабощелочная и щелочная (по классификации А. М. Никанорова).

Для улучшения элементного состава и основных химических показателей речной воды предложено использовать сорбенты, а именно: хитозан, МКЦ (микрокристаллическую целлюлозу) и диатомит в качестве фильтрующего материала. Сорбция оценивалась в статических условиях при внесении в образцы 0,01 г сорбента на 100 мл сорбата, повторное определение показателей качества образцов воды проводили спустя 1 ч (время и концентрации сорбентов соответствовали таковым для активированного угля, классически используемого для очистки сточных вод), результаты представлены в таблицах 2–4.

Таблица 2 – Результаты по обобщенным показателям качества образцов воды после сорбции хитозаном

Показатель	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4	Образец № 5
БПК, мгО ₂ /дм ³	1,7	1,1	1,3	2,1	1,9
ХПК, мгО ₂ /дм ³	13,6	9,8	12,1	17,2	13,9
Общий азот по Кьельдалю, мг/дм ³	22,6	18,4	16,8	20,3	19,7
pH, ед.	7,0	7,9	7,1	8,1	7,6
Концентрация взвешенных веществ, мг/дм ³	0,58	0,25	0,98	1,12	0,88

Установлено, что хитозан в результате сорбции снижал БПК в образцах на 26,7–56,4 %, ХПК на 20,2–54,2 %, общий азот на 16,8–22,6 %, концентрацию взвешенных веществ на 60,0–91,6 %, также хитозан подщелачивал воду, pH образцов после сорбции находился в диапазоне 7–8,1.

Таблица 3 – Результаты по обобщенным показателям качества образцов воды после сорбции МКЦ

Показатель	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4	Образец № 5
БПК, мгО ₂ /дм ³	2,9	1,4	1,8	3,1	2,6
ХПК, мгО ₂ /дм ³	28,8	11,5	15,7	21,0	18,7
Общий азот по Кьельдалю, мг/дм ³	26,9	18,8	17,1	23,7	21,9
рН, ед.	6,8	7,6	6,9	7,9	7,4
Концентрация взвешенных веществ, мг/дм ³	4,9	2,3	2,7	4,8	2,0

МКЦ снижала концентрацию БПК на 3,7–25,6 %, ХПК на 3,0–7,1 %, общий азот по Кьельдалю на 1,2–3,5 %, концентрацию взвешенных веществ на 7,7–29 %. Значение водородного показателя в образцах речной воды при сорбции МКЦ не изменялось.

Таблица 4 – Результаты по обобщенным показателям качества образцов воды после сорбции диатомитом

Показатель	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4	Образец № 5
БПК, мгО ₂ /дм ³	46,2	20,0	19,0	15,2	18,5
ХПК, мгО ₂ /дм ³	25,6	14,6	14,5	12,8	14,0
Общий азот по Кьельдалю, мг/дм ³	12,3	3,1	2,3	11,6	9,3
рН, ед.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Концентрация взвешенных веществ, мг/дм ³	63,8	37,0	48,4	55,8	45,5

Установлено, что диатомит снижал значение БПК на 15,2–46,2 %, ХПК на 12,8–25,6 %, общий азот по Кьельдалю на 2,3–12,3 %, концентрацию взвешенных веществ на 37,0–63,8 %. Значение водородного показателя при сорбции диатомитом не изменялось.

Результаты по определению основных показателей, которые свидетельствуют о степени загрязненности, в образцах речной воды, за осенний период представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты по обобщенным показателям качества образцов воды до сорбции

Показатель	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4	Образец № 5
БПК, мгО ₂ /дм ³	3,2	1,3	1,9	3,1	2,6
ХПК, мгО ₂ /дм ³	27,8	11,9	16,2	22,3	18,9
Общий азот по Кьельдалю, мг/дм ³	26,9	18,7	16,6	23,6	21,6
рН, ед.	7,0	7,8	7,2	8,2	7,9
Концентрация взвешенных веществ, мг/дм ³	5,0	2,4	3,0	4,9	2,1

Определено снижение по всем обобщенным показателям качества образцов воды. Концентрация загрязняющих веществ, в сточных водах, может быть ниже в летний период по нескольким причинам: увеличение температуры может способствовать более активному разложению органических веществ, что приводит к снижению их концентрации. В теплую погоду происходит большее испарение воды, что может уменьшать объем сточных вод и, соответственно, концентрацию загрязняющих веществ. Снижение объемов сточных вод, в это время года, попадающих в речное русло, может быть связано с уменьшением поливов и других водозаборов, а также в летний период активнее работают водные растения и микроорганизмы, которые могут поглощать некоторые загрязняющие вещества и выступать как естественные биофильтры.

Список литературы

1. Шигаева, Т. Д. Окислительно-восстановительный потенциал как показатель состояния объектов окружающей среды / Т. Д. Шигаева, Ю. М. Поляк, В. А. Кудрявцева // Биосфера. – 2020. – Т. 12, № 3. – С. 111–124.
2. Современное состояние и тенденции в экологической биотехнологии / А. Филонов [и др.] // Biologia et Biotechnologia. – 2024. – 2 с.
3. Состояние природной среды Беларуси : экологический бюллетень / Е. И. Громадская [и др.] ; под общ. ред. Е. И. Громадской. – Минск : РУП «ЦНИИКИВР», 2023. – 151 с.
4. Андреюк, С. В. Технологические схемы очистки и кондиционирования воды децентрализованных систем питьевого водоснабжения / С. В. Андреюк // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2022. – № 1 (127). – С. 2–5. – DOI: 10.36773/1818-1112-2022-127-1.
5. СанПиН 2.1.2.12–33–2005. Гигиенические требования к охране поверхностных вод от загрязнения: Санитарные правила и нормы : утв. Постановлением гл. гос. сан. врача Респ. Беларусь от 28 нояб. 2005 г., № 198.

6. Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 15 дек. 2023 г. № 15-Т [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=w22441063p>. – Дата доступа: 02.02.2025.

Sorbents were used to improve the elemental composition and main chemical indicators of the Neman River water. The degree of contamination of water samples before sorption was determined by determining the chemical and biochemical oxygen consumption. An assessment was made of the reduction in the degree of contamination of water samples after sorption by determining the chemical and biochemical oxygen consumption.

Курьян Николай Николаевич, старший преподаватель кафедры современных технологий программирования факультета математики и информатики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, kurian90@mail.ru.

Стасюкевич Вадим Валентинович, преподаватель кафедры системной биологии факультета биологии и экологии Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, Stasjkevich_VV@grsu.by.

Трусова Мария Михайловна, старший преподаватель кафедры технологии, физиологии и гигиены питания факультета биологии и экологии Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, Trusova_MM@grsu.by.

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

УДК 539.213.2

П. В. ЛИТОШИК, Н. С. МАГОНЬ

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА МЕТОДАМИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА И РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА²

Продemonстрированы возможности исследования структурных свойств высокочистых кварцевых стекол такими разрушающими методами, как рентгеноструктурный анализ (РСА) и спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС). РСА был использован для того, чтобы оценить такие важные для аморфного материала параметры, как среднее значение радиуса первой координационной сферы и долю свободного объёма. КРС же даёт представление о структуре кварцевого стекла, в частности, позволяет оценить содержание в исследуемом объёме материала таких дефектов структуры, как трёх- и четырёхчленные кольца (дефекты $D2$ и $D1$ соответственно). Данными методами были исследованы структурные свойства стандартного образца (стекло Corning 7980) и двух образцов стёкол, синтезированных в Институте тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, отличающиеся условиями синтеза (начальным условием соответствует образец 1, а изменённым – образец 2). Результаты анализа показали, что благодаря изменению условий синтеза структура кварцевого стекла стала схожей со структурой образца, взятого за стандартный.

Кварцевое стекло SiO_2 , являясь аморфным материалом, представляет собой твёрдое тело с фиксированным объёмом и формой, характеризующееся ближним порядком и слабым дальним порядком (т. н. средний порядок) [1]. Ещё в 1932 году В. Г. Захариассен предположил, что структуру аморфного SiO_2 можно имитировать моделью беспорядочной сетки, в которой каждый атом кремния находится в центре тетраэдра, а атомы кислорода – в его вершинах, что впоследствии было подтверждено другими исследователями [2]. Тетраэдры соединяются друг с другом через атомы кислорода, образуя кольцевые структуры, формирующие средний порядок и состоящие преимущественно из 6 тетраэдров [3].

Высокочистые кварцевые стёкла нашли широкое применение в микроэлектронике, в частности они используются как оптические стёкла, прозрачные в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне. С ростом концентрации в структуре стекла трёх- и четырёхчленных колец происходит рост коэффициента поглощения в УФ [4], а также меняются другие физические свойства стекла [3]. Данные малочленные кольцевые структуры могут также формироваться в поверхностных слоях стекла при обработке поверхности [3]. Поэтому необходимо следить за содержанием таких колец в стёклах, чтобы учитывать это при выборе оптимальных условий синтеза стекла и последующей его полировки. Понимание данной зависимости является ключом в повышении их эффективности и долговечности.

Исследуемые образцы были изготовлены в Институте тепло- и массообмена методом высокотемпературного газопламенного осаждения микрочастиц диоксида кремния SiO_2 . Образец 1 был изготовлен одним из первых. Затем условия синтеза были изменены с целью оптимизации процесса изготовления, и, таким образом, был получен образец 2 (менялись внешние факторы, расходы реагентов сохранялись).

²Работа была выполнена в рамках ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии», подпрограмма 1.2 «Энергетические процессы и технологии» (задание ЭП – 2.33).

В качестве методов исследования структурных свойств кварцевых стёкол в данной работе выступали (1) рентгеноструктурный анализ и (2) комбинационное рассеяние света. Используя первый метод, можно оценить такие параметры, как среднее значение радиуса первой координационной сферы и изменение доли свободного объёма относительно стандартного образца.

Для оценки первого параметра была использована формула Эренфеста [5; 6]:

$$2R_1 \sin \theta = 1,23\lambda, \quad (1)$$

где R_1 – среднее значение радиуса первой координационной сферы; 2θ – угол рассеяния, соответствующий их положению основного максимума аморфного гало; λ – длина волны излучения.

Для оценки второго параметра была использована следующая формула [5]:

$$\Delta V = \frac{(R_{def}^3 - R_{ini}^3)}{R_{ini}^3} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где ΔV – изменение доли свободного объёма; R_{def} и R_{ini} – радиусы первой координационной сферы деформированного (синтезированного) и исходного (стандартного) образца соответственно.

С помощью спектроскопии КРС можно оценить содержание четырёх – и трёхчленных колец (дефекты $D1$, $\sim 490 \text{ см}^{-1}$ и $D2$, $\sim 600 \text{ см}^{-1}$, соответственно) по их интенсивности относительно пика ω_3 ($\sim 800 \text{ см}^{-1}$, одно основных структурных колебаний кварцевого стекла), поскольку известно, что его интенсивность, отнесённая ко всему спектру КРС является величиной относительно постоянной [9].

В данном исследовании дифрактограммы были получены на дифрактометре RigakuUltima IV с использованием излучения медной трубки ($\lambda = 0,154178 \text{ нм}$). Использование такого рентгеновского излучения не позволяет надёжно идентифицировать структурные данные, такие как межатомные расстояния и углы [7], но оно даёт возможность оценить степень структурных изменений, происходящих в аморфном материале [8]. Спектры комбинационного рассеяния были получены на спектрально-аналитическом комплексе NanoFinderHE; длина волны возбуждающего излучения составила 473 нм.

Дифрактограммы исследуемых образцов и параметры первых дифракционных максимумов приведены на рисунке 1, а и полностью соответствуют литературным данным [10]. Стоит отметить, что параметры максимума образца 2 более близки к параметрам стандартного образца, что указывает на схожесть их структурных свойств. По формуле (1) были оценены средние значения радиусов первой координационной сферы (рисунок 1б). Для образца 2 и стандартного образца они оказались близкими по своим значениям, в то время как для образца 1 этот параметр среди исследуемых образцов оказался наибольшим, что может говорить о более дефектной структуре [8]. Также полуширина максимума гало образца 1 значительно больше полуширины максимума гало стандартного образца. По формуле (2) были оценены доли свободного объёма относительно стандартного образца (рисунок 1б). Оказалось, что значение данного параметра для образца 1, в сравнении с образцом 2, отличается более чем в два раза, что также согласуется с тем, каким образом соотносятся между собой определённые ранее значения полуширин первых дифракционных пиков, и указывает на большую долю свободного объёма в образце 1, по сравнению с образцом 2.

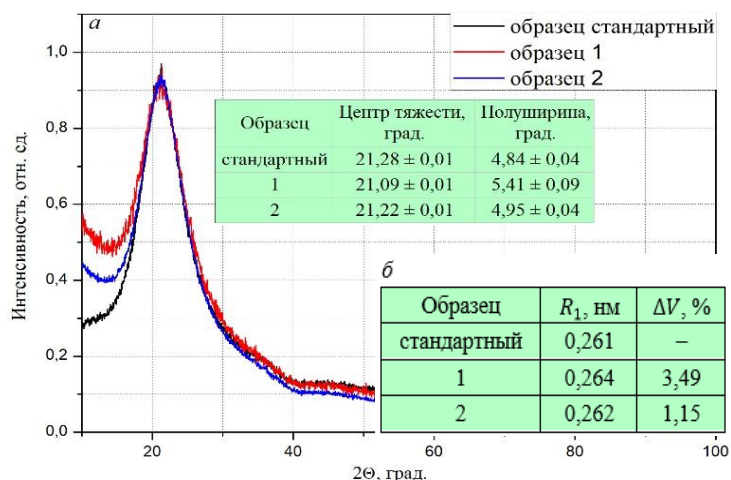


Рисунок 1 – (а) Дифрактограммы исследуемых образцов и параметры их первых дифракционных максимумов; (б) результаты косвенных измерений радиусов первых координационных сфер и изменений свободного объёма относительно стандартного образца

Спектры КРС исследуемых образцов, а также интенсивности пиков $D1$, $D2$ и $\omega 3$ представлены на рисунке 2а. На рисунке 2б схематически представлены трёх- и четырёхчленные кольца ($D2$ и $D1$ соответственно) [3]. Полученные спектры полностью соответствуют литературным данным и представляют собой типичные спектры КРС кварцевого стекла [3]. С учётом погрешности измеренной интенсивности можно заключить, что вклад колебаний основной структуры $\omega 3$ одинаков во всех исследуемых образцах и что стандартный образец и образец 2 по оценкам содержат равные концентрации трёх- и четырёхчленных колец, а в образце 1 их концентрация выше.

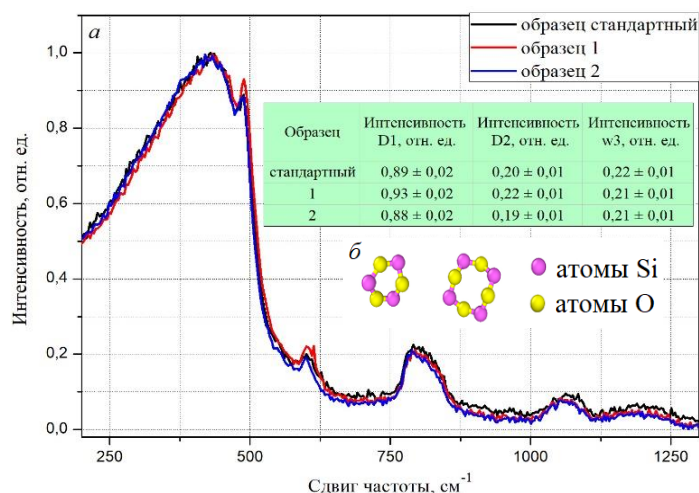


Рисунок 2 – (а) Спектры КРС исследуемых образцов и интенсивности пиков $D1$ и $D2$ и $\omega 3$; (б) схематическое представление трёх- и четырёхчленных колец

Таким образом, в данной работе были рассмотрены отдельные аспекты применения рентгеноструктурного анализа и комбинационного рассеяния света для исследования структурных свойств кварцевых стекол. Как видно из данных, представленных на рисунке 1 и рисунке 2а, образец 1 демонстрирует большее отклонение от стандартного образца по исследуемым параметрам, чем образец 2. По итогам проделанной работы можно заключить, что в результате оптимизации условий синтеза структурные свойства получаемого кварцевого стекла были приближены к свойствам образца, взятого за стандартный, что следует из близких средних значений радиусов первой координационной сферы и одинаковых концентраций трёх- и четырёхчленных колец в структурах стандартного образца и образца 2.

Список литературы

1. Madsen, I. C. Description and survey of methodologies for the determination of amorphous content via X-ray powder diffraction / I. C. Madsen, N. V. Y. Scarlett, A. Kern // *Zeitschrift für Kristallographie*. – 2011. – Vol. 226, № 12. – P. 944–955.
2. Скрышевский, А. Ф. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел : учеб пособие / А. Ф. Скрышевский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1980. – 328 с.
3. Evolution of ring structures and method for inhibition in polishing of fused silica / Q. Mu [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2024. – Vol. 645. – P. 158830.
4. Physical disorder and optical properties in the vacuum ultraviolet region of amorphous SiO_2 / H. Hosono [et al.] // *Physical review letters*. – 2001. – Vol. 87, № 17. – P. 175501.
5. Changes in the structure of amorphous alloys under deformation by high-pressure torsion and multiple rolling / G. Abrosimova [et al.] // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, № 3. – P. 1321.
6. Rachek, O. P. X – ray diffraction study of amorphous alloys Al – Ni – Ce – Sc with using Ehrenfest's formula / O. P. Rachek // *Journal of non-crystalline solids*. – 2006. – Vol. 352, № 36–37. – P. 3781–3786.
7. Petkov, V. Pair distribution functions analysis / P. Petkov // *Characterization of Materials*. – 2012. – P. 112.
8. Магонь, Н. С. Идентификация структурных изменений аморфного диоксида кремния методом рентгеноструктурного анализа / Н. С. Магонь, В. В. Углов // *XI Международная школа-конференция молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики – 2024»*, Минск, 24–26 апр. 2024. – С. 201–204.
9. Femtosecond laser modification of fused silica: the effect of writing polarization on Si – O ring structure / D. J. Little [et al.] // *Optics express*. – 2008. – Vol. 16, № 24. – P. 20029–20037.
10. Nandanwar, R. Synthesis and characterization of SiO_2 nanoparticles by sol-gel process and its degradation of methylene blue / R. Nandanwar, P. Singh, F. Z. Haque // *American Chemical Science Journal*. – 2015. – Vol. 5, № 1. – P. 1–10.

This study demonstrates the capabilities of investigating the structural properties of high-purity quartz glasses using non-destructive methods such as X-ray diffraction analysis (XRD) and Raman spectroscopy. XRD was employed to evaluate key parameters of the amorphous material, including the average radius of the first coordination sphere and the free volume fraction. Raman

spectroscopy provided insights into the structural features of quartz glass, particularly enabling the quantification of structural defects such as three-membered (D2 band) and four-membered (D1 band) rings within the material. These methods were applied to analyze the structural properties of a reference sample (Corning 7980 glass) and two glass samples synthesized at the A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, differing in synthesis conditions (sample 1 corresponds to the initial conditions, while sample 2 represents modified conditions). It was demonstrated that modifying the synthesis conditions led to a quartz glass structure closely resembling that of the reference standard.

Литошик Павел Валерьевич, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, litoshikp@gmail.com.

Научные руководители – *Магонь Наталья Сергеевна*, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной Академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь, nsmahon@hmti.ac.by;

Углов Владимир Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, uglov@bsu.by.

УДК 542.8:54.057

А. В. ГОГА, А. А. СЕБЕШЕВ, Т. А. ТУМАНОВ, У. Е. ТУРОВЕЦ

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ПОЛИАНИЛИНА

Осуществлен синтез полианилина по методике ИЮПАК, проведены рентгенодифракционный анализ и ИК-спектроскопия синтезированного полианилина и нанесенного на алюминиевую фольгу из его растворов в диметилформамиде и диметилсульфоксиде. На основании полученных результатов предложено применение в фотовольтаических ячейках.

Полианилин (ПАНИ, англ. *PANI*) – это широко известный полимер, являющийся весьма удобным в применении материалом, благодаря безопасности для организма человека, наличию свойства электропроводимости и простоте получения. ПАНИ представляет собой полимерную цепь повторяющихся звеньев, каждое из которых состоит из трех бензольных колец, разделённых аминными группами, и хиноидного кольца, окруженного ионными группами. В зависимости от соотношения количества бензоидных и хиноидных фрагментов ПАНИ может находиться в различных степенях окисления, которые связаны обратимыми переходами [1]. На сегодняшний момент различают три основных формы ПАНИ: пернигранилин, лейкоэмеральдин, эмеральдин.

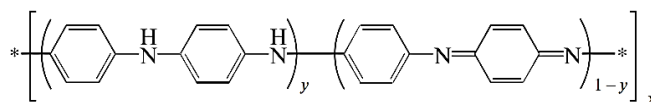


Рисунок 1 – Фрагмент молекулы ПАНИ

В общем случае ПАНИ имеет структуру, состоящую из фрагментов, составленных из восстановленных (y) и окисленных ($y - 1$) мономерных звеньев (рисунок 1) [2].

Для ПАНИ окисленное состояние описывается значением y , которое может принимать значения от нуля, до единицы. При $y = 0$, ПАНИ находится в полностью окисленном состоянии, то есть в форме пернигранилина; значению $y = 0,5$ соответствует состояние эмеральдина; при $y = 1$ ПАНИ принимает форму лейкоэмеральдина (рисунок 2) [2].

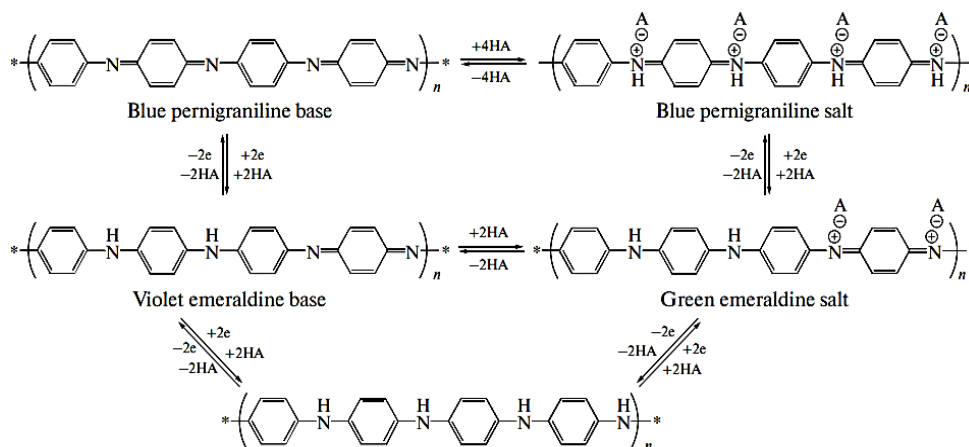


Рисунок 2 – Основные состояния ПАНИ и переходы между ними

В данной работе исследованы свойства ПАНИ, полученного по «стандартной» методике, рекомендованной ИЮПАК [3]. Для синтеза ПАНИ использовали по 50 мл 0,2 М водных растворов анилина гидрохлорида и 0,25 М персульфата аммония. Оба раствора выдерживали в течение часа, а затем перемешивали и оставляли в состоянии покоя на время полимеризации. На следующий день осадок ПАНИ собирали на фильтре и промывали тремя порциями по 100 мл 0,2 М раствора HCl и таким же объёмом ацетона. Затем полученный порошок в течение суток проходил сушку в вакуумируемом сушильном шкафу при температуре около 60 °С.

На рисунке 3 изображены результаты рентгенодифракционных исследований. Дифрактограммы были получены с помощью установки ДРОН-ЗМ, подключенной к персональному компьютеру с помощью аналого-цифрового преобразователя, позволившего регистрировать результаты в цифровом виде, с использованием $\text{CuK}\alpha$ – излучения и графитового фильтра с шагом 0,04° и экспозицией продолжительностью 2 с в каждой точке. На рисунке 3а приведены рентгенодифракционные спектры (РДС) густой суспензии порошка ПАНИ в медицинском вазелине (на врезке показана фотография экспериментального образца).

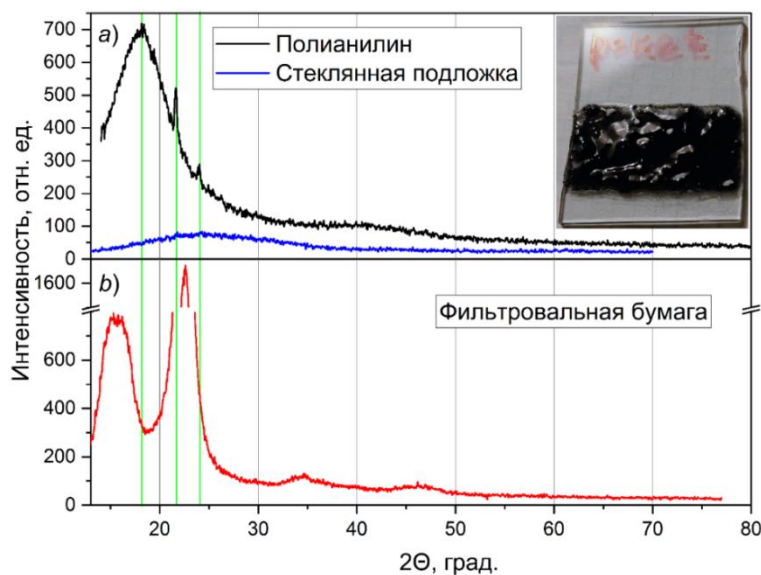


Рисунок 3 – Рентгенодифракционные спектры:
а) ПАНИ на стекле и стеклянной подложки, б) фильтровальной бумаги

Показаны также РДС стеклянной подложки и фильтровальной бумаги, использованной для отделения ПАНИ от маточного раствора и его промывки (рисунки 3а и 3б соответственно), в целях исключения возможного мешающего влияния их максимумов при интерпретации рентгенодифракционного спектра ПАНИ. Размытый максимум низкой интенсивности на спектре стеклянной подложки рассмотрению РДС ПАНИ не мешает. РДС фильтровальной бумаги (рисунок 3б) неплохо согласуется с образцом сравнения, описанным в [4] и данными, приведёнными в [5]. При этом наиболее интенсивный пик кристаллической целлюлозы, соответствующий отражению от плоскости (200) на РДС ПАНИ совершенно не выражен, что свидетельствует о практическом отсутствии примесей волокон целлюлозы в синтезированном полимере после его промывки и фильтрации. Что касается самого РДС ПАНИ, то форма его достаточно своеобразна и отличается от аналогичных спектров, описанных, например, в [6; 7]. В нашем случае чётко выражен широкий максимум высокой интенсивности, соответствующий 2θ 18,32°, небольшой острый максимум 19,42°, острые максимумы 21,68°, 23,94° и широкий максимум, соответствующий примерно 41°. В [6] показаны пики на РДС, соответствующие углам 19° и 25°, а в работе [7] чётко присутствуют пики, соответствующие 15°, 20° и 25°, и в обеих работах не упоминаются максимумы на больших углах. Объяснение заметных расхождений полученных нами положений максимумов с литературными данными требует дополнительного анализа.

Состав образцов определяли методами абсорбционной ИК-спектроскопии (IRRAS, диффузное отражение). Для этого был использован ИК – Фурье спектрометр Nexus (Thermo-Nicolet). Спектры поглощения зарегистрированы в диапазоне 400–4000 cm^{-1} с разрешением 4 cm^{-1} после 128 сканов с помощью DTGS-детектора. Перед записью спектров кюветное отделение продували сухим воздухом. Для подготовки проб для ИК-спектроскопии в режиме отражения вначале были приготовлены насыщенные при комнатной температуре растворы ПАНИ в диметилформамиде (ДМФА) и диметилсульфоксиде (ДМСО). Затем растворы по каплям наносили на алюминиевую фольгу и выпаривали из растворов при температуре 80–85 °С. В качестве образцов сравнения использована обратная сторона фольги. Для сравнения получен ИК-спектр исходного порошка ПАНИ в режиме диффузного отражения, который оказался практически идентичен спектрам образцов, нанесённых из растворов. ИК-спектры представлены на рисунке 4 «как есть», без дополнительной обработки. Анализ показывает практи-

чески идеальное совпадение полос поглощения с данными, приведёнными в [2; 8]. Данные ИК-спектроскопии подтверждают, что полученный материал – ПАНИ в форме эмеральдина.

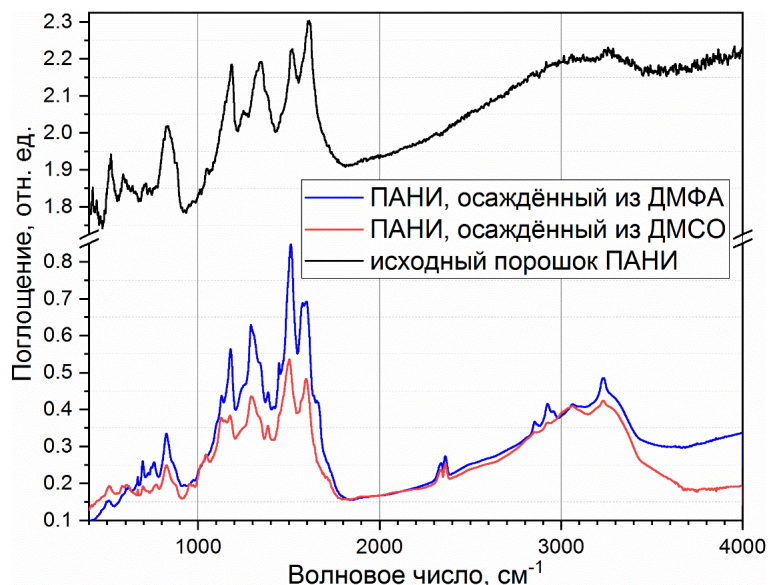


Рисунок 4 – Результаты ИК-спектроскопии образцов ПАНИ

ПАНИ, а именно его форма эмеральдин, благодаря своим свойствам получил весьма широкое распространение в электронике. Его проводимость составляет около $4,5 \text{ С/см}^{-1}$ [3]. В то время, как эмеральдин сам по себе проявляет высокую стабильность в условиях окружающей среды и имеет широкий спектр поглощения в области видимого излучения, он становится отличным материалом, выполняющий роль проводящего слоя в различных нанокompозитных структурах, например, в структуре ПАНИ/ TiO_2 /FTO – стекло. Нанокompозит ПАНИ – TiO_2 имеет ширину запрещенной зоны $\approx 2,10 \text{ эВ}$, что сопоставимо с энергией фотонов видимого и ультрафиолетового излучения. Таким образом, слои PANI – TiO_2 могут являться отличной основой для дальнейшего использования в фотоэлементах в качестве фотоанодов [9].

Таким образом, в данной работе был синтезирован ПАНИ по методике, рекомендованной ИЮПАК, на РДС спектре ПАНИ чётко выражен широкий максимум высокой интенсивности, соответствующий $2\theta 18,32^\circ$, небольшой острый максимум $19,42^\circ$, острые максимумы $21,68^\circ$, $23,94^\circ$ и широкий максимум, соответствующий примерно 41° , ИК-спектр ПАНИ нанесенного из растворов DMF и DMSO имеет стандартный вид для формы эмеральдина, предложено дальнейшее применение в фотовольтаической ячейке.

Полианилин является универсальным в использовании полимерным проводящим материалом, который сочетает в себе устойчивость к внешним воздействиям, высокую проводимость, а также простоту в изготовлении, что делает его применение перспективным в различных сферах.

Список литературы

1. Шматко, В. А. Особенности электронной структуры и химических связей в композитах на основе полианилина, полученных бескислотным синтезом / В. А. Шматко, Т. Н. Мясоедова, Т. А. Михайлова, Г. Э. Яловега // *Condensed Matter and Interphases*. – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 569–578. – DOI: 10.17308/kcmf.2019.21/2367.
2. Boeva, Zh. A. Polyaniline: Synthesis, Properties, and Application / Zh. A. Boeva, V. G. Sergeyev // *Polymer Science*. – 2014. – Vol. 56, № 1. – P. 153–164. – DOI: 10.1134/S1811238214010032.
3. Stejskal, J. Polyaniline. Preparation of a conducting polymer / J. Stejskal, R. G. Gilbert // *Pure and Applied Chemistry*. – 2002. – Vol. 74. – P. 857–867. – DOI: 10.1351/pac200274050857.
4. Lee, C. Correlations of Apparent Cellulose Crystallinity Determined by XRD, NMR, IR, Raman, and SFG Methods / C. Lee, K. Dazen, K. Kafle, A. Moore, D. Johnson, S. Park, S. Kim // *Advances in Polymer Science*. – 2015. – Vol. 271. – P. 115–131. – DOI: 10.1007/12_2015_320.
5. Секушин, Н. А. Количественный рентгено – структурный анализ модифицированных целлюлоз / Н. А. Секушин, Л. С. Кочева, В. А. Демин // *Химия растительного сырья*. – 1999. – Т. 1. – С. 59–64.
6. Shah, A.-H. A. Cost Effective Chemical Oxidative Synthesis of Soluble and Electroactive Polyaniline Salt and Its Application as Anticorrosive Agent for Steel / A.-H. A. Shah, M. Kamran, S. Bilal, R. Ullah // *Materials*. – 2019. – Vol. 12, Iss. 9. – Art # 1527. – DOI: 10.3390/ma12091527.

7. Rahy, A. Synthesis of highly conductive polyaniline nanofibers / A. Rahy, D. J. Yang // Mater. Lett. – 2008. – Vol. 62, Iss. 28. – P. 4311–4314. – DOI: 10.1016/j.matlet.2008.06.057.
8. Baicea, C. M. Composite membranes with poly (ether ether ketone) as support and polyaniline like structure, with potential applications in fuel cells / C. M. Baicea, V. I. Luntraru, D. I. Vaireanu, E. Vasile, R. Trusca // Central European Journal of Chemistry. – 2013. – Vol. 11, № 4. – P. 438–445. – DOI: 10.2478/s11532-012-0175-2.
9. Himmah, S. W. The Effect of Spin Coating Rotation on the Optoelectronic Properties of PANI/TiO₂/FTO – Glass Photoanode / S. W. Himmah, U. Sa'adah, A. D. Iswatin, M. Diantoro, A. Hidayat, Z. A. Imam Supardi // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 515, Iss. 1. – Art. # 012084. – DOI: 10.1088/1757-899X/515/1/012084.

The article briefly describes methods of synthesis of the polyaniline and its types. The article presents a study of polyaniline properties using IR and X-ray diffraction techniques, highlighting its promising prospects as a thin film material in solar cell devices.

Гога Александр Владимирович, аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, a.goga@bsuir.by.

Себешев Алексей Александрович, студент факультета радиоэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, aleksejsebeshev@gmail.com.

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

Туровец Ульяна Егоровна, аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, u.turovets@bsuir.by.

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

УДК 621.383.51-048.24

Т. Н. ОСМОЛОВСКАЯ, А. В. СТАНЧИК

СИНТЕЗ КРИСТАЛЛОВ СОЕДИНЕНИЙ $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$ ³

Однотемпературным методом были получены поликристаллы соединений $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ и $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$. Определена кристаллическая структура и рассчитаны параметры элементарной ячейки синтезированных поликристаллов. Проведены измерения удельного сопротивления образцов при комнатной температуре.

Четвертные полупроводниковые соединения класса $\text{Cu}_2\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{IV}}\text{X}_4^{\text{VI}}$ (где A = Zn, Cd, Ni, Fe, Co, Mn; B^{IV} = Si, Ge, Sn и X^{VI} = S, Se) являются перспективными материалами для использования в полупроводниковых устройствах, что обусловлено существенной вариабельностью их свойств в зависимости от входящих компонентов [1–3]. Перспектива также обусловлена высокими значениями коэффициента оптического поглощения и возможностью реализовать поглощающий слой с шириной запрещенной зоны в диапазоне 1,0–2,5 эВ. Кроме оптического применения наличие в составе соединений и твердых растворов Fe, Ni, Co, Mn делает данные материалы перспективными в качестве магнитных полупроводников. Одним из перспективных направлений развития в данном классе являются соединения $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ и $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$ [4–5]. Однако данных, в частности, по электрофизическим и оптическим свойствам $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ в литературе мало [4; 6; 7]. В [4] исследована природа и структура однофазного $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$, структурные параметры, плотность дислокаций и деформация, ширина запрещенной зоны, показатель преломления, оптоэлектрические характеристики (плазменная частота оптическая проводимость, оптическое сопротивление и концентрация оптических носителей заряда), нелинейные оптические показатели, полупроводниковые характеристики p – типа, толщина. Поэтому в данной статье приведены результаты исследования соединений $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$ с помощью рентгеновской дифракции.

Соединения $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ и $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$ были получены однтотемпературным методом в кварцевых ампулах. Ампулы перед использованием подвергались травлению в царской водке, после чего многократно промывались в деионизованной воде и термически обрабатывались при температуре 1173 К в течение 5 часов. Предварительно подготовленные исходные компоненты: медь, никель, олово, германий, селен чистоты не ниже 99,99 % загружались в ампулу в соотношении 2:1:1:4, расчётная масса получаемого кристалла 10 г. Селен брался с избытком от стехиометрии 3–5 % исходя из потерь, возникающих при откачке ампулы, а также для создания противодавления внутри ампулы при синтезе. Ампулы подсоединялись к вакуумной системе и откачивались до остаточного давления 10^{-2} – 10^{-3} Па, а затем происходила их отпайка. Ампулы с веществом помещались в наружную ампулу большего диаметра и повторно отпайвались. Наружная ампула использовалась для предотвращения растрескивания внутренней ампулы после синтеза поликристаллов при их охлаждении. Внешний вид

³Работа выполнена в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии».

внутренней ампулы до и после синтеза показан на фотографиях, представленных на рисунке 1а и 1б, соответственно (приведено на примере $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$).



а)



б)

Рисунок 1 – Ампула с исходными компонентами (а) и синтезированным поликристаллом $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ (б)

Ампула с веществом располагалась в печи Бриджмена. Градиент внутри печи от низа к верху ампулы составлял 20–30 К. С учётом усадки градиент по расчётной длине поликристалла составлял около 10 К.

Поскольку в качестве халькогена использовался только селен, температуру внутри печи поднимали со скоростью ~ 150 К/ч до 1023 К, а затем следовала 6 часовая изотермическая выдержка. Далее температуру повышали до конечной 1323 К со скоростью 15 К/ч, после чего следовала изотермическая выдержка в течение 6 часов с включением вибрационного перемешивания на 30 мин. Кристаллизацию проводили со скоростью 30 К/ч до 773 К. После следовало свободное охлаждение до комнатной температуры. Гомогенизирующий отжиг проводился в отдельной печи в течение 240 часов при температуре 873 К.

Исследование порошков синтезированных поликристаллов с помощью рентгеновской дифракции осуществлялось на дифрактометре ДРОН-3М с использованием CuK α -излучения ($\lambda = 1,5406$ Å). Обработка данных проводилась при помощи FullProf (в основе которого заложен полнопрофильный анализ рентгенограмм по методу Ритвельда) и X'Pert High Score Plus. Фазовый состав определялся путем сопоставления экспериментально полученных данных со стандартными данными Powder Diffraction File (PDF) базы данных The International Centre for Diffraction Data (ICDD). Для измерений удельного сопротивления из поликристаллов были вырезаны пластины толщиной 2 мм и в последующем подвергнуты шлифовке и полировке пастой ГОИ № 3.

Рентгенограммы синтезированных порошков $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ и $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$ представлены на рисунке 2. В обоих случаях рентгеновская дифракция подтверждает поликристаллическую природу синтезированных образцов.

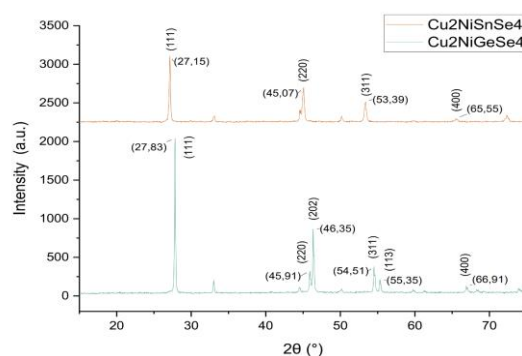


Рисунок 2 – Рентгенограммы для синтезированных порошков соединений $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ и $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$

На рентгенограмме образцов порошков $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ обнаруженные рефлексы при $2\theta \approx 27,15^\circ$, $45,07^\circ$, $53,39^\circ$ и $65,55^\circ$ характерны для кубической структуры пространственной группы $F4m$ (PDF#26-0551) и соответствуют дифракционным плоскостям (111), (220), (311) и (400), соответственно. В то время как образцы соединения $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$ кристаллизовались в тетрагональную структуру пространственной группы $P4$ (PDF#26-0548). На рентгенограмме данных образцов обнаруженные рефлексы при $2\theta \approx 27,83^\circ$, $45,91^\circ$, $46,35^\circ$, $54,51^\circ$, $55,35^\circ$ и $66,91^\circ$, соответствующие плоскостям (111), (220), (202), (311), (113) и (400), указывают на кристаллическую структуру типа станнита [8]. При этом характерное расщепление для данного соединения рефлексов при $2\theta \approx 45,91/46,35^\circ$ и $54,51/55,35^\circ$ указывает на тетрагональную, орторомбическую или моноклинную деформацию кристаллической ячейки станнита [8].

В обоих случаях на рентгенограммах синтезированных порошков поликристаллов, помимо рефлексов от основной фазы $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ или $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$ присутствуют низкоинтенсивные рефлексы от примесной фазы Cu_2Se кубической кристаллической структуры (PDF#79 – 1841).

В таблице 1 представлено сравнение положений рефлексов на рентгенограммах синтезированных порошков $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ и $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$ в данной работе с теоретическими данными PDF-файлов 26-0551 и 26-0548, соответственно. Из представленных в таблице данных видно, что для образцов $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ характерен сдвиг всех дифракционных рефлексов в сторону больших углов, что указывает на уменьшение межплоскостного расстояния кристаллической решетки и, соответственно, размера элементарной ячейки. В то время как для образцов порошков $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ характерен сдвиг в большую сторону дифракционных углов более интенсивных рефлексов 111, 202, а также 113, тогда как остальные рефлексы: 220, 311, 400, претерпевают сдвиг в сторону меньших углов.

Таблица 1 – Сравнение положений (2θ , °) рефлексов на рентгенограммах синтезированных порошков $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ и $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$ в данной работе с теоретическими данными PDF-файлов

hkl	PDF#26-0551 ($\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$)	PDF#26-0548 ($\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$)	В данной работе	
			$\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$	$\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$
111	27,072	27,795	27,15	27,83
220	–	45,960	–	45,91
202	44,902	46,308	45,07	46,35
311	53,210	54,546	53,39	54,51
113	–	55,258	–	55,35
400	65,390	67,032	65,55	66,91

Рассчитанные параметры элементарной ячейки с помощью программы FullProf для порошков синтезированных поликристаллов составляют: $a = 5,69 \pm 0,05 \text{ \AA}$ для $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ и $a = 5,59 \pm 0,05 \text{ \AA}$, $c = 5,48 \pm 0,05 \text{ \AA}$ для $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$, что хорошо согласуется с литературными данными: $a = 5,705 \text{ \AA}$ для $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ (PDF#26-0551) и $a = 5,581 \text{ \AA}$, $c = 5,500 \text{ \AA}$ для $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$ (PDF#26-0548), соответственно.

Измерения удельного сопротивления полученных поликристаллов при 293 К показали, что оба соединения являются низкоомными: $6,3 \text{ Ом}\times\text{см}$ для $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ и $8,1 \text{ Ом}\times\text{см}$ для $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$.

Таким образом, в работе получены низкоомные поликристаллы $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ и $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$ однокристаллическим методом с составом близким к однофазному и параметрами кристаллической ячейки, находящимися в хорошем соответствии с литературными. Полученные результаты рентгеновской дифракции подтверждают формирование необходимых соединений $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$, но требуется дальнейшая оптимизация режимов их синтеза для получения однофазного состава. Тем не менее, результаты указывают на возможность получения поликристаллических соединений $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$ используемым методом и его режимов для создания на их основе полупроводниковых приборов (например, солнечных элементов [4]).

Список литературы

1. Emerging inorganic solar cell efficiency tables (Version 1) / L. H. Wong [et al.] // Journal of Physics: Energy. – 2019. – Vol. 1. – P. 032001 (1–16).
2. 7.6 % CZGSe Solar Cells Thanks to Optimized CdS Chemical Bath Deposition / L. Choubac [et al.] // Physica status solidi A. – 2018. – Vol. 215, №. 13. – P. 180043-1–180043-9.
3. Optoelectronic properties of thin film $\text{Cu}_2\text{ZnGeSe}_4$ solar cells / S. Sahayaraj [et al.] // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2017. – Vol. 171. – P. 136–141.
4. Alsulami, A. Synthesis and Characterization of Multifunctional $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ Thin Films and ITO/CdS/ $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ /Au Solar Cell / A. Alsulami, A. Alsalmi // ECS J. Solid State Sci. Technol. – 2024. – Vol. 13, №. 12. – P. 124005.
5. Synergistic optimization of thermoelectric properties in $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ composited with CuO nanoparticles / J. Mani [et al.] // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2024. – Vol. 26. – P. 27066–27077.

6. Исследование кинетики гибели неравновесных носителей заряда в четверных соединениях меди $\text{Cu}_{2-\delta}\text{NiSnS}_4$ ($0 \leq \delta \leq 0.2$) / М. В. Гапанович [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2021. – № 12. – Р. 1176.

7. Гапанович, М. В. Новые поглощающие слои на основе четверных соединений меди $\text{Cu} - \text{A} - \text{B} - \text{S} - \text{Se}$ ($\text{A} = \text{Ba}, \text{Sr}, \text{Fe}, \text{Ni}, \text{Mn}$; $\text{B} = \text{Si}, \text{Ge}, \text{Sn}$) для тонкопленочных солнечных элементов третьего поколения (обзор) / М. В. Гапанович, В. В. Ракитин, Г. Ф. Новиков // Журнал неорганической химии. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 3–32.

8. Schafifer, W. Tetrahedral quaternary chalcogenides of the type $\text{Cu}_2 - \text{II} - \text{IV} - \text{S}_4(\text{Se}_4)$ / W. Schafifer, R. Nitsche // Materials Research Bulletin. – 1974. – Vol. 9, No. 5. – P. 645–654.

Polycrystalline samples of the compounds $\text{Cu}_2\text{NiSnSe}_4$ and $\text{Cu}_2\text{NiGeSe}_4$ were obtained using a single-temperature method. The crystal structure was determined, and the unit cell parameters of the synthesized polycrystals were calculated. The resistivity of the samples was measured at room temperature.

Осмоловская Татьяна Николаевна, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, г. Минск, Республика Беларусь, osmolovskayatatsiana@gmail.com.

Научный руководитель – *Станчик Алёна Викторовна*, кандидат физико-математических наук, доцент, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, г. Минск, Республика Беларусь, alena.stanchik@bk.ru

Шевчик Павел Владимирович, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, г. Минск, Республика Беларусь, fiz.sheuchyuk@gmail.com.

Научный руководитель – *Станчик Алена Викторовна*, кандидат физико-математических наук, доцент, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, г. Минск, Республика Беларусь, alena.stanchik@bk.ru

УДК 543.42.062

Н. Н. КУРЬЯН, В. В. СТАСЮКЕВИЧ, М. М. ТРУСОВА, С. Н. АНУЧИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА БЕСПОЗВОНОЧНЫХ ОРГАНИЗМОВ РЕКИ НЕМАН

Проведено исследование элементного химического состава мышечной ткани беспозвоночных организмов реки Неман по средствам использования метод арентгенофлуорисцентного спектрального анализа. В исследуемых образцах присевают, как макроэлементы (Ca, S, Cl, K), так и тяжелые металлы (Hg, Pb, Sb). Выявлена тенденция к накоплению Sr в тканях моллюсков, что может быть связано с особенностями его метаболизма или составом окружающей среды. Полученные результаты представляют собой важную информацию для мониторинга качества речной среды. Необходимы дальнейшие исследования для выявления источников загрязнения и разработки мер по их устранению.

Одним из часто используемых методов мониторинга водных объектов является метод биондикации, который позволяет судить о качестве водоёмов по состоянию живущих в них живых организмов – биоиндикаторов [1].

Живая природа – самый точный индикатор состояния водной среды, с которым не сравнится ни один существующий прибор [2]. Лучшими «приборами», оценивающими качество воды в любой водной экосистеме, являются ее водные обитатели, поэтому с помощью метода биоиндикации можно оценить общий уровень загрязненности водоема и дать комплексную оценку качества воды, для этого определяется видовой состав гидробионтов, их распределение по группам и рассчитывается индекс Майера [3].

Также, экологическое состояние водной экосистемы можно определить по конкретным группам беспозвоночных – гидробионтов, например, моллюскам. Данная группа беспозвоночных животных является перспективным объектом биондикационных исследований. Широкое распространение, удобство сбора, легкость идентификации позволяют использовать моллюсков в биоиндикации загрязнения водных экосистем [4].

Биоиндикация – оценка качества природной среды по состоянию биотических группировок – основана на наблюдениях за составом и численностью организмов-индикаторов. Состояние биоты определяется состоянием окружающей среды, она адекватно реагирует на воздействия любого происхождения, независимо от их характера. Биоиндикация показывает интегральное состояние водного объекта, реакцию биоты на комплексное действие многих составляющих [5]. Чаще всего при биоиндикации используется макрозообентос, т. к. он наиболее доступен учету и наиболее подробно изучен. Кроме того, пресноводного макрозообентоса чаще всего составляют личинки насекомых, которые, по сравнению с другими гидробионтами, отличаются повышенной чувствительностью к токсическим воздействиям и другим изменениям среды. Таким образом, изучение макрозообентоса является актуальным для оценки отдельных водных экосистем с точки зрения влияния на них деятельности человека [5].

Структурные и функциональные характеристики зообентоса являются перспективным элементом системы мониторинга загрязнения поверхностных вод и позволяют определить экологическое состояние и трофический статус водных объектов; оценить качество поверхностных вод как среды обитания организмов; определить совокупный эффект комбинированного действия загрязняющих веществ; локализовать источник загрязнения; установить тип загрязнителей и возникновение вторичного загрязнения вод. По мнению ряда специалистов,

зообентос, как наиболее долгоживущий и стационарный компонент гидробиоценоза, наиболее четко отражает степень загрязнения, особенно хронического [5].

Исходя из вышеизложенного, цель работы – исследование элементного химического состава беспозвоночных организмов реки Неман.

Отбор проб беспозвоночных организмов производился по руслу реки Неман (д. Перелом «Образец № 1», д. Польница «Образец № 2», г. Гродно ул. Подольная «Образец № 3», д. Комотово «Образец № 4», д. Богатыревичи «Образец № 5») в летний сезон (рисунок 1).

Изучение элементного химического беспозвоночных организмов позволяет установить пороговую концентрацию, а превышение ее приводит к необратимым физиологическим процессам в организмах рыб и моллюсков. Методология МН3272–2009 [7] отбор проб и формирование усредненных проб в соответствии со следующими техническими регламентами и правовыми актами [8].

После отбора проб моллюсков их разделяли на части. В качестве исследуемого компонента моллюсков отбирали мышечную ткань. Мышечную ткань моллюсков сушат при температуре 100 °С в лабораторной электропечи до полного удаления воды и жира. Полученный материал измельчают в виде порошка, затем просеивают через сито с размером ячеек 1 мм, затем на лабораторных весах формуют образец массой ~50 мг, а затем образец прессуют в таблетки диаметром 14 мм.

При отборе проб моллюсков было установлено, что на всех контрольных точках присутствует вид пресноводных моллюсков из отряда лёгочных моллюсков – прудовик обыкновенный. Поэтому в качестве исследуемых объектов был выбран данный вид моллюсков. Результаты исследования количественного элементного состава прудовика обыкновенного представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Количественное содержание химических элементов в образцах прудовика обыкновенного, мкг/г

Химический элемент	Образец № 1		Образец № 2		Образец № 3		Образец № 4		Образец № 5	
	Концентрация, мкг/г	Средняя статистическая погрешность, мкг/г	Концентрация, мкг/г	Средняя статистическая погрешность, мкг/г	Концентрация, мкг/г	Средняя статистическая погрешность, мкг/г	Концентрация, мкг/г	Средняя статистическая погрешность, мкг/г	Концентрация, мкг/г	Средняя статистическая погрешность, мкг/г
Ag	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	0,11	0,99	0,19	0,52	0,15
Ba	10,14	2,50	41,89	20,39	102,92	37,17	0,00	0,00	0,00	0,00
Bi	0,06	0,03	0,04	0,02	0,19	0,04	0,05	0,03	0,16	0,07
Br	6,43	0,52	4,93	0,39	4,18	0,42	6,67	0,46	2,59	0,31
Ca	17037,28	200,66	14794,87	161,72	12686,78	175,37	11006,39	141,44	13908,67	168,89
Cd	0,17	0,05	0,59	0,08	0,93	0,12	0,51	0,08	0,43	0,08
Cl	1276,22	148,47	1346,50	131,89	683,68	110,11	1368,17	134,81	952,46	119,47
Co	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,22	0,44	1,09	0,32
Cr	0,67	0,46	0,50	0,34	10,63	1,85	0,00	0,00	0,58	0,40
Cu	15,00	1,54	6,29	0,86	26,46	2,07	13,23	1,27	5,23	0,85
Fe	63,11	2,88	55,17	2,33	300,82	6,37	93,03	3,07	98,54	3,35
Hg	0,51	0,23	0,89	0,27	0,88	0,31	0,92	0,27	0,44	0,20
K	1177,32	61,34	837,56	44,74	864,44	53,23	910,66	47,31	587,15	40,35
Mn	24,79	2,42	25,05	2,11	33,00	2,83	37,94	2,63	28,39	2,42
Mo	0,07	0,06	0,00	0,00	0,37	0,14	0,84	0,18	0,19	0,09
Nb	3,07	0,35	2,77	0,29	3,12	0,36	0,00	0,00	3,06	0,33
Ni	0,23	0,22	0,35	0,23	2,23	0,69	0,56	0,30	0,62	0,34
Pb	3,43	0,63	3,57	0,56	5,10	0,78	3,38	0,55	1,48	0,39
Rb	0,00	0,00	0,00	0,00	2,15	0,26	0,00	0,00	1,71	0,22
S	6260,76	576,89	3619,36	379,41	4523,56	496,52	4018,78	405,27	3835,14	420,68
Sb	0,19	0,06	0,49	0,09	0,61	0,11	0,25	0,06	0,92	0,13
Sn	0,63	0,16	0,91	0,17	1,53	0,25	1,85	0,24	1,46	0,22
Sr	6,07	0,40	4,64	0,30	5,12	0,37	5,32	0,33	2,91	0,26
Ti	0,00	0,00	5,28	1,56	0,41	0,50	1,85	0,94	0,93	0,70
U	0,00	0,00	1,08	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	1,18	0,29
V	0,00	0,00	0,00	0,00	0,82	0,30	1,32	0,33	0,69	0,25
W	0,16	0,06	0,30	0,07	0,20	0,07	0,07	0,03	0,00	0,00
Zn	54,17	2,14	55,72	1,87	70,57	2,47	45,93	1,72	22,10	1,27
Zr	0,25	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41	0,09	0,00	0,00

В контексте оценки экологической безопасности важно учитывать не только концентрацию отдельных элементов, но и их соотношение, а также суммарное содержание токсичных веществ. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение биоаккумуляции тяжелых металлов в различных органах и тканях моллюсков, а также на выявление потенциальных источников загрязнения.

Полученные результаты представляют собой важную информацию для мониторинга качества речной среды. Необходимы дальнейшие исследования для выявления источников загрязнения и разработки мер по их устранению.

Список литературы

1. Хмелевская, И. А. Определение качества воды малых рек города Пскова методом биоиндикации / И. А. Хмелевская, С. Ю. Савичева // Вестн. Псков. гос. ун-та. Сер.: Естественные и физико-математические науки. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 35–55.
2. Шаматульская, Е. В. Определение качества воды в реках Сож и Западная Двина методом биоиндикации / Е. В. Шаматульская, Е. А. Бочко // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017 : сб. ст. по материалам науч.-практ. конф. с междунар. уч., Севастополь, 11–15 сент. 2017 г. / Севастопол. гос. ун-т ; ред.: Ю. А. Омельчук [и др.]. – Севастополь, 2017. – С. 1530–1532.
3. Патракова, Г. Р. Определение качества природных вод методом биоиндикации / Г. Р. Патракова, А. С. Патракова // Формирование и реализация стратегии устойчивого экономического развития Российской Федерации : сб. ст. X Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 28 дек. 2020 г. / Пенз. гос. ун-т. – Пенза, 2020. – С. 163–167.
4. Романова, Е. М. Перспективность использования моллюсков в биоиндикации загрязнения водных объектов / Е. М. Романова, О. А. Индирикова, А. П. Куранова // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. – 2008. – Т. 4, № 20-1. – С. 157–159.
5. Ляшенко, А. В. Биоиндикация качества вод Килийской дельты Дуная по организмам макрофауны водных беспозвоночных / А. В. Ляшенко, Е. Е. Зорина-Сахарова // Гидробиологический журнал. – 2012. – Т. 48, № 4. – С. 45–67.
6. Карцева, В. А. Исследование макрофауны беспозвоночных животных реки и пойменных водоёмов Лихоборки / В. А. Карцева, А. А. Коршунов. – М., 2021.
7. Определение массовой доли химических элементов в пробах животного и растительного происхождения рентгенофлуоресцентным методом на приборе СЕР-01:МВИ.МН3272–2009.10.04.09. – Минск, 2009.
8. Унифицированные правила отбора проб сельскохозяйственной продукции, пищевых продуктов и объектов окружающей среды для определения микроколичеств пестицидов от 21.08.1979. – № 2051–79.

The study of the elemental chemical composition of muscle tissue of invertebrate organisms of the Neman River was conducted by means of using the method of X – ray fluorescence spectral analysis. In the studied samples, both macroelements (Ca, S, Cl, K) and heavy metals (Hg, Pb, Sb) were detected. A tendency for Sr accumulation in the tissues of mollusks was revealed, which may be associated with the peculiarities of its metabolism or the composition of the environment. The obtained results represent important information for monitoring the quality of the river environment. Further studies are needed to identify sources of pollution and develop measures to eliminate them.

Курьян Николай Николаевич, старший преподаватель кафедры современных технологий программирования факультета математики и информатики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, kurian90@mail.ru

Стасюкевич Вадим Валентинович, преподаватель кафедры системной биологии факультета биологии и экологии Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, Stasjkevich_VV@grsu.by.

Трусова Мария Михайловна, старший преподаватель кафедры технологии, физиологии и гигиены питания факультета биологии и экологии Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, Trusova_MM@grsu.by.

Анучин Сергей Николаевич, заведующий лабораторией кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, anuchin_sn@grsu.by.

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

УДК 533.9.082,533.922,533.924,535.243.2

У. К. ЩЕРБА

ЛАЗЕРНАЯ ДЕСТРУКЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ЭЛЕМЕНТАРНОМ АНАЛИЗЕ

В ходе данного исследования с помощью лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии была изучена деструкция поверхности металлов при элементарном анализе 5 образцов металлов. Полученные результаты деструкции разных образцов были сравнены и оценены относительно количества произведенных лазерных импульсов.

Для реализации абляции и снятия спектров был использован ЛАЭМС спектрометр (рисунок 1а) [1], для снятия параметров кратеров на поверхности образцов использовался микроинтерферометр Линника [2] (рисунок 1б).



а)



б)

Рисунок 1 – а) ЛАЭМС спектрометр; б) микроинтерферометр Линника

Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия (LIBS) – это передовой метод для проведения элементарного анализа образцов. В отличие от других методов LIBS отличается простотой, скоростью, а также полным отсутствием пробоподготовки, однако метод имеет и недостатки. Одним из них является частичная деструкция образцов. Деструкция возникает в ходе лазерной абляции поверхности исследуемого образца. Когда лазерный луч достигает образца на его поверхности образуется плазма. Часть плазмы остывает на образце, а часть приобретает достаточную энергию для разрыва связей с образцом и смешиванием с окружающей средой. В результате в месте лазерного удара образуется кратер. Размеры и профиль кратера (рисунок 2) зависит от состава и структуры исследуемого образца. Если говорить об элементарном анализе металлов существенную роль в предсказании масштабов деструкции играет температура плавления.



Рисунок 2 – Профили кратеров, полученные у образцов в ходе лазерной абляции

В качестве образцов мы взяли: алюминий, медь, железо, свинец, олово. Каждый из образцов был подвергнут 200 лазерными импульсами энергией 50 мДж с временной задержкой между двумя лазерными лучами в 10 мкс. В ходе воздействий лазерными импульсами на поверхности каждого из образцов был образован кратер. С помощью микроинтерферометра Линника мы измерили параметры кратеров такие как глубина кратера, диаметры на дне и на поверхности. Используя эти измерения, был рассчитан объем удаляемого слоя вещества при одном и двухстах импульсах. Результаты измерений представлены в таблице 1. На рисунке 3 представлены изображения кратеров полученный с помощью веб-камеры ЛАЭМС спектрометра фокус которой совпадает с фокусом лазерных лучей.

Таблица 1

Время задержки	10 μ s				
Образцы	Al	Cu	Fe	Pb	Sn
Диаметр кратера на поверхности, мм	0.38	0.27	0.36	0.35	0.67
Диаметр кратера на дне, мм	0.24	0.04	0.01	0.12	0.17
Площадь кратера на поверхности, мм ²	0.12	0.06	0.10	0.09	0.36
Глубина кратера, мм	0.19	0.32	0.24	0.14	0.31
Глубина слоя, удаленного при одном импульсе, мкм	0.94	1.59	1.21	0.72	1.50
Объем удаленного мм ³ · 10 ³	4.54	6.30	8.47	4.75	35.78
Масса удаленного материала, мкг	12.26	56.41	66.74	53.92	261.59
Масса, удаляемая при одном импульсе, мкг	0.06	0.28	0.33	0.27	1.31

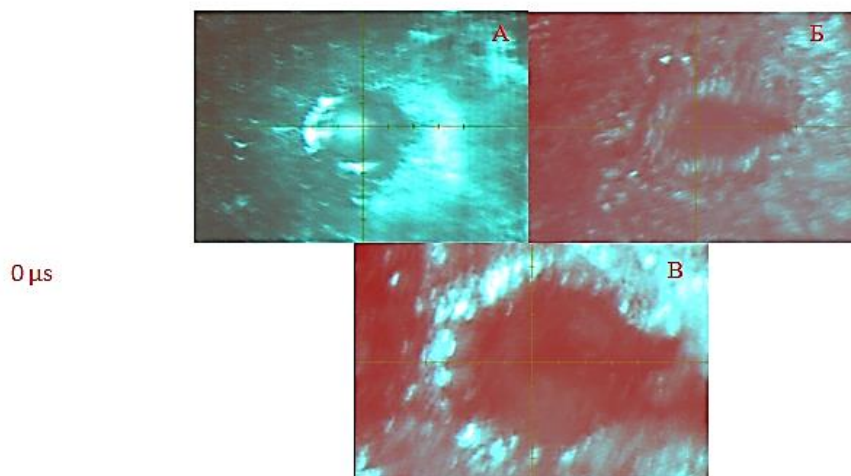


Рисунок 3 – Изображение кратеров: а) меди, б) свинца, в) олова полученные с помощью веб-камеры ЛАЭМС спектрометра

Из таблицы 1 видно, что наибольший объем образовавшегося кратера у олова, наименьший – у алюминия. Температура плавления олова – 304,91 К, алюминия – 930,3 К. У веществ с низкой температурой плавления, при подаче одинакового по энергии лазерного импульса, количество атомов, возбуждаемых за один лазерный импульс больше, соответственно вероятность абляции выше, чем у веществ с более высокой температурой плавления.

По данным таблицы 1 образцы из олова при элементарном анализе будут повреждены существенно больше образцов из других исследуемых металлов. Отличаются и профили кратеров данных образцов: у меди площадь кратера на дне малая, а площадь дна кратера олова практически сравнимая с его площадью на поверхности.

Список литературы

1. Воропай, Е. С. ЛАЭМС / Е. С. Воропай, И. М. Гулис, К. Ф. Ермалицкая. – Минск : Изд-во Бел. гос. ун-та, 2021.
2. Описание микроинтерферометра Линника [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lomo.ru/production/grazhdanskogo-naznacheniya/mikroskopy/mikroskopy-tehnicheskie/mii-4m>.
3. Miziolek, A. W. Laser – induced breakdown spectroscopy / A. W. Miziolek, V. Palleschi, I. Schechter. – New York : Cambridge University Press, 2008. – P. 5–7.

In the course of this work, the destruction of the metal surface was studied using laser – induced breakdown spectroscopy in the elementary analysis of 5 metal samples. The results obtained from the destruction of different samples were compared and evaluated relative to the number of laser pulses produced.

Щерба Ульяна Константиновна, студент 4 курса физического факультета Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, ulshch04@gmail.com.

Научный руководитель – *Ермалицкая Ксения Фёдоровна*, кандидат физико-математических наук, доцент, физический факультет Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, ermalitskaia@gmail.com.

УДК 533.9.082,533.922,533.924,535.243.2

А. В. МАРКОВСКАЯ

СПЕКТРАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ АБЛЯЦИОННОЙ ПЛАЗМЫ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Высокая температура абляционной плазмы может оказывать влияние на интенсивность линий в спектре поглощения и, как следствие, на количественный анализ вещества. Поэтому важно подбирать правильные параметры лазерного излучения для получения более точного количественного анализа.

В результате эксперимента были получены относительные интенсивности линий меди на длинах волн $\lambda_1 = 510,592 \text{ нм}$ и $\lambda_2 = 521,858 \text{ нм}$ в спектрах чистой меди, латуни и бронзы при различных временах Δt между сдвоенными лазерными импульсами (рисунок 1, рисунок 2). По интенсивностям линий меди в спек-

трах по формуле (1) была рассчитана температура абляционной плазмы меди в зависимости от времени Δt между сдвоенными лазерными импульсами (рисунок 3). Для расчёта температуры абляционной плазмы использовался метод Орнштейна [1]:

$$T = \frac{0.625 (E_1 - E_2)}{\ln \frac{g_1 A_1}{g_2 A_2} - \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} - \ln \frac{I_1}{I_2}} \quad (1)$$

где T – температура абляционной плазмы, E_1 и E_2 – энергии возбуждённого состояния спектральных линий, g_1 и g_2 – статистические веса возбуждённого состояния, A_1 и A_2 – вероятности переходов, λ_1 и λ_2 – длины волн, I_1 и I_2 – относительная интенсивность атомных эмиссионных линий.

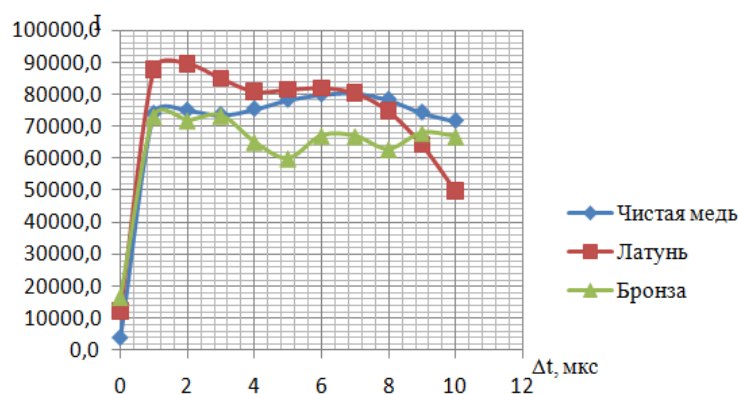


Рисунок 1 – График зависимости интенсивностей линий меди на длине волны 510,592 нм в спектрах чистой меди, латуни и бронзы от различных времён Δt между сдвоенными лазерными импульсами

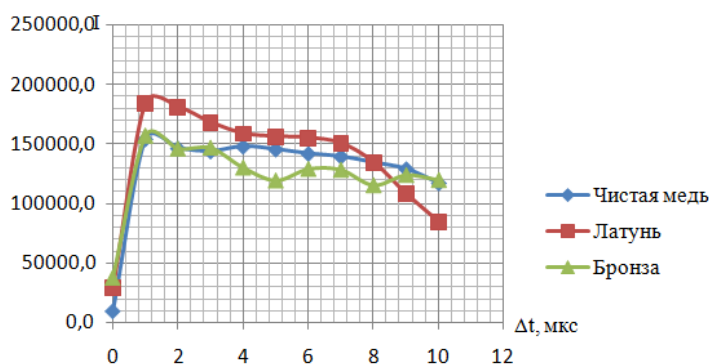


Рисунок 2 – График зависимости интенсивностей линий меди на длине волны 521,858 нм в спектрах чистой меди, латуни и бронзы от различных времён Δt между сдвоенными лазерными импульсами

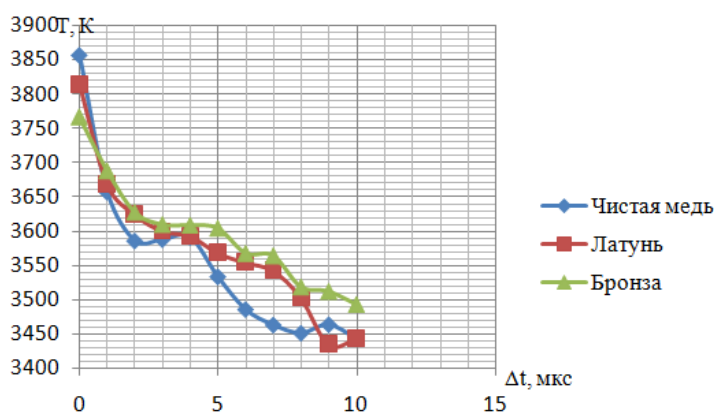


Рисунок 3. Зависимость температуры T_1, T_2, T_3 плазмы меди для чистой меди, латуни и бронзы от различных времён Δt между сдвоенными лазерными импульсами

Список литературы

1. Miziolek, A. W. Laser – Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS): Fundamentals and Applications / A. W. Miziolek, V. Palleschi, I. Schechter. – Cambridge : Cambridge University Press, 2006. – P. 129–132.

The results of the experiment showed that with an increase in the time Δt between double laser pulses, the temperature of the ablation plasma decreases, both in pure copper and in copper – containing alloys, and the intensity of copper lines in all spectra increases.

Марковская Анна Вячеславовна, студент 4 курса физического факультета (кафедра лазерной физики и спектроскопии) Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, markovskaaanna2@gmail.com.

Научный руководитель – Ермалицкая Ксения Фёдоровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, ermalitskaia@gmail.com.

УДК 539.2/669(2-8)

С. О. МАКАРЕНКО

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, МИКРОСТРУКТУРА, ТЕКСТУРА, СТАБИЛЬНОСТЬ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭВТЕКТИЧЕСКИХ СПЛАВОВ Sn–Zn, ЛЕГИРОВАННЫХ Al И Sb

Приведены результаты исследований фазового состава, микроструктуры, текстуры, стабильности и механических свойств эвтектических сплавов на основе эвтектики Sn–Zn, легированной Al и Sb. Рассмотрено влияние сверхвысоких скоростей охлаждения (до 10^6 K/c) на формирование структуры, распределение фаз, стабильности и механических свойств тройных сплавов на основе эвтектики Sn–Zn, легированной сурьмой и алюминием.

Объектом исследования выступают бессвинцовые сплавы – 8,8 мас. %, (-)_{эвт} – мас. % (= 0,25; 0,5; 1; 2; 4) и (-)_{эвт} – мас. % (= 2; 3; 4). Чистота изготовленных сплавов составила около 99,99 %. Процесс сплавления происходил в ампуле из кварца, с дальнейшим охлаждением со скоростью 10^2 K/c. Затем для изготовления фольг из полученных слитков были вырезаны кусочки массой $\approx 0,2$ г. Для получения фольг использовалась установка, в основе работы которой лежит принцип центробежного охлаждения расплава со скоростью $5 \cdot 10^5$ K/c [1]. В процессе быстрого вращения отполированного медного цилиндра диаметром 20 см происходил выброс капли массой до $\approx 0,2$ г. В результате затвердевания была получена лента с толщиной до 100 мкм и с шириной до 1 см. Для проведения каждого исследования вырезался образец нужной конфигурации. Микроструктура быстрозатвердевших фольг и распределение компонентов было проведено при помощи растрового электронного микроскопа 1455, располагающего приставками для осуществления рентгеноспектрального микроанализа и фазового анализа НКЛ. Для исследования рельефа быстрозатвердевших фольг был использован рентгеновский дифрактометр. При определении параметров микроструктуры был использован метод случайных секущих, относительная погрешность определения не превышала 10 %. Исходя из баз данных (порошковая база данных 2 или 4) были определены индексы дифракционных отражений, исследуемых образцов фольг. Для изучения рельефа быстрозатвердевших фольг был использован метод обработки обратных полюсных фигур дифракционных линий [2]. При исследовании рельефа использовались следующие дифракционные линии 201, 101, 220, 211, 301, 112, 400, 321, 420, 411, 312, 501, 0002, 100, 101, 102, 103, 110, 112, 201. Используя метод Харриса, были рассчитаны полюсные плотности дифракционных линий. Выдержка фольг проходила при комнатной температуре 20 °C. Отжиг фольги осуществлялся в сушильном шкафу на протяжении 20 минут при каждой температуре. При использовании прибора PMT – 3 происходило исследование микротвёрдости при нагрузке 20 г и временем индентирования не менее 60 с, на случайных местах фольги ставилось не менее 10 отпечатков. При этом относительная погрешность измерения составляла не более 4 %. Исследование предела прочности при растяжении быстрозатвердевших сплавов со скоростью растяжения 1 мм/мин осуществлялось при помощи универсальной разрывной машины 350 – 10. Результаты рентгенограмм быстрозатвердевших фольг сплавов – 8,8 мас. %, (-)_{эвт} – мас. % (= 0,25 – 4) и (-)_{эвт} – мас. % (= 2 – 4) представлены на рисунке 1. В эвтектическом сплаве быстрозатвердевшей фольги мы наблюдаем лишь дифракционные отражения цинка и олова, таким образом можно сказать, что быстрозатвердевший сплав состоит из твёрдых растворов олова и цинка и является двухфазным [3]. В результате легирования эвтектического сплава сурьмой и алюминием происходит ослабление дифракционных линий. Также были обнаружены дополнительные рефлексы в сплаве (-)_{эвт} – 4 мас. %, не принадлежащие твёрдому раствору, что соответствует фазе, обладающей орторомбической кристаллической решёткой. Количество фаз антимонида растёт вместе с ростом концентрации сурьмы в эвтектическом сплаве. Следовательно, можно заключить, что интерметаллическому соединению цинка с сурьмой соответствуют малоинтенсивные дифракционные пики [4]. По мере увеличения концентрации сурьмы в сплаве количество наблюдаемых нами рефлексов возрастает. Таким образом более высокая концентрация сурьмы (от 8 мас. %) способствует образованию соединений. Параметры ячеек: $a = 7,98$, $b = 7,49$, $c = 10,72$. Занимаясь исследованием параметров элементарных

ячеек и твердого раствора эвтектических сплавов – 8,8 мас. %, легированных алюминием и сурьмой, можно заключить о неодинаковом влиянии легирующих элементов, что зависит от соотношений атомных размеров олова, цинка, и растворенных в эвтектической системе и. Параметр (Å) элементарной ячейки увеличивается вместе с повышением концентрации алюминия в сплаве – 8,8 мас. %, при этом параметр вначале возрастает, а затем падает. Следовательно, можно заключить, что легирование эвтектического сплава – 8,8 мас. % алюминия до 1 мас. % приводит к увеличению значения, что говорит об образовании пересыщенного твёрдого раствора замещения на основе цинка [5].

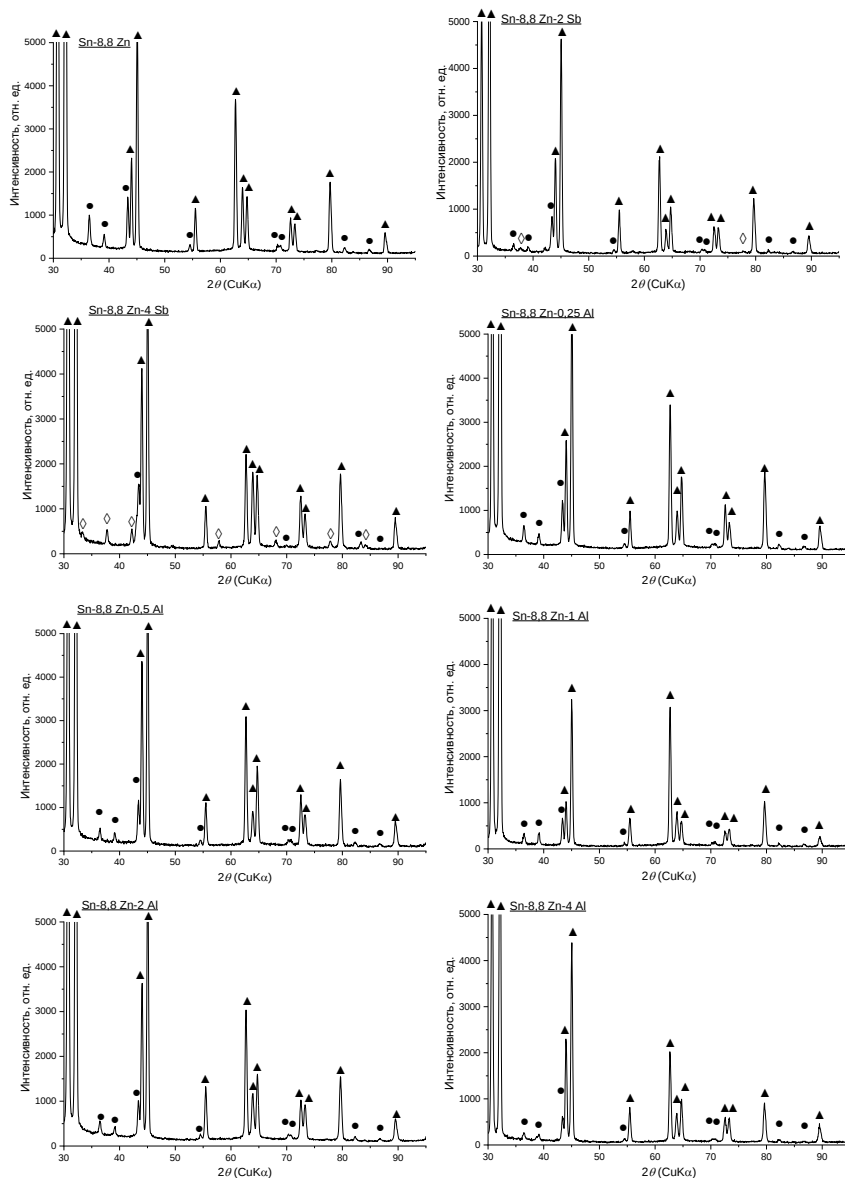


Рисунок 1 – Рентгенограммы быстрозатвердевших фольг сплавов Sn – 8,8 мас. % Zn, (Sn–Zn)_{эвт} – x мас. % Sb (x = 2–4)

В результате рентгеноспектрального микроанализа (рисунок 2) быстрозатвердевшей фольги сплава (Sn – Zn)_{эвт} – 2 мас. % Sb можно заключить, что участки, обогащённые цинком, являются тёмными, а эвтектическая смесь олова и цинка – серая область, и третий компонент однородно распределён в серой матрице эвтектики. Также необходимо отметить, что в тёмных участках, где зафиксировано большое содержание цинка, возле данной линии пониженная концентрация распределения сурьмы.

2Sb	Тип линии	Вес. %	Сигма вес. %	Атом. %
Zn	K	8,19	0,28	13,94
Sn	L	90,49	0,49	84,85
Sb	L	1,32	0,45	1,21
Сумма		100		100

Спектр 1	Тип линии	Вес. %	Сигма вес. %	Атом. %
Al	K серия	2,54	0,14	9,6
Zn	K серия	9,44	0,37	14,74
Sn	Lсерия	88,02	0,39	75,66
Сумма		100		100

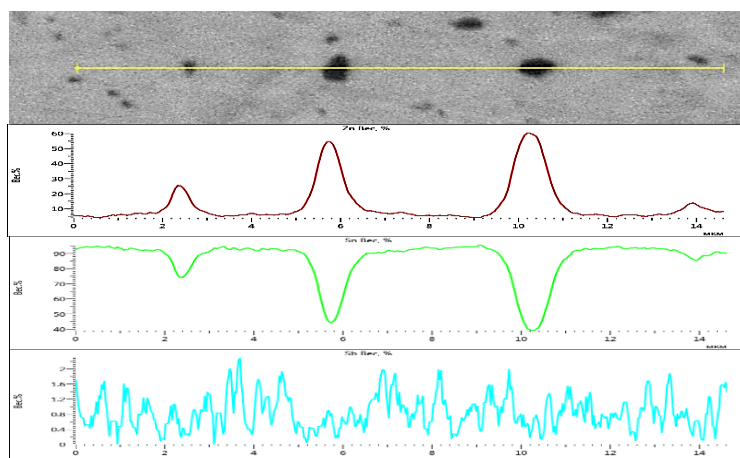


Рисунок 2 – Распределение компонентов в фольге быстротвердевшего сплава (Sn – Zn)_{эвт} – 2 мас. % Sb

В результате исследования можно сказать, что эвтектический сплав Sn – 8,8 мас. % Zn демонстрирует значительную чувствительность к скорости охлаждения, что влияет на его микроструктуру и механические свойства. Повышение скорости затвердевания приводит к уменьшению расстояния между дендритами и более однородному распределению эвтектической смеси, что в свою очередь улучшает механические характеристики сплава. Низкие скорости охлаждения формируют иглообразную фазу Zn которая ослабляет механические свойства за счет скольжения дислокаций.

Легирование сурьмой и алюминием сплава Sn – 8,8 мас. % Zn изменяет микроструктуру и механические характеристики сплава. Увеличение содержания сурьмы приводит к образованию интерметаллического соединения Zn_4Sb_3 и снижению количества цинка в сплаве, что сказывается на механических свойствах.

Исследование рентгеноструктурного анализа показало, что легирование алюминием и сурьмой влияет на параметры элементарных ячеек, увеличивая их с повышением концентрации легирующих элементов. Однако при определенных концентрациях происходит уменьшение параметров ячеек.

Микротвёрдость сплава зависит от концентрации легирующих элементов, причем легирование сурьмой до 2 мас. % значительно увеличивает Микротвёрдость, в то время как дальнейшее увеличение концентрации приводит к менее выраженному эффекту. Легирование алюминием также повышает микротвёрдость, но насыщение эффекта наблюдается с увеличением концентрации до 1 мас. %.

Влияние термической обработки на свойства сплавов также имеет значение, так как отжиг при температуре выше 60 °C вызывает снижение микротвёрдости, что связано с распадом пересыщенного твёрдого раствора.

Таким образом, для достижения оптимальных механических свойств эвтектического сплава Sn – 8,8 мас. % Zn необходимо учитывать скорость охлаждения, содержание легирующих элементов и их влияние на микроструктуру. Эти данные могут быть полезны для разработки новых сплавов, не содержащих вредный компонент (свинец) с улучшенными характеристиками для различных применений.

Список литературы

1. Interfacial Properties of Zn – Sn Alloys as High Temperature Lead-Free Solder on Cu Substrate / J.-E. Lee [et al.] // Materials Transactions. – 2005. – Vol. 46, No. 11. – P. 2413–2418.
2. Шепелевич, В. Г. Быстротвердевшие легкоплавкие сплавы / В. Г. Шепелевич. – Минск : БГУ, 2015. – 192 с.
3. Лозенко В. В. Зёрненная и субзёрненная структура быстротвердевших фольг цинка и его бинарных сплавов с Cd, Sn и Sb / В. В. Лозенко, В. Г. Шепелевич // Неорганические материалы. – 2007. – Т. 43, № 1. – С. 22–26.
4. Шепелевич, В. Г. Структура и свойства быстротвердевших фольг системы Sn–Zn / В. Г. Шепелевич, О. В. Гусакова // Неорган. материалы. – 2008. – Т. 44, № 5. – С. 560–564.
5. Шепелевич, В. Г. Структура быстротвердевшей фольги эвтектического сплава Sn – 8,8 мас. % Zn / В. Г. Шепелевич, Д. А. Зерница // Журнал Белорусского государственного университета. Физика, 1. – С. 67–72.

The article presents the results of studies on the phase composition, microstructure, texture, stability, and mechanical properties of eutectic alloys alloyed with aluminum and antimony. It also examines the effect of ultra-high cooling rates (up to 10^6 K/s) on

the structure, phase distribution, stability, and mechanical properties of ternary alloys based on the $Sn - Zn$ eutectic system doped with antimony and aluminum.

Макаренко Сергей Олегович, Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина, г. Мозырь, Республика Беларусь, msergej425@gmail.com.

Зерница Денис Александрович, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры инженерно-педагогического образования Мозырского государственного педагогического университета имени И. П. Шамякина, г. Мозырь, Республика Беларусь, dzernitsa@mail.ru

УДК 631.559.2

В. Р. ЗАКРЕВСКИЙ

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА, ИНТЕНСИВНОСТИ И РЕЖИМОВ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА РОСТ И БИОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МИКРОЗЕЛЕНИ

Представлены результаты исследований влияния светодиодного (LED) освещения на рост и биохимический состав микрозелени овощных культур. Обзор основан на трех белорусских работах, изучающих спектральный состав, интенсивность и фотопериод для капусты, редиса и гороха, дополненных данными международных исследований по брокколи и базилику. Установлено, что увеличение доли красного света (до 58 % или $R/B = 6,0-9,5$) повышает урожайность капусты (+20 %), редиса (+22,5 %) и гороха, снижая энергозатраты (до 29,3 %). Оптимальный фотопериод (16 ч) при интенсивности 100 мкмоль/м²·с обеспечивает максимальный свежий вес (до 3,74 кг/м²). Низкая интенсивность (50 мкмоль/м²·с) обогащает капусту хлорофиллами (+16,3 %) и β -каротином (+58,5 %), а высокая (250 мкмоль/м²·с) усиливает синтез сахаров (+17,0 %). Международные данные подтверждают видоспецифичность: красный свет улучшает рост брокколи, а интенсивность 200 мкмоль/м²·с оптимальна для базилика. Выявленные параметры освещения предлагаются для повышения питательной ценности и эффективности выращивания микрозелени в закрытом грунте.

Микрозелень – молодые ростки овощных культур – привлекает внимание как источник питательных веществ и функциональный продукт питания [1; 2]. Использование светодиодного (LED) освещения в условиях закрытого грунта позволяет контролировать рост, урожайность и биохимический состав микрозелени [3; 5]. Настоящий обзор объединяет результаты трех белорусских исследований и дополняет их данными из международных работ. Первое исследование [3] оптимизирует спектр и фотопериод для выращивания микрозелени капусты и редиса, второе [1] изучает спектральный состав для капусты и гороха, третье [4] – интенсивность света для капусты. Обзор раскрывает влияние световых параметров на микрозелень и их практическую значимость.

Первое исследование [3] проводилось в закрытой камере без естественного света (20–23 °С, влажность 60–70 %) с микрозеленью капусты (Мицуна) и редиса (Октава). Использовались светодиоды с соотношением синего (B), красного (R) и дальнего красного (FR) света (B: R: FR от 29: 58: 13 до 70: 17: 13), интенсивностью 100–200 мкмоль/м²·с и фотопериодом 8–16 ч при DLI 5,76 mol·m⁻²·d⁻¹. Урожайность и энергозатраты оценивались за 7 дней.

Второе исследование [1] проводилось в производственных условиях с микрозеленью капусты (Аватар) и гороха (Паклуна) под светодиодами РНПУП «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси» (380–780 нм, R/B от 1,3 до 10,5). Режимы: 50 мкмоль/м²·с, 16 ч/сут (капуста); 100 мкмоль/м²·с, 14 ч/сут (горох); контроль – $R/B = 4,0$. Анализировались рост и питательные вещества.

Третье исследование [4] изучало микрозелень капусты (Агапар F1) под светодиодами FLORALED 300/2/4 с интенсивностью 50–250 мкмоль/м²·с (контроль – 200 мкмоль/м²·с). Оценивались хлорофиллы, каротиноиды, β -каротин, кислоты, сахара и пектины.

Похожие исследования включали работы по брокколи [9] и базилику [11], где варьировались спектр и интенсивность света для оценки роста и содержания питательных веществ.

Влияние спектрального состава и фотопериода [3].

Увеличение доли красного света (R от 17 % до 58 %) повысило свежий вес капусты (+ 20 %) и редиса (+ 22,5 %), сухой вес (+ 36 % и + 33 %), снизило энергозатраты (на 28,8 % и 29,3 %) и финансовые расходы (на 15,8 % и 18,2 %) [3]. Длинный фотопериод (16 ч, 100 мкмоль/м²·с) дал максимальный свежий вес (2,26 кг/м² для капусты, 3,74 кг/м² для редиса) и снизил энергозатраты (на 13,4 % и 20 %) по сравнению с коротким (8 ч, 200 мкмоль/м²·с) при том же DLI [3].

Влияние спектрального состава [1].

Для капусты оптимальным оказался контрольный спектр ($R/B = 4,0$), обеспечивающий стабильный рост. У гороха увеличение красного света ($R/B = 6,0$ и 9,5) повысило массу и питательную ценность, что указывает на видоспецифичность реакции [1].

Влияние интенсивности освещения [4].

При 50 мкмоль/м²·с у капусты увеличилось количество хлорофиллов (+16,3 %), каротиноидов (+23,8 %), β – каротина (+58,5 %) и аскорбиновой кислоты (+9,8 %), но снизился сахар (–30,5 %) и пектины (–33,2 %) [4]. При 250 мкмоль/м²·с увеличились сахара (+17,0 %) и кислоты (+20,1 %). Вариант 50 мкмоль/м²·с превзошел контроль в 1,4 раза по питательной ценности [4].

Таблица 1 обобщает ключевые параметры и результаты трех исследований.

Таблица 1 – Влияние световых параметров на микрозелень в отечественных исследованиях

Культура	Спектр (R/B или B: R: FR)	Интенсивность (мкмоль/м ² ·с)	Фотопериод (ч)	Основные результаты
Капуста (Мицуна)	B: R: FR = 29: 58: 13	100	16	Свежий вес +20 %, энергозатраты – 28,8 % [3]
Редис (Октава)	B: R: FR = 29: 58: 13	100	16	Свежий вес +22,5 %, энергозатраты – 29,3 % [3]
Капуста (Аватар)	R/B = 4,0 (контроль)	50	16	Стабильный рост и питательная ценность [1]
Горох (Паклуна)	R/B = 6,0–9,5	100	14	Увеличение массы и питательной ценности [1]
Капуста (Агапар)	Не варьировался	50	Не указано	Хлорофиллы +16,3 %, β-каротин +58,5 %, сахара –30,5 % [4]
Капуста (Агапар)	Не варьировался	250	Не указано	Сахара +17,0 %, кислоты +20,1 % [4]

В исследовании брокколи [9] красный свет (620–630 нм) с добавлением синего (450–470 нм) увеличил содержание хлорофиллов на 15 % и каротиноидов на 20 % по сравнению с белым светом при интенсивности 100 мкмоль/м²·с. Для базилика [11] интенсивность 200 мкмоль/м²·с с соотношением R:B = 3:1 повысила свежий вес на 25 % и содержание витамина С на 30 %, но высокая интенсивность (300 мкмоль/м²·с) вызвала стресс и снижение роста [11].

Таблица 2 ниже суммирует данные из этих исследований.

Таблица 2 – Влияние световых параметров на микрозелень в международных исследованиях

Культура	Спектр (R: B)	Интенсивность (мкмоль/м ² ·с)	Фотопериод (ч)	Основные результаты
Брокколи	R: B = 3: 1	100	Не указано	Хлорофиллы +15 %, каротиноиды +20 % [9]
Базилик	R: B = 3: 1	200	Не указано	Свежий вес +25 %, витамин С +30 % [11]
Базилик	R: B = 3: 1	300	Не указано	Снижение роста из-за стресса [11]

Результаты подтверждают влияние LED-освещения на рост и метаболизм микрозелени [5; 6] Красный свет стимулирует урожайность у редиса, гороха и брокколи, но для капусты важен баланс R/B [1; 3; 9]. Низкая интенсивность (50–100 мкмоль/м²·с) и длинный фотопериод (16 ч) обогащают капусту и базилик пигментами и витаминами, тогда как высокая интенсивность (200–250 мкмоль/м²·с) усиливает синтез сахаров [3; 4; 11].

Оптимальные параметры: для капусты – B:R:FR = 29: 58: 13, 100 мкмоль/м²·с, 16 ч [3] или R/B = 4,0–50 мкмоль/м²·с [1; 4]; для гороха – R/B = 6,0–9,5 [1]; для редиса – как для капусты [3]. Эти режимы повышают урожайность и питательную ценность, применимы в производстве микрозелени [2].

Необходимы исследования влияния световых параметров на другие культуры и механизмы стрессового ответа.

Список литературы

1. Влияние спектрального состава светодиодного освещения на Р-витаминный комплекс микрозелени капусты белокочанной и гороха овощного / А. М. Пашкевич [и др.]. – 2023. – С. 1–6.
2. Swain, T. The quantitative determination of anthocyanins / T. Swain, W. E. Hillis // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. – 1959. – Vol. 10. – P. 63–68.
3. Обоснование параметров и режимов работы системы освещения при выращивании микрозелени без естественного света / И. Ю. Олонин [и др.]. // *Вестн. НГИЭИ*. – 2024. – № 1 (152). – С. 91–102.
4. LED lighting intensity effect on biochemical composition of microgreens of white cabbage / A. M. Pashkevich [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarianseries*. – 2023. – Vol. 61, № 3. – P. 199–209. – DOI: 10.29235/1817–7204–2023–61–3–199–209.
5. Оптимизация светодиодной системы освещения витаминной космической оранжереи / И. О. Коновалова [и др.] // *Авиакосм. и экол. медицина*. – 2016. – Т. 50, № 3. – С. 17–22.
6. Eberl, A. W. Sprouts, microgreens, and edible flowers: the potential for high value specialty produce in Asia / A. W. Eberl // *High value vegetables in Southeast Asia: production, supply and demand : proc. SEAVEG 2012, Chiang Mai, Thailand, 24–26 Jan. 2012 / ed. R. Holmer [et al.]. – Shanhu, 2012. – P. 216–227.*
7. Влияние светодиодного освещения на рост и развитие микрозелени различных культур / А. М. Пашкевич [и др.] // *Вестн. Бел. гос. сельскохоз. акад.* – 2021. – № 3. – С. 88–94.
8. A review on the effects of light – emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens / X. Zhang [et al.] // *Trends Food Sci. Technol.* – 2020. – Vol. 99. – P. 203–216. – DOI: 10.1016/j.tifs.2020.02.031.
9. Light intensity and light quality from sole – source light – emitting diodes impact phytochemical concentrations within brassica microgreens / J. K. Craver [et al.] // *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* – 2017. – Vol. 142, № 1. – P. 3–12. – DOI: 10.21273/JASHS03830–16.
10. Changes in mineral element content of microgreens cultivated under different lighting conditions in a greenhouse / A. Brazaitytė [et al.] // *Acta Hortic.* – 2018. – № 1227. – P. 507–516. – DOI: 10.17660/ActaHortic.2018.1227.64.
11. Responses of sweet basil to different daily light integrals in photosynthesis, morphology, yield, and nutritional quality / H. Dou [et al.] // *HortScience*. – 2018. – Vol. 53, № 4. – P. 496–503. – DOI: 10.21273/HORTSCI1278517.

This review examines the impact of LED lighting parameters-spectral composition, intensity, and photoperiod-on the growth and biochemical composition of microgreens. It integrates findings from three Belarusian studies on cabbage, radish, and pea microgreens with international research on broccoli and basil. Increasing the red light proportion (up to 58 % or R/B = 6,0–9,5) enhanced fresh weight of cabbage (+20 %), radish (+22,5 %), and pea, while reducing energy consumption (up to 29.3 %). A 16-hour photoperiod at $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ maximized fresh yield (up to $3,74 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$). Low intensity ($50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) boosted cabbage chlorophylls (+16,3 %) and β -carotene (+58,5 %), whereas high intensity ($250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) increased sugars (+17.0 %). International studies confirm species-specific responses: red light benefits broccoli, while $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ optimizes basil growth. The identified lighting regimes enhance nutritional value and efficiency, offering practical applications for controlled-environment microgreen production.

Закревский Валерий Русланович, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, zakrevskij_vr_24@student.grsu.by.

Научный руководитель – *Василевич Александр Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, РУП «УНПЦ «Технолаб», г. Гродно, Республика Беларусь, vasil@grsu.by.

УДК 535.421

А. А. КОВЕЦКАЯ, И. Г. ДАДЕНКОВ, А. Л. ТОЛСТИК

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ТОНКИХ ПЛЁНОК SiO_2 МЕТОДОМ ПРОСТРАНСТВЕННО-МОДУЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

В ходе работы была проведена запись динамических тепловых решеток различных периодов в тонких пленках оксида кремния SiO_2 лазерными импульсами наносекундной длительности. Были определены кинетики релаксации тепловых решеток и определены температуропроводности тонких пленок SiO_2 в зависимости от толщины пленки.

Тонкие пленки вызывают широкий интерес из-за различные применения, таких как оптоэлектронные устройства, фотоэлектрические элементы, термоэлектрическое преобразование энергии и т. д. Эффективность при разработке устройств в данных направлениях в значительной степени зависит от теплового управления и, как следствие, важно разработать методы для точного и удобного измерения тепло- и температуропроводности этих пленок. Из-за особенностей структуры, разработка методик изучения тонкопленочных материалов представляет определенные трудности: некоторые пленки могут быть нестабильными или подвержены деградации при воздействии окружающей среды, высоких температур или других факторов.

В рамках изучения характеристик пленок оксида кремния SiO_2 различной толщины был использован метод пространственно-модуляционной спектроскопии, основанный на записи в образцах динамических решёток с последующим наблюдением кинетики релаксации этой решетки [1; 2]. Хотя этот метод обладает широким

спектром применения для определения различных характеристик материалов, включая термофизические свойства на микро- и наноуровне, в данной работе он был применен для измерения температуропроводности.

Метод основан на создании и измерении периодических тепловых возмущений в материале и последующем измерении их изменений [3]. Лазерный импульс создает модуляцию температуры с помощью двух пучков накачки. Благодаря интерференции двух когерентных пучков от лазерного импульса в образце создается пространственно-периодический источник тепла (тепловая динамическая решетка), которая может быть представлена в виде пространственной модуляции температуры, плотности, диэлектрической проницаемости и т. д. При слабом поглощении формируется объемная решетка. При сильном поверхностном поглощении и формировании поверхностной решетки, распад решетки происходит через горизонтальную диффузию. Проследить за данным распадом возможно при помощи непрерывного зондирующего излучения, дифрагирующего на сформированной решетке.

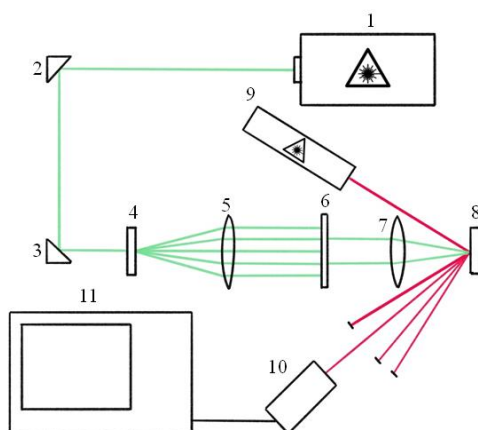


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки, где 1 – импульсный Nd: YAG-лазер с генератором второй гармоники $\lambda = 532$ нм, 2 и 3 – направляющие призмы полного внутреннего отражения, 4 – пропускающая дифракционная решётка с известным периодом, 5 и 7 – собирающие линзы с фокусными расстояниями 45 см и 22 см соответственно, 6 – диафрагма, пропускающая только первые порядки дифракции, 8 – исследуемый образец, 9 – непрерывный гелий-неоновый лазер, 10 – фотоэлектронный умножитель, 11 – цифровой осциллограф

Для проведения исследований по записи динамических решеток на тонкопленочном материале использовалась оптическая схема, представленная на рисунке 1. Импульсный Nd:YAG-лазер проходит через дифракционную решетку с известным периодом, расположенную в фокусе телескопической системы из двух линз с кратными фокусными расстояниями. Внутри телескопической системы расположена диафрагма, производящая селекцию порядков дифракции таким образом, чтобы оставались только ± 1 порядки. Таким образом, на образце направлялись два лазерных импульса одинаковой интенсивности, формирующие интерференционную картину высоких контрастов с периодом, кратным периоду используемой ранее дифракционной решетке. Гелий – неоновый лазер зондирует сформированную тепловую решетку и дифрагированное излучение регистрируется при помощи ФЭУ для анализа кинетики релаксации.

В случае сильного поверхностного поглощения возбуждающего излучения и формирования поверхностной динамической решетки в зависимости от направления температурного градиента происходит распад динамической решетки процесса исключительно через горизонтальную диффузию тепла, подчиняющуюся закону дополнительной функции ошибок *Erfc* [4]. В таком случае интенсивность сигнала дифракции будет описываться функцией вида:

$$I(t) = I_0 \text{Erfc}(-t/\tau).$$

Горизонтальная температуропроводность χ_x определяется связана временем релаксации решетки τ и ее пространственным периодом Λ согласно уравнению [5]:

$$\chi_x = \frac{\Lambda^2}{4\pi^2\tau}.$$

На рисунке 2 изображена осциллограмма с кинетикой затухания динамической решетки на кремнии с оксидной пленкой толщиной в 0,3 с различными периодами решетки на дифракционном светоделителе. На возрастающем участке можно наблюдать появление первого порядка дифракции у зондирующего лазера. Затуха-

ние описывает процесс релаксации тепловой периодической структуры на образце. Изучая последний участок, мы сможем получить интересующую нас характеристику температуропроводности.

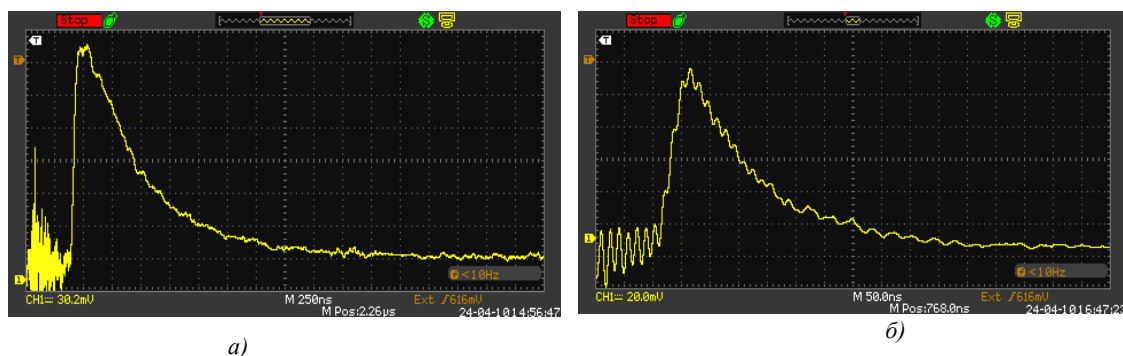


Рисунок 2 – Осциллограмма кинетики затухания динамической решётки на кремнии с оксидной плёнкой толщиной в 0,1 мкм с периодом решетки на дифракционном светоделителе а) 200 мкм, б) 50 мкм

На основе зафиксированных кинетик определены времена жизни тепловых решеточки температуропроводность образцов. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения температуропроводности χ_x тонких плёнок диоксида кремния с различными толщинами оксидных плёнок

Толщина пленки SiO ₂ , мкм	χ_x , см ² /с
0,0	0,759
0,1	0,692
0,22	0,538
0,3	0,350

Таким образом, с использованием метода динамических решеток замечено, как с ростом толщины оксидной пленки температуропроводность образцов уменьшалась. Это связано с тем, что температуропроводность оксида кремния существенно меньше, чем монокристаллического кремния, а плавный спад связан с участием подложки в процессах теплопереноса. При толщине пленки 0,3 мкм температуропроводность образца стала практически равна температуропроводности оксида кремния, что сигнализирует о том, что в процессе теплопереноса в этом образце не участвовала подложка.

Список литературы

1. Tolstik, A. L. Light beam transformation and material diagnostics by dynamic holography methods / A. L. Tolstik, E. V. Ivakin, I. G. Dadenkov // Journal of Applied Spectroscopy. – 2023. – Т. 90, № 2. – С. 407–413.
2. Tolstik, A. L. Dynamic gratings for contactless material diagnostics / A. L. Tolstik, E. V. Ivakin, I. G. Dadenkov // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2023. – Т. 26, № 3. – С. 273–283.
3. 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.
4. Optical studies of heat transfer in PbTe: Bi((Sb) thin films / E. V. Ivakin [et al.] // Semiconductor. – 2018. – Vol. 52, No 13. – P. 1691–1695.
5. 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.

In the course of the work, dynamic thermal gratings of different periods were recorded in thin films of silicon oxide SiO₂ using nanosecond laser pulses. The relaxation kinetics of thermal gratings were determined and the thermal diffusivities of thin SiO₂ films were determined depending on the film thickness.

Ковецкая Анна Алексеевна, физический факультет Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, fiz.kovetskayaAA@bsu.by.

Научный руководитель – Даденков Иван Геннадьевич, физический факультет Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, dadenkov.ivan@gmail.com.

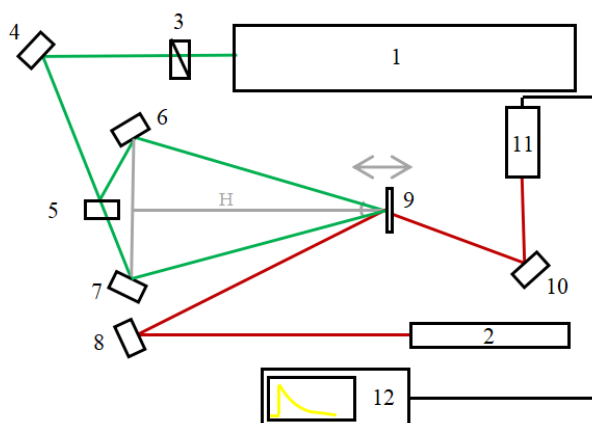
А. В. НОВИЦКАЯ, И. Г. ДАДЕНКОВ, А. Л. ТОЛСТИК

ИМПУЛЬСНАЯ ЗАПИСЬ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕШЁТОК С РАЗНЫМИ ПЕРИОДАМИ В КРИСТАЛЛЕ ТИТАНАТА ВИСМУТА

Проведена запись динамических решеток лазерными импульсами наносекундной длительности в кристалле силиката висмута с последующим зондированием непрерывным излучением. Основной целью являлось исследование зависимости динамики релаксации голографических решеток в зависимости от их пространственного периода, изменяемого в диапазоне от 350 до 1250 нм.

Основным процессом при записи голограммы является фоторефрактивный эффект, который заключается в изменении коэффициента преломления среды при воздействии света. Кристаллы, проявляющие фоторефрактивный эффект, стали называть фоторефрактивными кристаллами. К фоторефрактивным материалам относятся титанат бария, ниобат лития, теллурид цинка, легированный ванадием, кристаллы группы селенитов (титанат висмута, силикат висмута), органические фоторефрактивные материалы, некоторые фотополимеры и некоторые структуры с множественными квантовыми ямами. В данной работе использовался титанат висмута. Он обладает меньшей оптической активностью и более высоким электрооптическим коэффициентом по сравнению с другими силленитами. Одним из существенных преимуществ кубических фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов является формирование в них динамических голограмм в реальном времени. Динамическая голография позволяет осуществлять обращение волнового фронта, изменение параметров модуляции световых сигналов, сокращение длительности светового импульса и т. п. На основе динамических голографических преобразований создаются системы оперативной памяти, системы для голографического распознавания образов, приборы для исследования быстропеременных процессов и т. д. [1–3].

В экспериментах использовалась вторая гармоника импульсного лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом с длиной волны 532 нм. Лазерный пучок, сгенерированный данным лазером, проходит через полуволновую пластину и попадает на направляющее зеркало. Далее луч падает на полупропускающее зеркало, где разделяется на два когерентных пучка, один из которых отражается, а другой проходит. Затем оба луча сводятся в одну точку на кристалле. Таким образом, создается интерференционная картина и записывается в среде в виде дифракционной решетки. В то же время кристалл облучается непрерывным лучом гелий-неонового лазера с длиной волны 632,8 нм. Данный пучок дифрагирует на записанной дифракционной решетке, луч при помощи зеркала направляется на скоростное фотоприемное устройство, соединенное с цифровым осциллографом. В ходе эксперимента записывались осциллограммы для разных периодов динамических решеток. Период решеток изменялся за счет сдвига кристалла вдоль медианы равнобедренного треугольника, образованного записывающими лучами на расстояние H . Зеркало так же сдвигалось на расстояние x для выполнения условия Брэгга.



1 – Nd: YAG-лазер; 2 – гелий-неоновый лазер; 3 – полуволновая пластинка, 4, 6, 7, 8, 10 – зеркала;
5 – полупропускающее зеркало; 9 – кристалл титаната висмута; 11 – скоростное фотоприёмное устройство;
12 – цифровой осциллограф

Рисунок 1 – Оптическая схема установки

В ходе эксперимента был получен набор осциллограмм решеток при разных периодах, представленный на рисунке 2.

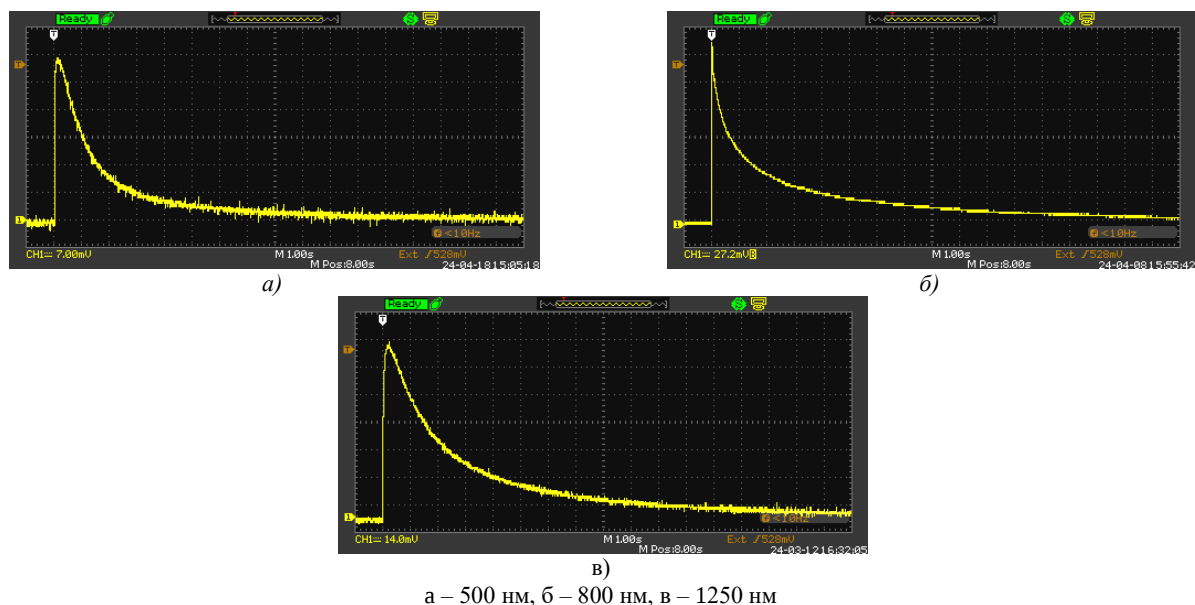


Рисунок 2 – Характерные осциллограммы формирования и релаксации записанных голограмм с разными периодами

С помощью полученных кинетик сигнала дифракции было обнаружено, что при увеличении периода решетки уменьшалось время жизни. К тому же было получено, что при периоде динамической решетки равной 800 нм ее дифракционная эффективность была максимальная.

Список литературы

1. Петров, М. П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М. П. Петров, С. И. Степанов, А. В. Хоменко. – СПб. : Наука. С.-Петербургское отд-ние, 1992. – 320 с.
2. Петров, М. П. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации / М. П. Петров, С. И. Степанов, А. В. Хоменко. – Л. : Наука, 1983. – 270 с.
3. Шепелевич, В. В. Голография в фоторефрактивных оптически активных кристаллах : моногр. / В. В. Шепелевич. – Мозырь : УО МГПУ им. И. П. Шаякина, 2012. – 287 с.
4. Толстик, А. Л. Динамика фотоиндуцированного поглощения в кристаллах титаната висмута / А. Л. Толстик, Х. К. Ханон // Вестн. Бел. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2012. – № 2. – С. 3–7.
5. Фотоиндуцированное поглощение и импульсная запись динамических голограмм в кристаллах силиката висмута / И. Г. Даденков [и др.] // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128, вып. 9.
6. Импульсная запись динамических голограмм в кристалле силиката висмута при изменении длины волны лазерного излучения / И. Г. Даденков [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2022. – Т. 22, № 6. – С. 1025–1030.

In the course of this work, dynamic gratings were recorded by nanosecond laser pulses in a bismuth silicate crystal with subsequent probing by continuous radiation. The main objective was to study the dependence of the relaxation dynamics of holographic gratings on their spatial period, which varied in the range from 350 to 1250 nm.

Новицкая Анна Владимировна, физический факультет Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, fiz.novickayAV1@bsu.by.

Научный руководитель – **Даденков Иван Геннадьевич**, физический факультет Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, dadenkov.ivan@gmail.com.

УДК 535.8

Е. П. ПАНТЕЛЕЕВА, Е. А. МЕЛЬНИКОВА

АНАЛИЗ ФАЗОВОЙ ТОПОЛОГИИ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННОЙ НЖК ЛИНЗЫ ФРЕНЕЛЯ

Разработана эффективная интерференционная методика анализа фазовой топологии оптических вихрей, основанная на предварительной дифракции анализируемого излучения на микроструктурированной нематической жидкокristаллической пленке.

ской ячейке, которая функционирует как электрически управляемая линза Френеля. В качестве чётных и нечётных зон линзы используются домены с твист и планарно-ориентированными молекулами нематического жидкого кристалла. Эффективное электрическое управление анизотропией нематической жидкокристаллической линзы Френеля позволяет переключаться между режимами «анализ фазовой топологии» и «распространение фазового сингулярного луча» работы устройства без изменения оптической схемы. Предложенная методика отличается проведением интерференционного анализа без использования дополнительной когерентной референтной волны и проверена экспериментально и теоретически, в том числе с использованием импульсного лазерного излучения наносекундной длительности в спектральном диапазоне 532–1100 нм. Полученные результаты открывают перспективы для расширения области применения сингулярных пучков в квантовых фотонных технологиях.

В настоящее время огромный научный и практический интерес вызывают фазовые сингулярные пучки [1]. Эти световые пучки характеризуются сложным распределением фазы и амплитуды и широко используются в криптографии, оптическом захвате и манипулировании микрочастиц, системах квантовой коммуникации и информатики и др. [2].

Фазовые сингулярные пучки характеризуются геликоидальным закручиванием фазы вокруг волнового вектора. Константа ℓ , называемая топологическим зарядом, определяет закручивание азимутального угла фазы оптического вихря на величину 2π за период колебания световой волны (λ). Поперечный градиент фазы сингулярного пучка имеет асимметричный характер и вблизи центра вихря (точка сингулярности) принимает большое значение. В точке сингулярности пересекаются фазовые контуры с различными значениями фазы, в результате чего центр оптического вихря характеризуется фазовой неопределенностью и, как следствие, нулевым значением амплитуды. Направление закрутки спирального волнового фронта определяет знак топологического заряда фазового сингулярного пучка [3].

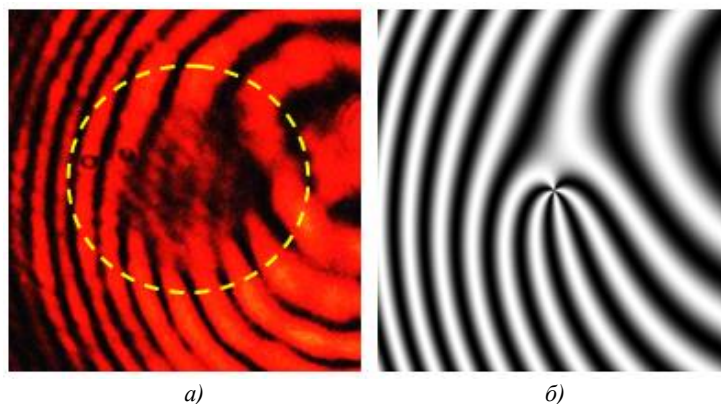
Наиболее эффективным и простым методом анализа фазовой топологии (знак и значение топологического заряда) оптических вихрей является метод когерентного сложения исследуемого вихря со сферической или плоской волной [4]. В случае сложения со сферической волной направление закрутки волнового фронта можно определить однозначно без дополнительных манипуляций, а при сложении с плоской для этого необходимо контролировать взаимную ориентацию волновых векторов сигнального и опорного пучков. Несмотря на всю простоту, этот метод требует наличия когерентной референтной волны, что сильно ограничивает сферы использования технологии.

Мы предлагаем использовать линзу Френеля для измерения топологического заряда фазового сингулярного пучка. В результате дифракции оптического вихря на зонной пластинке Френеля в направлении 0 порядка дифракции распространяется вихрь, полностью сохраняющий фазовую топологию падающей волны, а в направлениях -1 и $+1$ дифракционных порядков формируются сходящийся и расходящийся оптические вихри, топологические заряды которых равны заряду исходной волны. Падение сингулярного пучка в смещённом положении от центра линзы Френеля позволяет реализовать наложение в пространстве кольца прямопрошедшего излучения (на кольце поперечный градиент фазы имеет незначительную величину, поэтому волновой фронт можно считать квазиплоским) и ядра сходящейся волны. Результатом когерентного сложения этих двух волн будет интерференционная картина (рисунок 1), оценка которой позволяет однозначно определить фазовую топологию вортেকса, распространяющегося в направлении -1 дифракционного порядка. Направление закрутки позволяет однозначно определить знак, а количество разветвлений – величину заряда.

Высокая величина двулучепреломления нематических жидкокристаллических (НЖК) веществ и возможность её контроля с помощью внешних электрических полей послужили причиной широкого практического использования ЖК сред в приложениях современной фотоники [5]. В настоящее время ключевыми направлениями исследований многих исследовательских групп являются разработка жидкокристаллических переключаемых линз с улучшенными характеристиками [6].

В качестве зонной пластинки Френеля мы предлагаем использовать электрически управляемую нематическую ЖК линзу Френеля с твист и планарно-ориентированными микродоменами. ЖК линза представляет собой чередующиеся области (кольца) с твист и планарной ориентациями директора, созданные на основе фотоориентации азокрасителя AtA-2 через амплитудный транспарант. Разработанная линза позволяет работать в широком спектральном диапазоне. Продемонстрированы фокусирующие свойства ЖК линзы Френеля при изменении амплитуды приложенного электрического напряжения и определён рабочий диапазон (порядка 3 В), соответствующий максимальной эффективности фокусировки (максимальной дифракционной эффективности). Эффективное электрическое управление дифракционными свойствами НЖК линзы позволяет осуществлять переключение между режимами «анализ фазовой топологии» и «распространение оптического вихря» работы устройства без изменения схемы экспериментальной установки. Предложенная геометрия распространения световых пучков реализует оценку топологии волнового фронта лазерного пучка в режиме реального времени и определение топологического заряда на основе анализа картины интерференции прошедшего и дифрагированного световых пучков на выходе НЖК линзы Френеля. Разработанный метод не нуждается в дополнительной когерентной опорной волне и позволяет включать / выключать дифракционную структуру, что позволяет работать в режимах «анализ фазовой топологии» и «распространение оптического вихря» без внесения изменений в

оптическую схему. Предложенный дифракционный НЖК элемент относится к электрически управляемой линейке плоской оптики, отличается компактностью, низкой потребляемой электрической мощностью и простотой изготовления. Полученные результаты расширяют возможности практического применения жидкокристаллических структур для управления параметрами оптического излучения и могут быть использованы при разработке лазерно-оптических элементов.



а) – экспериментальные результаты, б) – результат численного моделирования

Рисунок 1 – Картины интерференции ядра оптического вихря, распространяющегося в направлении -1 порядка дифракции, с кольцом прямопрошедшего фазового сингулярного пучка после фокальной плоскости НЖК линзы Френеля (топологический заряд вихря, падающего на НЖК элемент, $\ell = +4$)

Список литературы

1. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / Y. Shen [et al.] // *Light: Science & Applications*. – 2019. – Vol. 8, № 1. – P. 90.
2. The polarizing Sagnac interferometer: a tool for light orbital angular momentum sorting and spin-orbit photon processing / S. Slussarenko [et al.] // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18, № 26. – P. 27205–27216.
3. Padgett, M. J. Orbital angular momentum 25 years on / M. J. Padgett // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25, № 10. – P. 11265–11274.
4. Bazhenov, V. Y. Screw dislocations in light wavefronts / V. Y. Bazhenov, M. S. Soskin, M. V. Vasnetsov // *Journal of Modern Optics*. – 1992. – Vol. 39, № 5. – P. 985–990.
5. Liang, B. Achromatic polymer-dispersed liquid crystal lens with diffractive-refractive hybrid structure / B. Liang, J. An, X. Su // *Materials Research Express*. – 2023. – Vol. 10, № 4. – P. 046202.
6. Recent advances in adaptive liquid crystal lenses / J. F. Algorri [et al.] // *Crystals*. – 2019. – Vol. 9, № 5. – P. 272.

An effective interference technique for analyzing the phase topology of optical vortices based on preliminary diffraction of the analyzed radiation on a microstructured nematic liquid crystal cell that functions as an electrically controlled Fresnel lens has been developed. Domains with twist and planarly oriented molecules of a nematic liquid crystal are used as even and odd zones of the lens. Effective electrical control of the anisotropy of a nematic liquid crystal Fresnel lens allows switching between the «phase topology analysis» and «optical singular beam propagation» modes of operation of the device without changing the optical circuit. The proposed technique is distinguished by conducting interference analysis without using a coherent reference wave and has been tested experimentally and theoretically, including using pulsed laser radiation of nanosecond duration in the spectral range of 532–1100 nm. The results obtained open up prospects for expanding the field of application of singular beams in quantum photonic technologies.

Пантелеева Екатерина Петровна, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, pantsialevevakate@gmail.com.

Научный руководитель – *Мельникова Елена Александровна*, доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, Melnikova@bsu.by.

УДК 538.91

Н. А. ПАВЛОВА

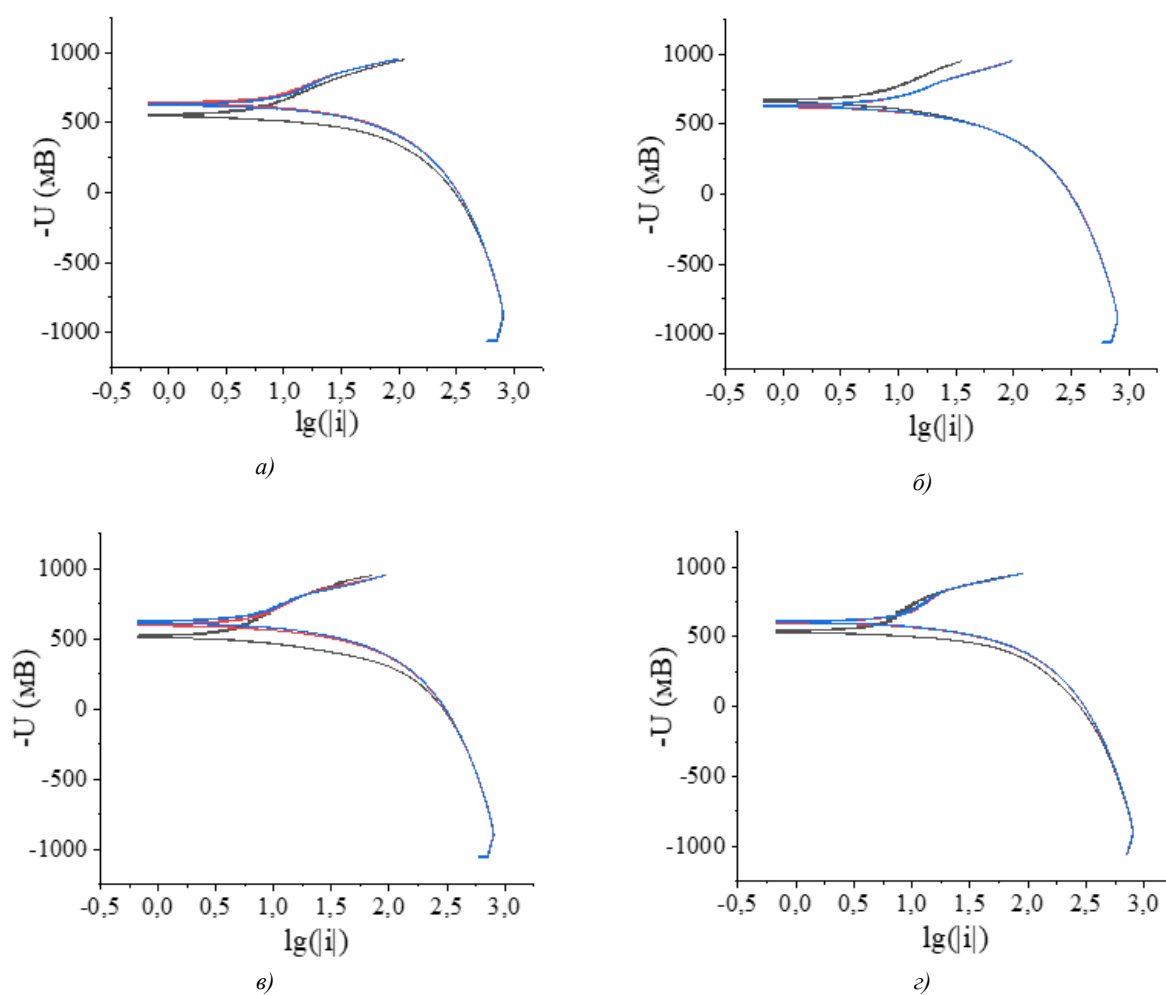
КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ СТИРОЛАКРИЛОВЫХ ПОКРЫТИЙ, ОТВЕРЖДЁННЫХ ПРИ УФ-ИЗЛУЧЕНИИ

Приведены результаты измерения коррозионной стойкости покрытий ВД-АК-1179, отверждённых при облучении УФ-излучением. Выявлена зависимость коррозионной стойкости покрытий ВД-АК-1179 от времени отверждения УФ-излучением.

Нанесение покрытий на основе стилакриловых плёнообразующих сополимеров на металлические изделия и конструкции является одним из самых распространенных методов борьбы с коррозией. Широкое использование данных покрытий в различных областях промышленности обуславливает необходимость получения материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами [1; 2]. В настоящее время активно развиваются радиационно-химические технологии, основанные на действии ионизирующего излучения [2–6]. В работе приведены результаты исследования влияния УФ-излучения на коррозионную стойкость стиролакриловых покрытий на основе ВД-АК-1179.

Отверждение проводилось под УФ-излучением в течение 15, 30, 45 и 60 мин. Источником УФ-излучения служила эксимерная лампа на основе газовой смеси криптон-бром (KrBr), излучающая ультрафиолетовое излучение с длиной волны 207 нм (ИСЭ СО РАН, г. Томск) [3]. Исследование коррозионной стойкости проводили методом полярографического анализа в 3 %-м р-ре NaCl.

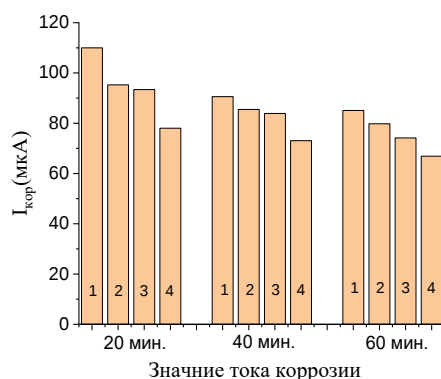
На рисунке 1 приведены коррозионные диаграммы покрытия, отвержденного при УФ-облучении в течение 20, 40 и 60 мин.



1 – коррозионные испытания в течение 20 мин.; 2 – 40 мин.; 3 – 60 мин.

Рисунок 1 – Коррозионные диаграммы покрытия, отверждённого при УФ-облучении в течение 15 (а), 30 (б), 45 (в), 60 (г) мин.

Исследование коррозионной стойкости показали, что покрытия ВД-АК-1179, отверждаемые при УФ-облучении, обладают повышенными защитными свойствами, на что указывает величина тока коррозии. На рисунке 2 показана гистограмма токов коррозии ВД-АК-1179, отвержденных при УФ-облучении в течение 15, 30, 45 и 60 мин. Видно, что с увеличением времени испытаний ток коррозии снижается, что указывает на формирование защитной пассивирующей пленки на покрытиях.



Режимы облучения 1 – 15 мин., 2 – 30 мин., 3 – 45 мин., 4 – 60 мин.

Рисунок 2 – Ток коррозии покрытий ВД-АК-1179, отверждённых при облучении УФ-излучением

Обнаружена зависимость коррозионной стойкости покрытий от времени УФ-облучения. С увеличением времени УФ-облучения ток коррозии уменьшается. Так, учитывая, что ток коррозии для контрольных покрытий составляет 120 мкА после 20 мин коррозионных испытаний, то для покрытий, отверждаемых в течение 20 мин. при УФ облучении ток коррозии снижается на 8,3 %, 20,6 %, 22,2 % и 35,0 %, при 40 мин. – на 24,5 %, 28,8 %, 30,0 % и 39,1 %, при 60 мин. – на 29,1 %, 33,5 %, 38,2 % и 44,26 %.

Таким образом, коррозионная стойкость покрытий ВД-АК-1179, отвержденных при УФ-облучении, повышается.

Список литературы

1. Валько, Н. Г. Структура и свойства лакокрасочных покрытий, модифицированных полыми стеклянными микросферами / Н. Г. Валько, А. И. Глоба, А. В. Касперович // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 95–102.
2. Валько, Н. Г. Влияние ультрафиолетового излучения на механические свойства акриловых защитно-декоративных лакокрасочных покрытий / Н. Г. Валько, Д. И. Богдевич // Технология органических веществ [Электронный ресурс] : материалы 87-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотрудников, аспирантов (с междунар. участием), Минск, 31 янв. – 17 февр. 2023 г. – Минск : БГТУ, 2023. – С. 344–345.
3. Богдевич, Д. И. Исследование влияния рентгеновского излучения на тонкую структуру и защитные свойства акриловых лакокрасочных покрытий / Д. И. Богдевич, Н. Г. Валько // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка : в 2 ч. Ч. 2 : сб. докл. 13-го Междунар. симп., Минск, 5–7 апр. 2023 г. – Минск : Беларуская навука, 2023. – С. 138–141.
4. Валько, Н. Г. Исследование влияния рентгеновского излучения на коррозионную стойкость стирол-акриловых лакокрасочных покрытий / Н. Г. Валько, В. М. Анищик, Д. И. Богдевич // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 15-й Междунар. конф., Минск, 26–29 сент. 2023 г. – Минск : БГУ, 2023. – С. 212–214.

The paper presents the results of measuring the corrosion resistance of VD-AK-1179 coatings cured by UV irradiation. The dependence of the corrosion resistance of VD-AK-1179 coatings on the curing time by UV radiation is revealed.

Павлова Надежда Андреевна, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, pavlova_na_19@mail.ru.

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

УДК 538.91

Н. А. ПАВЛОВА

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ И МИКРОТВЁРДОСТЬ СПЛАВОВ МАГНИЯ, ОБРАБОТАННЫХ УСКОРЕННЫМИ ИОНАМИ

Приведены результаты исследования влияния обработки потока ионов углерода и альфа-частиц с плотностью тока 80 А/см² и 160 А/см² на структуру и свойства сплава Mg ML5. Обнаружено, что увеличение плотности тока в пучке ионов приводит к уменьшению размеров кратеров на поверхности модифицированного сплава, которые появляются вследствие воздействия ионного пучка. Показано, что микротвёрдость магниевых сплавов уменьшается на 12 % после обработки ионным пучком.

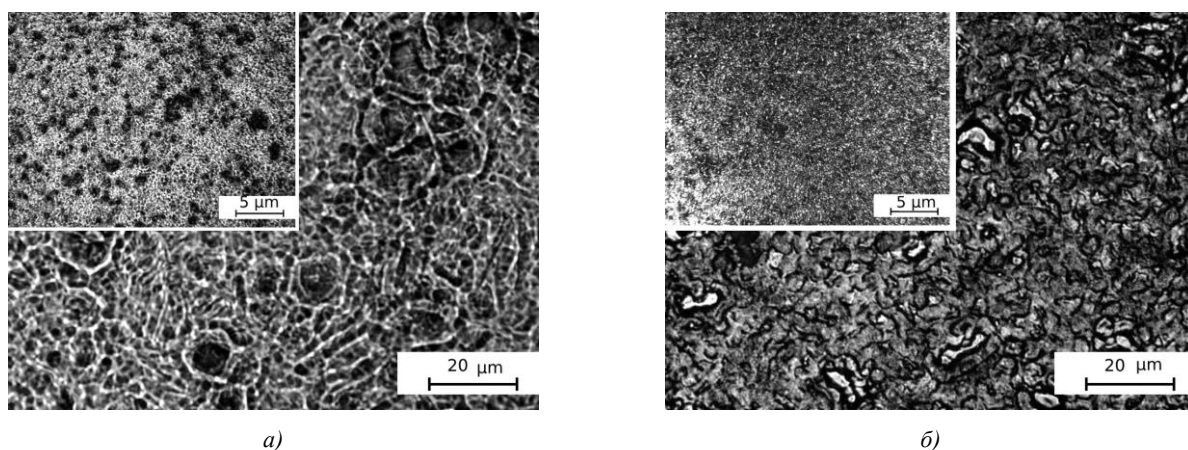
Целью данной работы являлось изучение морфологии поверхности и микротвердости сплавов Mg. Актуальность данной работы связана с широким применением сплавов Mg в различных областях промышленности, что вызывает необходимость разработки новых методов модификации их свойств, в том числе с применением высокоэнергетического воздействия [1–4].

Интерес представляют методы модификации поверхности металлов ускоренными ионами, поскольку они направлены на улучшение физико-химических свойств поверхностного слоя металлов за счёт бомбардировки их высокоэнергетическими ионами. Этот процесс позволяет изменять структуру, состав и функциональные характеристики материала без значительного воздействия на его объёмные свойства, а также позволяет упрочнять поверхность, повышать коррозионную стойкость, снижать трение и износ.

В качестве объектов исследования был выбран сплав магния ML 5 (концентрация Al составляет 9 %). Обработка образцов осуществлялась при потоке ионов углерода и альфа-частиц с плотностью тока 80 А/см² и 160 А/см². Измерения твердости образцов выполняли с помощью твердомера KASON 59-HV по методу Викерса (HV) при нагрузке 10 г.

На рисунке 1 показаны изображения поверхности Mg в зоне воздействия ионным пучком, которая соответствует плотностям тока 80 А/см² (рисунок 1а) и 160 А/см² (рисунок 1б). Видно, что ионная обработка магниевого сплава приводит к типичной модификации поверхности магния, а именно к образованию кратеров. Так, при обработке ML5 ионным пучком с плотностью тока 80 А/см² на поверхности возникают кратеры размером до 1 мкм.

Обнаружено, что при увеличении плотности тока ионов геометрия поверхности изменяется и становится более развита. Размер кратеров уменьшается до 0,5 мкм.



а – плотность тока 80 А/см²; б – плотность тока 160 А/см²

Рисунок 1 – Изображение поверхности образца Mg в зоне воздействия ионным пучком

Неоднородная морфология поверхности покрытий Mg в зоне воздействия ускоренных электронов указывает на то, что микротвёрдость покрытия в зоне воздействия может изменяться. Результаты исследования микротвердости в зоне воздействия ионным, представлены на рисунке 2.

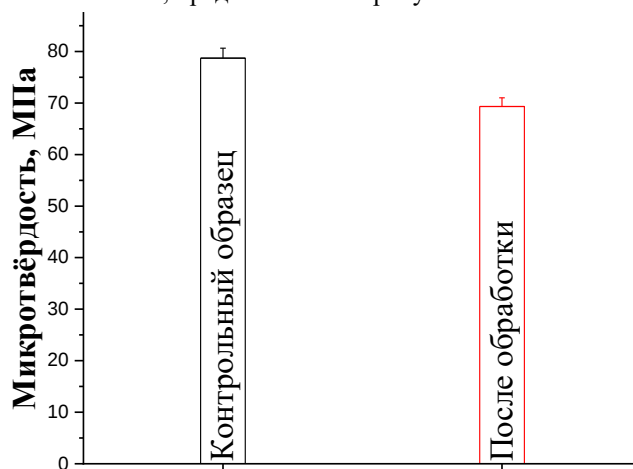


Рисунок 2 -Микротвёрдость сплава Mg

Обнаружено, что рельеф модифицированной поверхности зависит от плотности тока. При повышении плотности тока рельеф становится неоднородным, появляются дефекты в виде кратеров, возникновение которых свидетельствует о протекании процессов плавления, перекристаллизации. Наблюдаемые неоднородность в геометрии поверхности образца Mg, обработанных ускоренными ионами, являются следствием неоднородного распределения энергии по пучку излучения. По результатам исследования зависимости размера кристаллитов и деформации решетки образца Mg видно, что в результате воздействия ускоренными ионами на образец увеличивается деформация решетки образца. После обработки образца магния потоком ионов углерода, и альфа частиц с плотностью тока 80 А/см² и 160 А/см², значение микротвердости уменьшилось. Обнаружено что, обработка образцов Mg ускоренными ионами отрицательно влияет на значения микротвердости образца.

Список литературы

1. Васильев, С. В. Изменения кристаллической структуры металлов в ходе их лазерной обработки / С. В. Васильев, Н. Г. Валько, А. Ю. Иванов, А. Л. Ситкевич // Инженерно-физический журнал. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. – 2022. – Т. 95, № 3. – С. 835–843.
2. Мороз, Н. И. Влияние термической обработки на твердость, структуру и свойства электротехнической стали / Н. И. Мороз, Н. Г. Валько // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 83–91.
3. Мороз, Н. И. Влияние отжига на коррозионную стойкость трансформаторной стали, легированной кремнием / Н. И. Мороз, Н. Г. Валько // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. 2022. – Т. 12, № 3. – С. 108–116.
4. Гоголева, Н. Г. Применение лазеров в науке, технике, медицине : учеб. пособие / Н. Г. Гоголева. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007. – 79 с.

The paper presents the results of a study of the effect of carbon ion and alpha particle flow treatment with a current density of 80 A/cm² and 160 A/cm² on the structure and properties of Mg ML5 alloy. It was found that an increase in the current density in the ion beam leads to a decrease in the size of craters on the surface of the modified alloy that appear as a result of the ion beam. It is shown that the microhardness of the magnesium alloy decreases by 12 % after ion beam treatment.

Павлова Надежда Андреевна, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Беларусь, pavlova_na_19@mail.ru.

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

УДК 529.213

М. А. ПАШКЕВИЧ

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ АМОРФНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ, ВОЗБУЖДАЕМАЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Исследовались полосы люминесценции аморфного диоксида кремния, возникающие при возбуждении лазерным излучением длинной волны 258 нм. Генерация лазерного излучения производилось фемтосекундной лазерной системой ТЕТА-6/200-НЕ с длиной волны 1030 нм. Для получения длины волны 258 нм использовался генератор второй, третьей и четвертой гармоник AMG-A-1030-НЕ. Спектрофотометр SOLARS 150A 4 использовался для снятия спектров испускания, возникающих при возбуждении аморфного диоксида кремния лазерным излучением.

Высокочистые кварцевые стекла используются в пропускающей и дифракционной оптике при применении мощных лазеров [1]. Примером применения таких стекол является их использование в микрофотографии и в оптических системах, работающих в глубоком и вакуумном ультрафиолете [2]. Наличие дефектов в структуре, наведенных лазерным излучением и изначальных, может привести к возникновению полос люминесценции и поглощения, флуктуациям значения показателя преломления у материала [3]. Появление таких процессов воспрещает использование стекла в литографии.

Структурными единицами аморфного диоксида кремния являются SiO₄ тетраэдры, где внутри тетраэдра располагается кремний, а по углам – кислород. Такие тетраэдры соединяются между собой за счет наличия общего кислорода (рисунок 1а). Таким образом, формируется цепочка связанных между собой тетраэдров, формирующие кластер, с примерным размером в 2 нм, где взаимосвязь между структурными параметрами определена [4]. Общая же топология аморфного SiO₂ представляет собой n-сочлененные кольца (–Si–O–)_n (рисунок 1б).

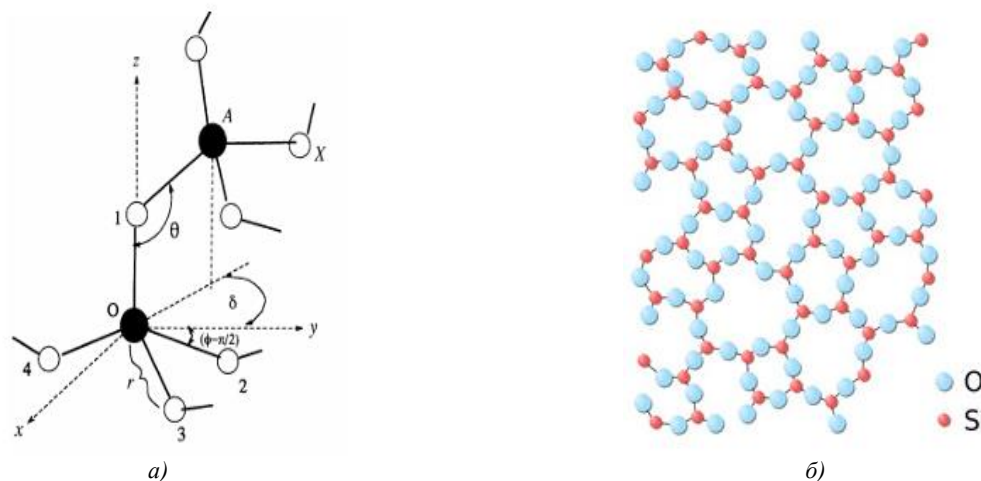


Рисунок 1 – Схема а) соединения двух тетраэдров SiO_4 , б) структуры аморфного диоксида кремния

Наличие дефектов типа NBOHC (non-bridging oxygen hole center), ODC (oxygen deficiency centers), E'-centers и других [5] является причиной возникновения люминесценции при взаимодействии аморфного диоксида кремния с лазерным излучением. Дефект NBOHC ($\equiv\text{SiO}\cdot$) представляет собой оборванную связь кислорода с кремнием. Дефект типа ODC представляет собой кислородную вакансию, при которой либо атомы кремния образуют связь между собой ($\equiv\text{Si}-\text{Si}\equiv$), либо у атома кремния обрывается полностью связь ($\equiv\text{Si}\cdot$).

Наблюдаемые в диапазоне длин волн от 200 до 800 нм полосы люминесценции: на длинах волн 280 нм, 313 нм, 444 нм, 460 нм и 470 нм, относящиеся к дефекту типа ODC [1–2; 4]; на длине волны 650 нм, относящаяся к дефекту типа NBOHC [2]; на длине волны 580 нм, причиной которого является дефект, наведенный лазерным излучением [1]; и на длине волны 550 нм, причина возникновения которого не выявлена [2].

Образцами исследования были стекла компании Corning синтезированные в Институте тепло- и массообмена имени В. А. Лыкова. Полученный спектр стекла компании Corning представлены на рисунке 2.

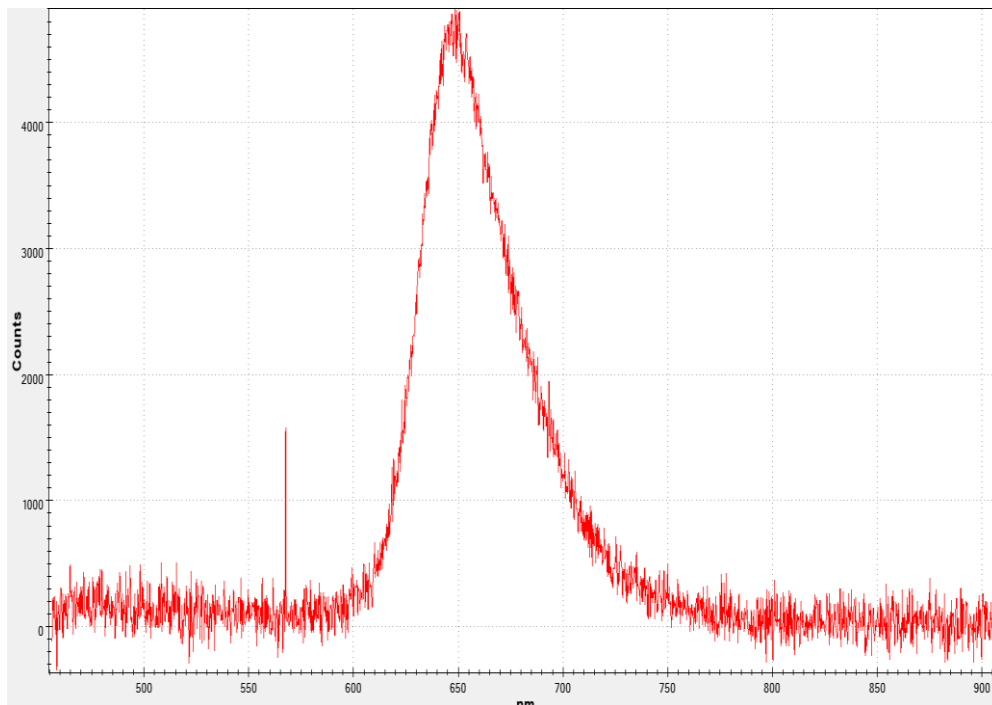


Рисунок 2 – Спектр испускания стекла компании Corning при воздействии на него ультрафиолетового излучения

Наблюдаемый у спектра пик с центром в 650 нм относится к наблюдаемой люминесценции. Соответствующий дефект структуры, являющейся причиной данной люминесценции – NBOHC. Спектр образца, синтезированный в ИТМО, представлен на рисунке 3.

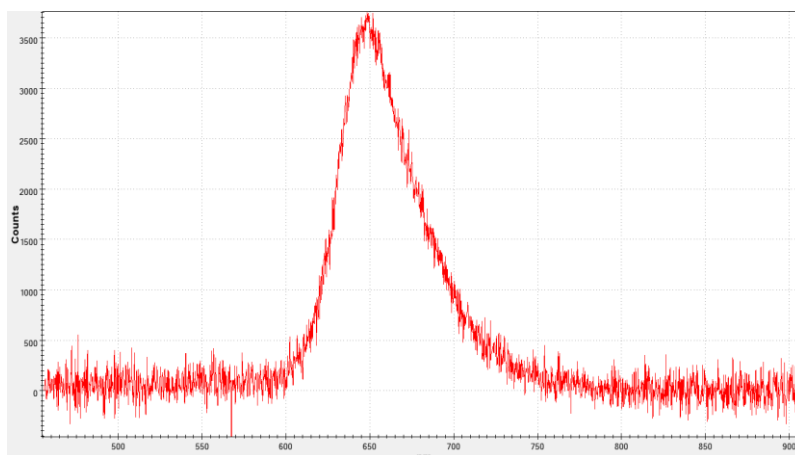


Рисунок 3 – Спектр испускания стекла, изготовленного в ИТМО, при воздействии на него ультрафиолетового излучения

Как и у образца, изготовленного компанией Corning, в спектре испускания наблюдается единственный пик с центром в 650 нм. Данный пик имеет меньшую интенсивность, что говорит о меньшем количестве концентрации дефектов NBOHC, которая имеет линейную зависимость от коэффициента однофотонного возбуждения [2]. В свою очередь интенсивность люминесценции зависит линейно от данного коэффициента. Несимметричность наблюдаемых пиков обуславливается негармоническим уширением, характерным для аморфных структур [5].

Список литературы

1. Absorption and luminescence spectroscopy of fused silica by multiple pulses irradiation at 355 nm / Z. Zhang [et al.] // Optik. – 2014. – Vol. 125. – P. 6256–6259.
2. Impact of heat treatment on NBOHC luminescence of OH-containing and H₂ impregnated fused silica for deep-ultraviolet applications / B. Li [et al.] // Journal of Luminescence. – 2019. – Vol. 209. – P. 31–38.
3. UV-VUV laser induced phenomena in SiO₂ glass / K. Kajihara [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2004. – Vol. 218. – P. 323–331.
4. Mishchik, K. Ultrafast laser-induced modification of optical glasses: a spectroscopy insight into the microscopic mechanisms / K. Mishchik. – Saint-Etienne : Jean Monnet University, 2012. – 22 p.
5. Skuja, L. Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide / L. Skuja // Journal of Non-Crystalline Solids. – 1988. – Vol. 239. – P. 16–48.

In this work, the luminescence bands of amorphous silicon dioxide that occur when excited by laser radiation with a wavelength of 258 nm were studied. The laser radiation was generated by a femtosecond THETA-6/200-NE laser system with a wavelength of 1030 nm. To obtain a wavelength of 258 nm, an AMG-A-1030-NE second, third, and fourth harmonic generator was used. The SOLAR S 150A 4 spectrophotometer was used to capture emission spectra that occur when amorphous silicon dioxide is excited by laser radiation.

Пашкевич Михаил Андреевич, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, misgrpashgr@gmail.com.

Научный консультант – *Филатов Сергей Александрович*, кандидат технических наук, доцент, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь, fil@hmti.ac.by.

Научный руководитель – *Углов Владимир Васильевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, uglov@bsu.by.

УДК 53.043

З. А. СВИСТУНОВ

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ Р₆М₅, ЛЕГИРОВАННОГО АТОМАМИ Nb И Cu ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Изучено структурно-фазовое состояние, механические и коррозионные свойства поверхностного слоя инструментальной быстрорежущей стали Р₆М₅, легированной Nb и Nb + Cu, под действием компрессионных плазменных потоков. Подтверждено положительное влияние легирования на механические свойства и коррозионную стойкость стали Р₆М₅.

Быстрорежущие стали широко используются при изготовлении инструментов и эксплуатируются при высоких температурах (до 600 °С) [1]. Проведены исследования по повышению Микротвёрдости стали Р₆М₅ путем комбинированного ионно-плазменного и термического воздействия. В качестве легирующих элементов использовались ниобий и медь. Выбор этих элементов для нанесения покрытий связан с тем, что ниобий при введении в поверхностный слой образует мелкодисперсные карбонитриды ниобия, которые повышают сопротивление разрушению. Легирование медью должно увеличить износостойкость инструмента. Медь, из-за ее высокой теплопроводности, является твёрдым интенсификатором охлаждения режущей поверхности инструмента [2].

Исследовались две серии образцов из быстрорежущей стали Р₆М₅. Покрытие толщиной 2 мкм осаждалось методом вакуумно-дугового осаждения по технологии конденсации с ионной бомбардировкой. Осаждение проводилось на установке ВУ–2МБС. На первую серию осаждали покрытие Nb. Вторую серию покрывали одновременно с двух катодов Nb и Cu: 52,5 ат. % Nb и 47,5 ат. % Cu. После нанесения покрытий образцы подвергались воздействию компрессионным плазменным потоком (КПП) с различной плотностью энергии и отжигу. Для исследования применялись РЭМ, рентгеноструктурный анализ, измерение массы и микротвёрдости.

На рисунке 1 представлена зависимость концентрации легирующих элементов в поверхностном слое толщиной ~1 мкм, полученная с помощью энергодисперсного микроанализа. Видно, что с увеличением энергии, поглощенной поверхностью, концентрация легирующих элементов снижается.

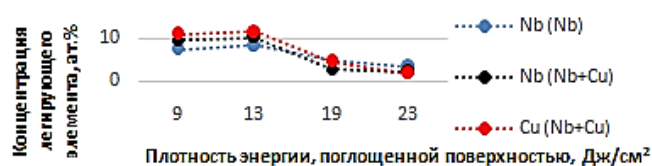


Рисунок 1 – Зависимость концентрации легирующего элемента в поверхностном слое от плотности энергии КПП, поглощённой поверхностью

Для анализа влияния обработки методом КПП на эрозию материала образцы взвешивались на аналитических весах марки RadwagAS 60/220/C/2/N. На рисунке 2 видно, что удаленная масса у образцов с покрытием из меди и ниобия меньше, чем у образцов, покрытых ниобием.

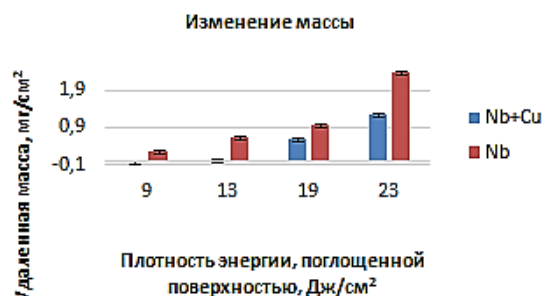


Рисунок 2 – Зависимость удалённой массы от плотности энергии КПП, поглощённой поверхностью

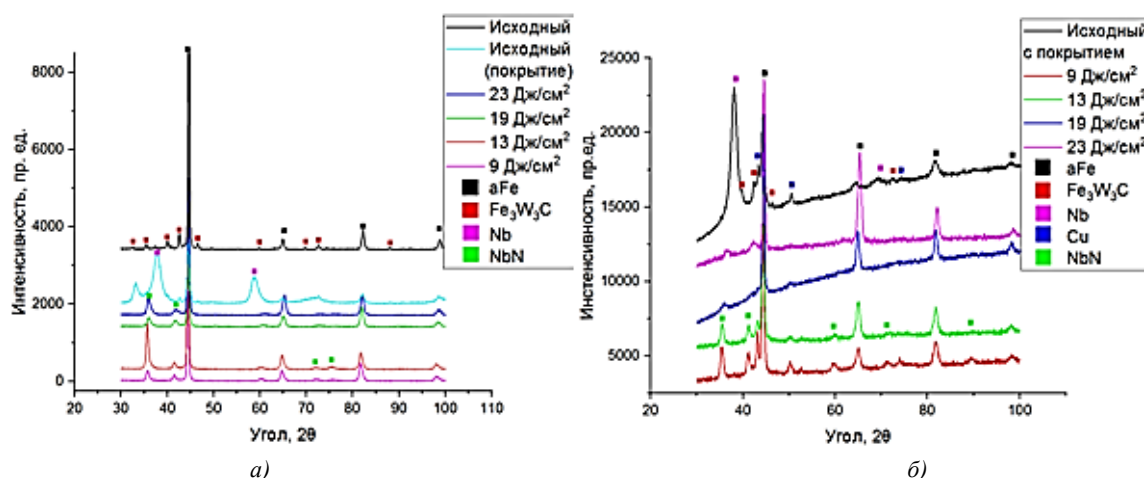


Рисунок 3 – Дифрактограммы образцов с покрытием Nb (а) Nb + Cu (б) до и после воздействия компрессионными плазменными потоками

Проведен фазовый анализ образцов до и после обработки КПП (рисунок 3). Воздействие КПП во всех случаях приводит к исчезновению пиков $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, что свидетельствует о растворении этого карбида. Также происходит исчезновение пиков ниобия в обоих случаях. Пики меди исчезают лишь при максимальной плотности поглощенной энергии. Также обнаружено появление новой фазы, которая может быть идентифицирована как NbN, формирующаяся в результате диффузии атомов азота из атмосферы в поверхностный слой.

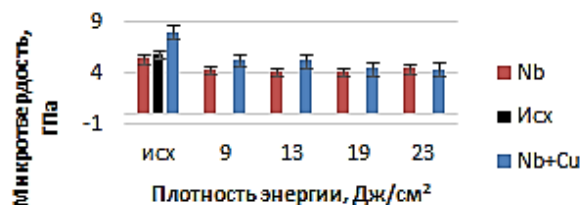


Рисунок 4 – Зависимость Микротвёрдости от плотности энергии КПП, поглощённой поверхностью

Изменение структурно-фазового состояния приводит к изменению механических свойств поверхностного слоя. Проведено измерение Микротвёрдости образцов методом Виккерса. На рисунке 4 приведена Микротвёрдость образцов, обработанных с разной плотностью энергии, поглощенной поверхностью.

После нанесения покрытия Nb Микротвёрдость образца с покрытием не меняется в пределах погрешности измерения. С легированием Nb + Cu Микротвёрдость поверхностного слоя увеличивается. Большая плотность поглощенной энергии ведет к меньшей Микротвёрдости из-за растворения карбидов.



Рисунок 5 – Зависимость изменения массы от плотности энергии, поглощённой поверхностью, в сравнении с исходным образцом, после 3 ч отжига

Характер изменения массы образцов после отжига показал, что наилучшую коррозионную стойкость демонстрирует образец, легированный Nb + Cu и обработанный с плотностью энергии 9 Дж/см² (рисунок 5).

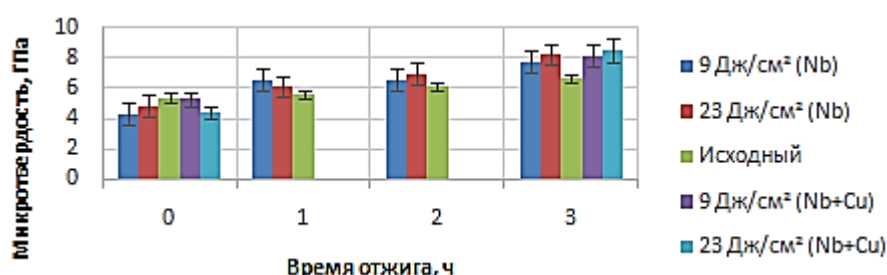


Рисунок 6 – Зависимость Микротвёрдости от времени отжига образцов

После отжига образцов проведено измерение Микротвёрдости методом Виккерса. На рисунке 6 видно, что с увеличением времени Микротвёрдость исходного образца возрастает с 5,3 до 6,6 ГПа – вплоть до увеличения на 23 % после трёх часов отжига: Микротвёрдость легированных образцов возрастает на 50–95 % для обоих вариантов легирования и превышает Микротвёрдость исходного образца до отжига. Комбинированное ионно-плазменное и термическое воздействие позволяет повысить Микротвёрдость быстрорежущей стали.

Список литературы

1. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. – М. : Металлургия, 1983. – 527 с.
2. Манаков, Н. А. О возможностях повышения износостойкости металлорежущего инструмента / Н. А. Манаков, Е. В. Свиденко // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2015. – № 3. – С. 3.
3. Марусин, М. В. Поверхностное легирование углеродистой стали медью при высокоэнергетической индукционной обработке / М. В. Марусин, В. Г. Щукин, В. В. Марусин // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 5. – С. 67–70.
4. Анищик, В. М. Модификация инструментальных материалов ионными и плазменными пучками / В. М. Анищик, В. В. Углов. – Минск : Белорус. гос. ун-т, 2003. – 176 с.
5. Погребняк, А. Д. Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях и свойства металлических материалов после импульсного воздействия пучков частиц / А. Д. Погребняк, О. П. Кульментьева // Фізична інженерія поверхні. – 2003. – № 1–2. – С. 108–136.
6. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками / В. В. Углов [и др.]. – Минск : Белорус. гос. ун-т, 2013. – 248 с.
7. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. – М. : Металлургия, 1970. – 366 с.
8. Дифракционные методы исследования кристаллов: лабораторный практикум для студентов физ. спец. «Физика твердого тела», «Физика защитных покрытий» / В. М. Анищик [и др.]. – Минск : Белорус. гос. ун-т, 2007. – 84 с.
9. Эрозия материалов при воздействии компрессионных плазменных потоков / Н. Н. Черенда [и др.] // Перспективные материалы. – 2014. – № 11. – С. 5.
10. Механизмы эрозии поверхности металлов при воздействии компрессионных плазменных потоков / Н. Н. Черенда [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 9–3. – С. 159–163.

The work studied the structural – phase state, mechanical and corrosion properties of the surface layer of high-speed tool steel P6M5, alloyed with Nb and Nb with Cu under the action of compression plasma flows. A positive effect of alloying on mechanical properties and corrosion resistance was found.

Свистунов Захар Александрович, младший научный сотрудник Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь, zakhariysv@mail.ru.

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

УДК 621.315

Д. А. СИМОНЕНКО, В. Н. ДУДАРЕНКО, С. М. ИВАНЮТА

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПЛЁНКИ ОКСИДА ЦИРКОНИЯ И ИХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Оксид циркония находит широкое применение в электронике, медицине, автомобильной промышленности, энергетике и многих других областях человеческой деятельности. Исследовано формирование оксида циркония методом электрохимического анодирования циркониевой фольги и тонких пленок в различных электролитах. Установлено, что выбор электролита для проведения анодного процесса оказывает влияние на структуру формируемых оксидных пленок. Анализ структуры полученных пленок оксида циркония с помощью растрового электронного микроскопа показал, что при анодировании циркония в водных растворах лимонной кислоты формируется пленка оксида барьерного (беспористого) типа, а в водных растворах хлористого натрия образуется наноструктурированная пористая оксидная пленка, имеющая кораллообразную структуру с минимальными размерами оксидного «скелета» порядка 50 нм. Исследование свойств, сформированных наноструктурированных пленок оксида циркония показало, что они характеризуются супергидрофильной поверхностью (угол смачивания составляет 0°) и наличием отрицательного электростатического заряда. Пленки оксида циркония с развитой внутренней поверхностью открывают новые перспективы использования исследуемого материала как в электронных изделиях, так и в биомедицинских применениях.

В настоящее время целый ряд тугоплавких металлов, к которым относится и цирконий, используются как для производства медицинских имплантов [1; 2], так и при изготовлении различных элементов интегральной электроники, в том числе запоминающих устройств, конденсаторов большой емкости, сенсорах [3–7]. Столь широкая область применения циркония и его производных обусловлена рядом уникальных свойств этого материала: высокая износостойкость, химическая инертность, высокие изоляционные характеристики и низкие диэлектрические потери в окисленном состоянии. В данной работе было проведено формирование пленок оксида циркония методом электрохимического анодирования в различных электролитах и исследованы их электрофизические свойства.

В качестве исходных материалов были использованы циркониевая фольга толщиной 30 мкм и циркониевые пленки, полученные магнетронным осаждением на кремниевые подложки. Толщина осажденных пленок составляла 200–250 нм. В качестве предварительной подготовки образцов проводилось обезжиривание их по-

верхности с последующей промывкой дистиллированной водой. Для формирования пленок анодного оксида циркония использовали двухэлектродную электрохимическую ячейку, схематически представленную на рисунке 1. Процесс электрохимическое анодирование проводили в гальваностатическом режиме при плотностях тока от 1 до 200 мА/см². Электролитами для проведения анодного процесса выступали низкоконцентрированные водные растворы лимонной кислоты и хлорида натрия. Длительность анодирования составляла от 10 до 20 минут.

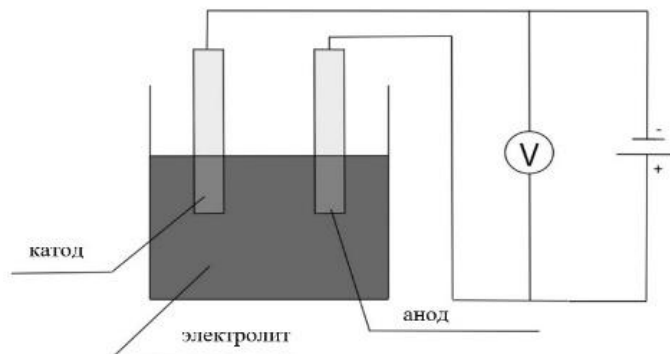


Рисунок 1 – Схематическое изображение ячейки для проведения электрохимического анодирования

Для исследования морфологии сформированных пленок была использована растровая электронная микроскопия (РЭМ). 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 лимонной кислоты формируется пленка оксида барьерного (беспористого) типа, в то время как в водных растворах хлористого натрия образуется наноструктурированная пористая оксидная пленка.

На рисунке 2 представлены РЭМ изображения типичной пленки оксида циркония, полученной в результате электрохимического анодирования в 1 % водном растворе лимонной кислоты. Как видно из рисунка, данная пленка имеет структуру барьерного (беспористого) типа толщиной порядка 400–500 нм. При анализе РЭМ изображения, полученного с максимальным разрешением (рисунок 2б), становится видно, что оксидная пленка состоит из плотноупакованных зерен размером 20–50 нм.

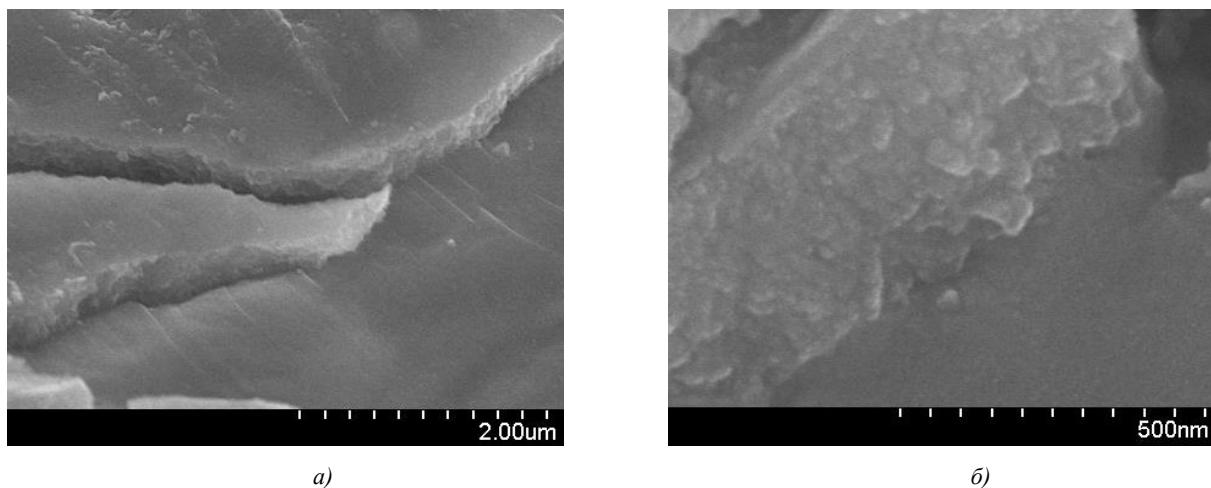


Рисунок 2 – Микрофотографии плотной оксидной плёнки, полученной анодированием в 1 %-м водном растворе лимонной кислоты: а – общий вид, б – зернистая структура укрупнено

РЭМ изображения пленок оксида циркония, полученных электрохимическим анодированием в 1 %-м водном растворе хлорида натрия, представлены на рисунке 3. Толщина пленок составляет 20–25 мкм (рисунок 3а). Структура пористого оксида имеет кораллообразную структуру. РЭМ изображения высокого разрешения показали, что минимальный размер оксидного «скелета» составляет 50 нм.

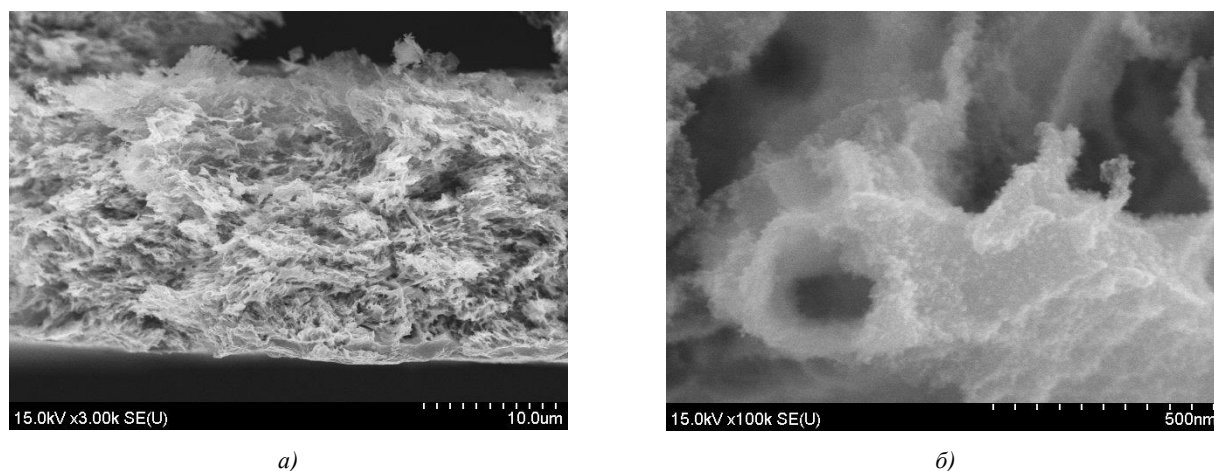


Рисунок 3 – Микрофотографии пористой оксидной плёнки, полученной анодированием в 1 %-м водном растворе хлорида натрия: а – общий вид, б – фрагмент пористой структуры

Известно, что смачиваемость поверхности оксида циркония играет важную роль с точки зрения медицинского применения циркониевых имплантов. Поэтому нами были проведены исследования угла смачивания сформированных оксидных пленок. Для этого на очищенную поверхность свежесформированного оксида циркония наносилась капля воды и производилась фотофиксация ее формы вдоль направления поверхности. На рисунке 4 приведено характерное изображение капли воды на поверхности наноструктурированной пленки оксида циркония. Как видно из рисунка угол смачивания для поверхности пористого оксида циркония составляет 0° . Это означает, что для данного материала характерна супергидрофильная поверхность, увеличивающая его биосовместимость.

Помимо исследования смачиваемости поверхности, важным вопросом также является определение ее электрических свойств. С этой целью был проведен ряд экспериментов по измерению поверхностного потенциала после формирования пленок оксида циркония. Данный эксперимент проводился при помощи мультиметра DT9502 и раствора хлорида натрия. Исследование электродного потенциала на поверхности образцов после процесса анодирования показало наличие отрицательного электростатического заряда. Следует отметить, что для достижения величины электродного потенциала в диапазоне от $-0,2$ до $-0,3$ В, процесс электрохимического анодирования циркония в водном растворе хлорида натрия необходимо проводить не менее 5 минут.

В заключении следует отметить, что электрохимическое анодное окисление циркония в водном растворе хлорида натрия позволяет получать наноструктурированные пленки оксида циркония, имеющими кораллообразную структуру с минимальными размерами каркасных элементов до 50 нм. Пленки оксида циркония с развитой внутренней поверхностью открывают новые перспективы использования исследуемого материала как в электронных изделиях, так и в биомедицинских применениях [8; 9].

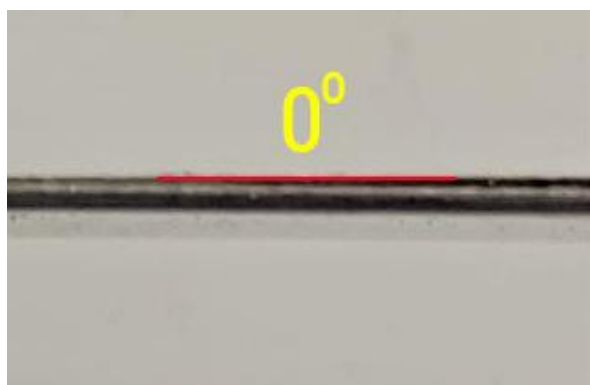


Рисунок 4 – Фотография капли воды на поверхности наноструктурированной плёнки оксида циркония

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. Биоактивные покрытия на основе оксидов титана и тантала для титановых имплантатов / С. И. Багаев [и др.] // 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 [et al.] // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2007. – Vol. 46, № 7. – P. 4390–4394.
5. Lazarouk, S. Porous and pillar structures formed by anodization for vertical alignment of nematic liquid crystal / S. Lazarouk [et al.] // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2007. – Vol. 46, № 10. – P. 6889–6892.
6. Jaguiro, P. Porous silicon avalanche LEDs and their application in optoelectronics and information displays / P. Jaguiro [et al.] // *Acta Physica Polonica A*. – 2007. – Vol. 112, № 5. – P. 1031–1036.
7. Lazarouk, S. K. Efficiency of Avalanche Light-Emitting Diodes Based on Porous Silicon / S. K. Lazarouk [et al.] // *Semiconductors*. – 2005. – Vol. 39, № 1. – P. 136–138.
8. Лазарук, С. К. Оксидные пленки со встроенным электрическим зарядом для регулирования процессов гемостаза / С. К. Лазарук [и др.] // *Доклады Белорус. гос. ун-та ИР*. – 2025. – Т. 23, № 1. – С. 7–13.
9. Формирование наноструктурированных пленок оксида циркония электрохимическим анодированием и исследование их гидрофильных и коррозионностойких свойств / В. Н. Дударенко [и др.] // 60-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»: материалы науч. конф., Минск, 22–24 апр. 2024 г. / редкол.: В. Р. Стемпицкий [и др.]. – Минск : БГУИР, 2024. – С. 42–45.

Zirconium oxide is widely used in electronics, medicine, automobile industry, power engineering and many other areas of human activity. The formation of zirconium oxide by electrochemical anodization of zirconium foil and thin films in various electrolytes was studied. It was found that the choice of electrolyte for the anodic process affects the structure of the oxide films formed. Analysis of the structure of the obtained zirconium oxide films using a scanning electron microscope showed that anodization of zirconium in aqueous solutions of citric acid results in the formation of a barrier (non-porous) oxide film, while in aqueous solutions of sodium chloride a nanostructured porous oxide film is formed, having a coral-like structure with minimum dimensions of the oxide «skeleton» of about 50 nm. The study of the properties of the formed nanostructured zirconium oxide films showed that they are characterized by a superhydrophilic surface (wetting angle is 0°) and the presence of a negative electret charge. Zirconium oxide films with a developed internal surface open up new prospects for its use both in electronic products and in biomedical applications.

Дударенко Виктория Николаевна, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, v. dudarenko@bsuir.by.

Научный руководитель – *Лешок Андрей Александрович*, кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, leshok@bsuir.by.

УДК 539.26

А. Л. СТАРЦЕВА, М. А. ПАШКЕВИЧ, Д. В. НИКОНЧИК

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ Ti-Si-Al-N

Для повышения адгезионной прочности и ударной вязкости покрытия TiAlSiN на поверхность титана было нанесено композитное покрытие TiAlSiN с градиентным изменением содержания Ti и Al с использованием технологии вакуумно-дугового напыления. Были исследованы комплексные свойства градиентных покрытий TiAlSiN с точки зрения микроструктуры, механических свойств и адгезии методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), FIB-SEM (фокусированный ионный пучок). Измерения твердости проводились с помощью наноиндентора.

Покрытия Ti-Si-Al-N начали широко применяться из-за возможности получения системы, в которой могут сочетаться уникальные свойства покрытий Ti-Si-N и Ti-Al-N. Идеей сочетания двух покрытий служит получение структуры нанокompозита как у Ti-Si-N, у которого нанозерна будут укреплены за счет формирования твердого раствора TiAlN. Такие покрытия Ti-Si-Al-N имели лучшие механические свойства [1–6], коррозионную [6] и окислительную стойкость [7; 8]. Однако в связи с возникающими высокими макронапряжениями ухудшается и адгезия покрытия [5]. Решением данной проблемы стали градиентные покрытия, которые позволяют сохранять структуру TiAlSiN, при этом показывая лучшую адгезионную прочность и меньшие макронапряжения [9].

Образцы Ti-Si-Al-N были нанесены на титановую подложку методом вакуумно-дугового напыления. Используемые мишени представлены в таблице 1.

На рисунке 1 представлены рентгенограммы покрытий тестов 1–4. Для всех покрытий формируется двухфазная система с основной фазой с – (Ti, Al)N и дополнительной Ti_2N , обусловленной особенностями нанесения многослойной структуры. На рентгенограммах не было замечено пиков Si, что говорит о возможности существования его в аморфной фазе Si_3N_4 либо в твердом растворе замещения. Все покрытия показывают предпочтительную ориентацию TiN(200).

Таблица 1 – Элементный состав покрытий TiSiAlN, измеренный методом PCMA

№ теста / катод	Элементный состав, ат. %				Отношение концентраций C_{Ti+Al} / C_{Si}
	N	Al	Si	Ti	
Test1 / Ti45Al45Si10	53.4	19.1	2.3	24.2	19.1
Test2 / Ti45Al45Si10	53.0	11.1	3.9	25.8	11.1
Test3 / Ti60Al30Si10	53.4	6.0	6.7	34.0	6.0
Test4 / Ti70Al20Si10	54.7	12.3	3.4	30.3	12.3

Ни у одного покрытия не было замечено предпочтительной ориентации TiN(111), которая наблюдалась в других работах у покрытий с малым содержанием кремния [1; 2]. Наблюдение данной фазы объясняется формированием аморфной фазы или нанокристаллов, однако по расчётам параметр решетки твердого раствора постоянно увеличивается с увеличением количества кремния. Данный процесс можно соотнести с процессом сегрегации Si и Al на границы зерен TiN или же TiAlN [10], наблюдаемый при высоком содержании кремния.

На рисунке 2 представлены поперечные сечения покрытий. Покрытия тестов 1, 2 и 4 (рисунк 2а; 2б; 2г) имеют столбчатую морфологию с выраженными границами. У теста 3 (рисунк 2в) данные границы размыты. Покрытия тестов 1–4 структурно отличаются в следующем: покрытия, которые имеют содержание Si до 6 ат. %, имеют структуру твердого раствора замещения с Si на местах Ti в (Ti, Si)N.

На рисунке 3 представлены зависимости твердости, модуля Юнга и макронапряжения от отношения содержания Ti в покрытии к содержанию Al. Макронапряжения в образцах имеют сжимающий характер.

Наибольшую твердость в 47,5 GPa показал тест 1, имеющий наименьшее количество Si и наибольшее Al в покрытии. Это покрытие также имеет наибольший уровень макронапряжений в – 3,11 GPa и модуль Юнга в 397,6 GPa. Характерной чертой наноконпозиционной структуры является соответствие твердости и макронапряжений в покрытии [10]. Наблюдаемые отличия на рисунке 3 показывают либо различие структур покрытий, либо отсутствие наноконпозиционной структуры.

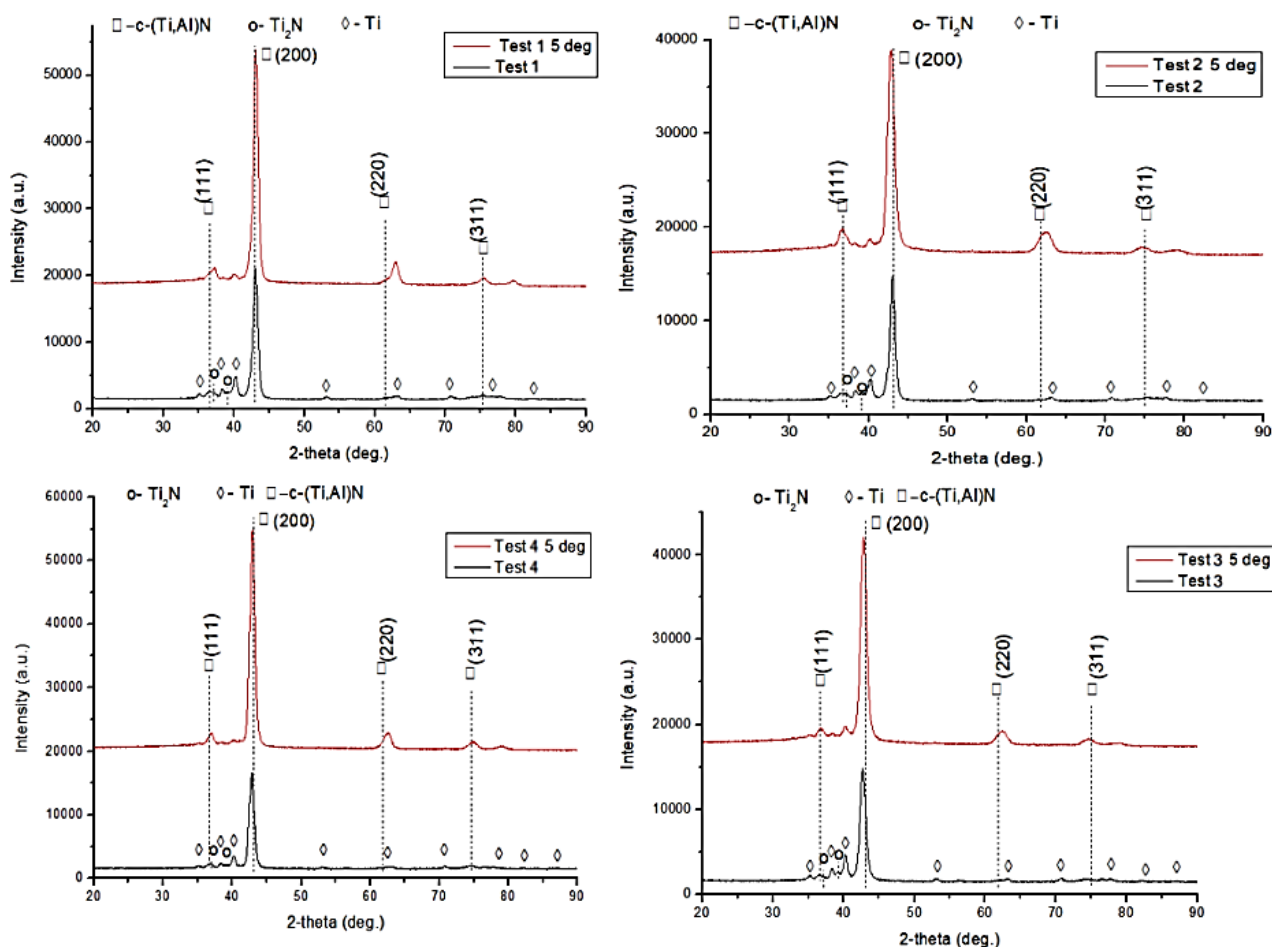
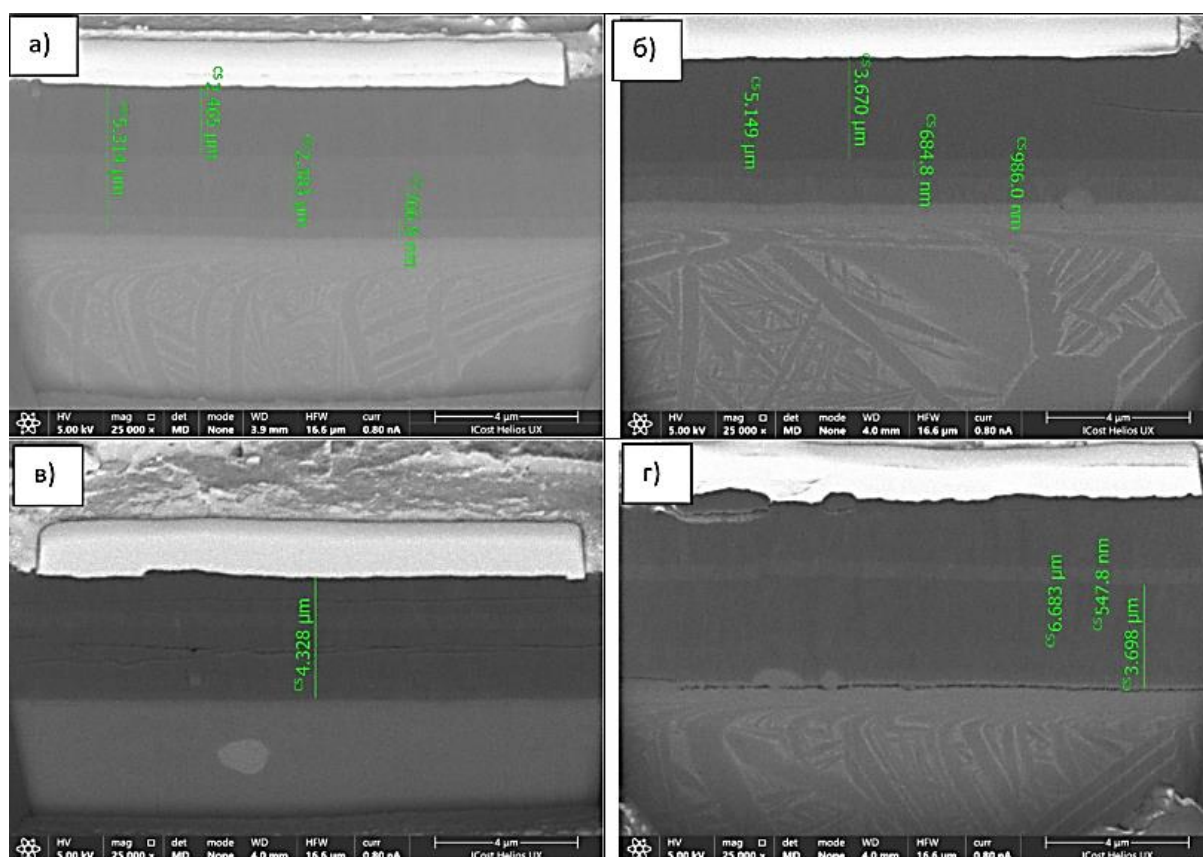


Рисунок 1 – Рентгенограммы покрытий TiSiAlN



а) теста 1; б) теста 2; в) теста 3; г) теста 4

Рисунок 2 – Поперечное сечение покрытий TiSiAlN (FIB-SEM)

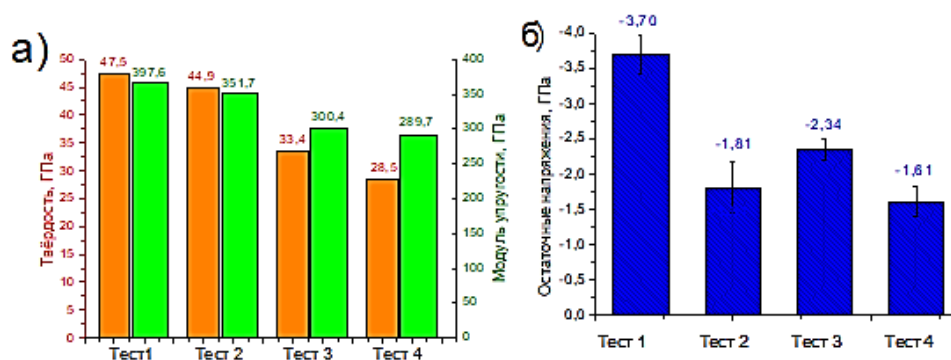


Рисунок 3 – Зависимость: а) твёрдости, модуля упругости; б) остаточных напряжений от соотношения Si/(Ti+ Si+ Al) покрытий TiSiAlN

Было проведено исследование градиентной структуры покрытий TiSiAlN на стальной подложке (рисунок 4) методом скользящего пучка при 1,2° и 5°. В связи с многослойной структурой покрытий произведены съемки фазового состава при съемке Брегга-Брентано в скользящей геометрии с углами фиксирования от 1° до 6°. Производился расчет глубины (h) по формуле:

$$h = \frac{K_x}{\mu} \frac{1}{\frac{1}{\sin \alpha} + \frac{1}{\sin(2\theta - \alpha)}},$$

где α – фиксированный угол, K_x – постоянная прибора ($K_x = 3$), μ – линейный удельный коэффициент поглощения, θ – угол, соответствующий центру пика на полученной рентгенограмме.

Однако в дальнейших исследованиях покрытия на титановой подложке показали лучшую коррозионную стойкость.

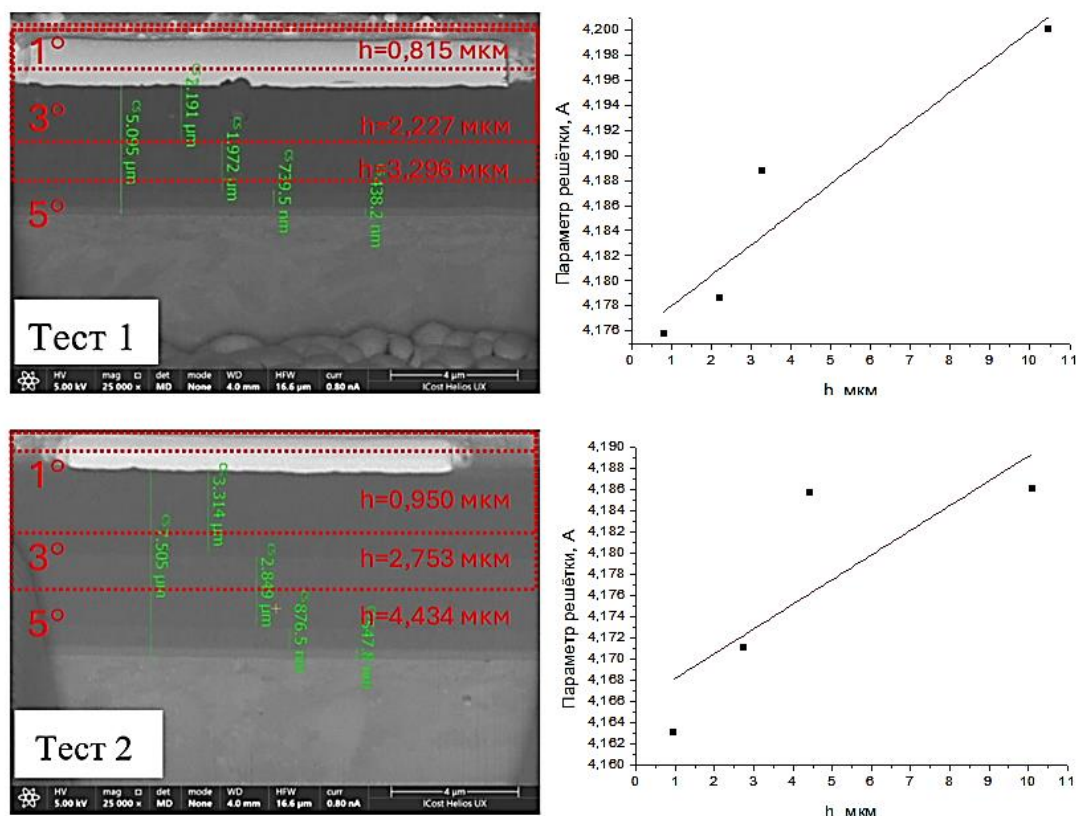


Рисунок 4 – Градиентная структура и изменение параметров решётки с – (Ti, Al)N покрытий TiSiAlN по глубине

Таким образом, градиентная структура покрытий Ti-Si-Al-N обеспечивает хорошую адгезию к поверхности подложки, сохраняя при этом твердость, что обеспечивает их высокие механические свойства.

Список литературы

1. PVD grown (Ti,Si,Al)N nanocomposite coatings and (Ti,Al)N/(Ti,Si)N multilayers: structural and mechanical properties / S. Carvalho [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 172. – P. 109–116.
2. Deposition and mechanical evaluation of superhard Ti–Al–Si–N nanocomposite films by a hybrid coating system / I. W. Park [et al.] // Thin Solid Films. – 2004. – Vol. 447–448. – P. 495–500.
3. Microstructure and properties of TiAlSiN coatings prepared by hybrid PVD technology / D. Yu [et al.] // Thin Solid Films. – 2009. – Vol. 517. – P. 4950–4955.
4. Effect of 10% Si addition on cathodic arc evaporated TiAlSiN coatings / L. H. Zhu [et al.] // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2016. – Vol. 26. – P. 1638–1646.
5. Microstructure and mechanical properties of arc evaporated Ti(Al,Si)N coatings / Y. Moritz [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2021. – Vol. 421. – P. 127461.
6. Microstructure, corrosion and tribological behaviors of TiAlSiN coatings deposited by cathodic arc plasma deposition / C. L. Chang [et al.] // Thin Solid Films. – 2009. – Vol. 517. – P. 5231–5236.
7. Oxidation behavior of the compound Ti–Al–Si–N/1Cr11Ni2W2MoV at 800 °C for 1000 h in air / C. J. Feng [et al.] // Surface & Coatings Technology. – 2013. – Vol. 232. – P. 88–95.
8. Influence of annealing temperature on microstructure evolution of TiAlSiN coating and its tribological behavior against Ti6Al4V alloys / D. Hong [et al.] // Ceramics International. – 2020. – Vol. 47. – P. 3789–3796.
9. Effect of TiAlSiN gradient structure design on mechanical properties and microstructure of coatings / L. G. Ji [et al.] // Surface & Coatings Technology. – 2025. – Vol. 496. – P. 131617.
10. Structure and properties of Ti–Si–N films prepared by ICP assisted magnetron sputtering / M. Mori [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2005. – Vol. 193. – P. 345–349.

In this work, to increase the adhesive strength and impact strength of the TiAlSiN coating, a TiAlSiN composite coating with a gradient change in the Ti and Al content was applied to the titanium surface using vacuum arc spraying technology. The complex

properties of TiAlSiN gradient coatings in terms of microstructure, mechanical properties, and adhesion were studied using scanning electron microscopy (SEM), X-ray spectral microanalysis (XMA), and FIB-SEM (focused ion beam). Hardness measurements were carried out using a nanoindenter.

Старцева Александра Леонидовна, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, StartsevaAlexandra@mail.ru.

Пашкевич Михаил Андреевич, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, misgrpashgr@gmail.com.

Никончик Дмитрий Витальевич, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Углов Владимир Васильевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, uglov@bsu.by.

УДК 577.1,539.2,621.315

Л. П. ТОМАШЕВИЧ, А. В. ШЕВЕРДЕНКО, Г. Д. АРТЮШКЕВИЧ, В. В. ДУДИЧ

ФОРМИРОВАНИЕ ТРУБЧАТОГО ПОРИСТОГО ОКСИДА ТИТАНА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ АНОДИРОВАНИЕМ В ХЛОРСОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ

Оксид титана используется при фотокатализе, а также при изготовлении различных электронно-оптических устройств. Исследовано формирование методом локального электрохимического анодирования анодного оксида титана с трубчатой структурой в хлорсодержащем электролите. Анализ данной структуры с помощью растрового электронного микроскопа показал, что она состоит из трубок диаметром от 30 нм до 50 нм. Исследование состава формируемых пленок при помощи энергодисперсионного рентгеноспектрального анализа показало, что анодные пленки состоят из оксида титана с примесью атомов углерода, натрия и хлора. Данные покрытия могут широко применяться в производстве антиотражающих и фотокаталитических покрытий для различных электронных и биомедицинских изделий.

Титан является одним из самых привлекательных материалов для широкого спектра применений благодаря следующим свойствам:

- 1) на 40 % легче стали, из-за чего является идеальным для изготовления легких конструкций;
- 2) не реагирует с большинством химических веществ, что дает ему преимущество при использовании в условиях, где необходима высокая устойчивость к коррозии;
- 3) имеет высокую прочность на растяжение и стойкость к различным типам коррозии, что делает его надежным и долговечным материалом.

Трубчатый оксид титана, формируемый электрохимическим анодным окислением титана, интенсивно исследуется последние годы из-за широких возможностей его применения при фотокатализе [1], в биомедицине [2], в качестве формозадающих матриц при синтезе композитных наноструктурированных материалов [3–6], в электронно-оптических приборах [7]. Особое внимание уделяется изучению механизма формирования трубчатого оксида титана в процессе анодного окисления, поскольку это позволяет создавать наноструктуры с заданными размерами и свойствами [8–9].

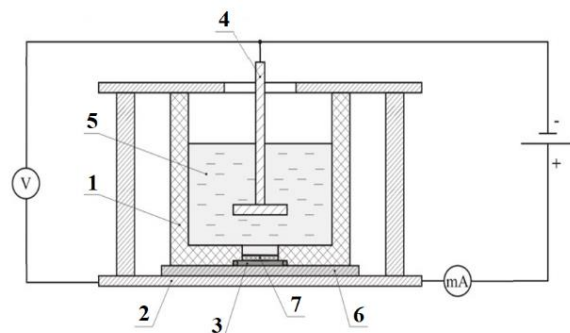
В качестве исходных образцов для получения наноструктурированных пористых анодных пленок оксида титана использовали фольгу технического титана (99,5 %) толщиной 100 мкм и пленки титана, осажденные при магнетронном распылении титановой мишени на кремниевые подложки. Толщина осажденных пленок составила 200–240 нм.

Поверхность экспериментальных образцов была обезжирена и промыта дистиллированной водой. Формирование пленок анодного оксида титана проводили в двухэлектродной электрохимической ячейке в гальваностатическом режиме при плотности тока в диапазоне 20–200 мА/см². В качестве электролита использовали 0,1 % и 1 % водный раствор хлорида натрия. Температуру электролита в процессе анодирования поддерживали постоянной 20 °С.

На рисунке 1 представлены схематические изображения установок, с помощью которых проводили процесс локального электрохимического анодирования титановой фольги и пленок. Преимуществом локального анодирования является эффективный теплоотвод выделяемого тепла [10–12]. Время проведения процесса составило 30 минут.

В процессе анодирования регистрировали изменение напряжения и тока во времени при помощи цифровых мультиметров MastechMS8250D. Экспериментально установлено, что формирование трубчатой структуры оксида титана имеет место при плотности тока более 5 мА/см², напряжении формовки более 14 В. Вольт-временные и ампер-временные характеристики данного процесса представлены на рисунке 2. Структуру сформированных анодных пленок исследовали с помощью растрового электронного микроскопа.

На рисунке 3 представлены фотографии полученных структур, сделанные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). Анализ полученных снимков показал, что образцы имеют трубчатую структуру. Диаметр трубок варьируется от 30 нм до 50 нм.



1 – фторопластовый цилиндр; 2 – алюминиевый контакт-держатель; 3 – резиновый уплотнитель; 4 – титановый катод; 5 – электролит; 6 – титановая фольга; 7 – формируемый оксид титана

Рисунок 1 – Схематическое изображение установок для проведения экспериментов локального электрохимического анодирования фольги (а) и проволоки (б)

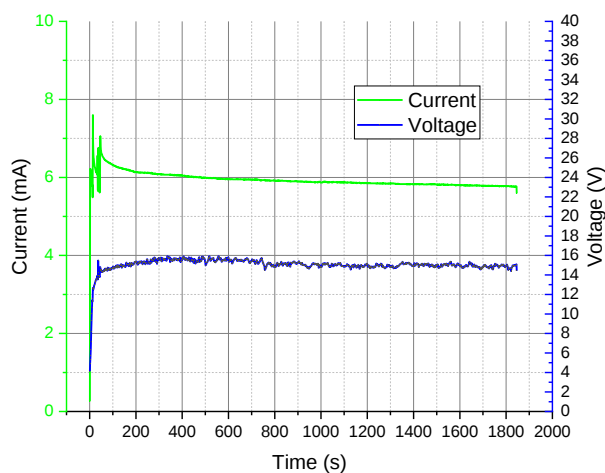
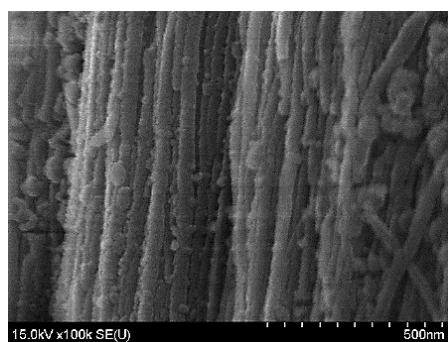
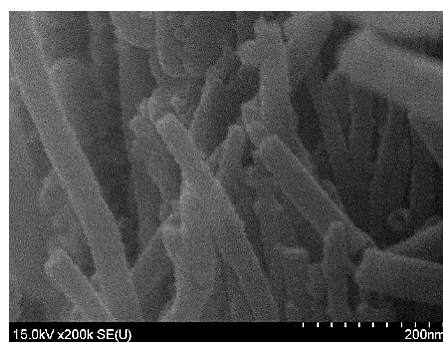


Рисунок 2 – Вольт-временные и ампер-временные характеристики



а)



б)

Рисунок 3 – РЭМ фотографии образцов трубчатого пористого оксида титана, полученных методом локального электрохимического анодирования при плотности тока 20 мА/см² (а) и 100 мА/см² (б)

Также данные образцы были исследованы с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX), результаты которой представлены на рисунке 4.

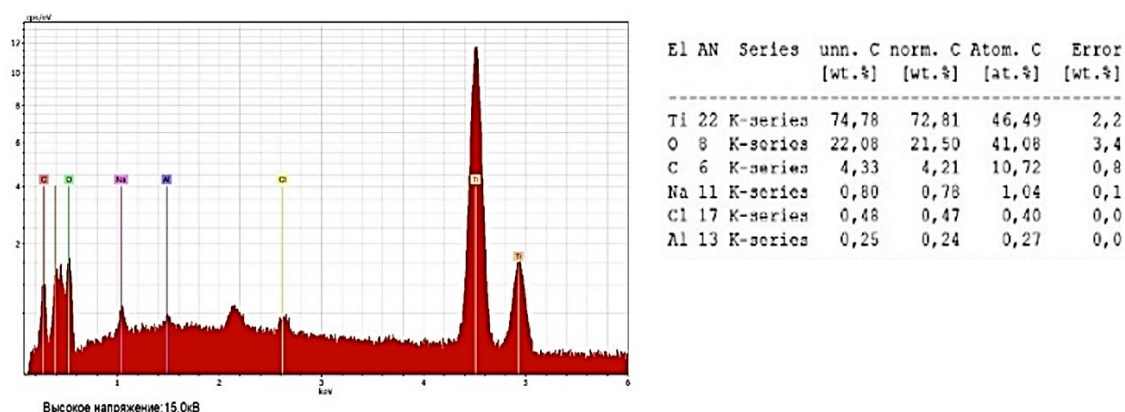


Рисунок 4 – EDX-анализ полученных образцов

Из рисунка 4 видно, что в результате был получен оксид титана нестехиометрического состава с примесью атомов углерода, а также натрия и хлора из электролита.

Исследование электретных свойств анодных пленок показало, сразу после окончания анодирования пленки имеют положительный электрический потенциал равный примерно 250 мВ относительно контрольных металлических электродов. Далее с течением времени наблюдается постепенное изменение этого потенциала с переходом в отрицательную область [2].

Таким образом, в результате исследования было установлено, что в хлорсодержащем электролите возможно получать пленки трубчатого оксида титана. Анализ данных пленок показал, что они имеют высокоразвитую поверхность, что позволяет использовать их в качестве антиотражающих и фотокаталитических покрытий [13; 14].

Список литературы

1. Photocatalytic properties of nanostructured titanium dioxide / O. V. Kupreeva [et al.] // Journal of Applied Spectroscopy. – 2013. – Vol. 79, № 6. – P. 1010–1013.
2. Oxide films with built-in electric charge for regulation of hemostasis processes / S. K. Lazarouk [et al.] // Doklady BGUIR. – 2025. – Vol. 23, № 1. – P. 7–13.
3. Influence of interfacial magnetic ordering and field-cooling effect on perpendicular exchange bias and magnetoresistance in nanoporous IrMn/[Co/Pd] films / W. Wu [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2020. – Vol. 127. – P. 1–15.
4. Structure and magnetic properties of Co/Pd multilayers prepared on porous nanotubular TiO₂ substrate / A. Maximenko [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2017. – Vol. 434. – P. 157–163.
5. Enhanced perpendicular exchange bias in Co/Pd antidot arrays / T. N. Anh Nguyen [et al.] // Journal of Electronic Materials. – 2019. – Vol. 48, № 3. – P. 1492–1497.
6. Effect of the morphology on the mechanisms of the magnetization reversal of multilayered thin Co/Pd films / J. V. Kasiuk [et al.] // Physics of the Solid State. – 2016. – Vol. 58. – P. 2312–2319.
7. Anodic nanoporous titania for electro-optical devices / S. Lazarouk [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 46, № 7A. – P. 4390–4394.
8. Effect of the electrolyte temperature on the formation and structure of porous anodic titania film / S. K. Lazarouk [et al.] // Thin Solid Films. – 2012. – Vol. 526. – P. 41–46.
9. Mechanism of anodic growth of tubular titania / S. K. Lazarouk [et al.] // Technical Physics. – 2020. – Vol. 65. – P. 715–722.
10. High field porous anodization of aluminium films with a photolithographic mask / S. K. Lazarouk // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. – 2013. – P. 355–358.
11. Formation of alumina nanotubes and jet effect during high-voltage local anodization of aluminum / S. K. Lazarouk [et al.] // Advanced Engineering Materials. – 2022. – Vol. 24, № 1. – P. 2100691.
12. Visible electroluminescence from Al-porous silicon reverse bias diodes formed on the base of degenerate n-type silicon / S. Lazarouk [et al.] // MRS Online Proceedings Library Archive. – 1994. – Vol. 358. – P. 659–664.
13. Fabrication of double-walled titania nanotubes and their photocatalytic activity / K. Liang [et al.] // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2014. – Vol. 2. – P. 991–995.
14. Porous and pillar structures formed by anodization for vertical alignment of nematic liquid crystal / S. Lazarouk [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 46 (10R). – P. 6889.

Titanium oxide is used in photocatalysis, as well as in the manufacture of various electron-optical devices. The formation of anodic titanium oxide with a tubular structure in a chlorine-containing electrolyte by local electrochemical anodization was studied. Analysis of this structure using a scanning electron microscope showed that it consists of tubes with a diameter of 30 nm to 50 nm. A study of the composition of the formed films using energy-dispersive X-ray spectral analysis showed that the anodic films consist

of titanium oxide with an admixture of carbon, sodium and chlorine atoms. These coatings can be widely used in the production of antireflective and photocatalytic coatings for various electronic and biomedical products.

Томашевич Леонид Павлович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, lenya.tomashevich.forps@mail.ru.

Шевурденко Алексей Викторович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, 375257699525@inbox.ru.

Артюшкевич Глеб Дмитриевич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, glebarf61@gmail.com.

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

Научный руководитель – *Лазарук Сергей Константинович*, доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, serg@nano.bsuir.edu.by.

УДК 535.333

Д. М. ЧУМАЧЕНКО

ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НОВОЙ ПРОИЗВОДНОЙ ТИОФЛАВИНА Т Th-C7 В РАСТВОРИТЕЛЯХ РАЗЛИЧНОЙ ПОЛЯРНОСТИ

Исследовано влияние полярности и вязкости растворителя на спектры поглощения и флуоресценции. При увеличении полярности растворителя спектр поглощения испытывает гипсохромный, а спектр флуоресценции – bathochромный сдвиг. Объяснение этому явлению дано на основе модели молекулярного ротора.

Флуоресцентные маркеры на основе молекулярных роторов представляют собой весьма интересный и перспективный путь исследования. Их особенностью является зависимость квантового выхода и длительности затухания флуоресценции от вязкости микроокружения. Молекулярные роторы, благодаря их уникальным свойствам, находят своё применение в биологии и медицине, материаловедение и др. [1]. Из-за широкой области применения исследования, направленные на изучение свойств новых красителей на основе молекулярных роторов, является актуальным.

В исследовании использовалась молекула красителя N-(3-карбоксипропил)-бензиндольного-монокарбостирала (Th-C7, рисунок 1). Спектры поглощения регистрировали с помощью спектрофотометра Specord M200 (Карл Цейсс, Германия); для исследования флуоресценции использовали спектрофлуориметр CM2203 (СОЛАР, РБ). В качестве растворителей использовались: вода, этанол, диоксан и глицерин. Все растворители были химически чистыми, без примесей. Математическая обработка результатов проводилась с использованием пакета Origin 6.0.

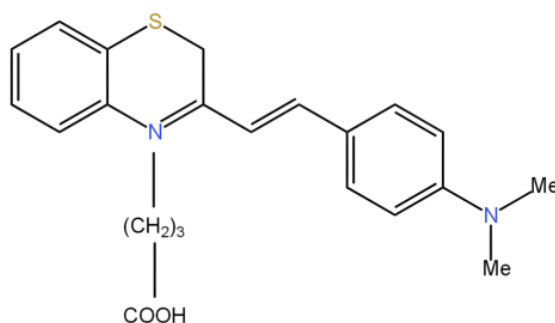


Рисунок 1 – Структурная формула соединения Th-C7

В проведенном исследовании изучена зависимость спектров поглощения и флуоресценции Th-C7 от полярности и вязкости растворителей. Как можно наблюдать на рисунок 2, при увеличении полярности растворителя наблюдается гипсохромный сдвиг спектра поглощения, составляющий 26 нм. Так, в малополярном растворителе, диоксане, максимум спектра поглощения красителя расположен на 540 нм, в то время как в полярном растворителе, воде – на 514 нм. Напротив, для флуоресценции характерен обратный эффект: увеличение полярности растворителя вызывает небольшой длинноволновый сдвиг спектра на ~11 нм. Спектральные изменения свидетельствуют о сильной реакции красителя на полярность растворителя. Наблюдаемые сдвиги спек-

тров поглощения и флуоресценции характерны для большинства красителей относящихся к классу молекулярных роторов [2].

Неравномерное распределение зарядов между аминобензольным и бензтиазоловым фрагментами молекулы Th-C7 приводит к образованию дипольного момента в основном состоянии. На спектральные свойства полярных молекул существенное влияние оказывает ориентационная релаксация, сопровождающаяся поворотом молекул хромофора и растворителя. Ориентационная релаксация происходит за время, много большее, чем время перехода из основного состояния в возбужденное. В результате этого стабилизация (уменьшение) энергии основного состояния S_0 в полярном растворителе является более значительной, чем возбужденного S_1 . Это приводит к тому, что энергия электронного перехода из состояния S_0 в S_1 увеличивается, а длина волны перехода уменьшается. Экспериментальным проявлением этого эффекта является коротковолновый сдвиг спектров поглощения красителя в полярных растворителях (рисунок 2).

Мы полагаем, что после поглощения кванта света молекулы Th-C7 переходят в неравновесное Франк-Кондоновское состояние, откуда после колебательной релаксации совершается переход в неравновесное локально-возбужденное (LE) состояние. Вероятность последующих переходов зависит от вязкости и полярности микроокружения, в котором находятся молекулы. Для большинства МР минимуму энергии в возбужденном состоянии соответствует скрученная конформация (TICTсостояние) [2], при которой ароматические фрагменты молекулы образуют двухгранный угол 90° . Поэтому одним из наиболее вероятных процессов, происходящих в возбужденном состоянии, является торсионная релаксация. Как правило, находясь в TICT состоянии, молекула не флуоресцирует [2]. В полярном растворителе торсионная релаксация сопровождается сольватной релаксацией. В результате этих процессов энергия возбужденного состояния уменьшается. Однако релаксация, а стало быть, и вязкость растворителя, мало влияет на положение спектра флуоресценции, поскольку излучение осуществляется из неравновесного Франк-Кондоновского состояния. Квантовый выход флуоресценции определяется соотношением констант скорости излучательного и безызлучательных переходов. Основным безызлучательным процессом является торсионная релаксация, поэтому в вязких растворителях, где торсионное вращение фрагментов молекул ограничено, квантовый выход значительно выше. Наши экспериментальные исследования подтверждают это: в водном растворе квантовый выход флуоресценции красителя составляет 0,01, а в глицерине – 0,23.

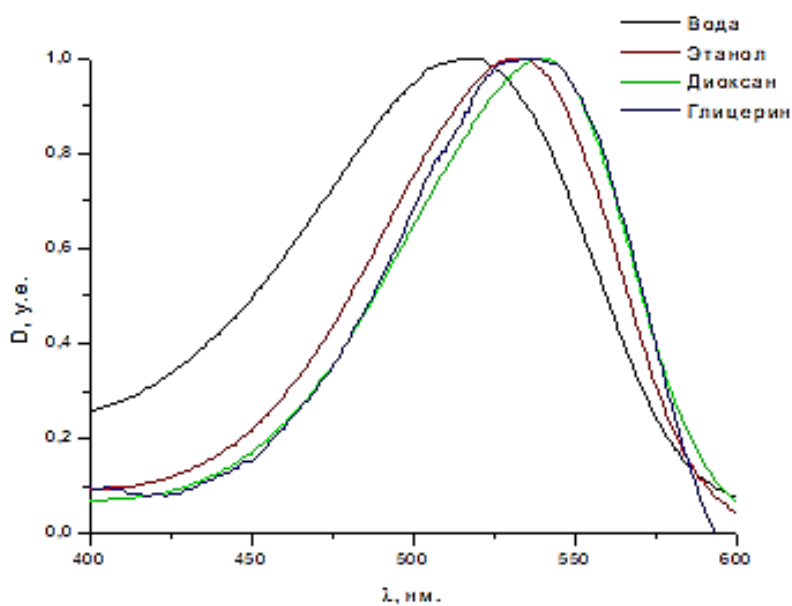


Рисунок 2 – Нормированные спектры поглощения красителя Th-C7 в различных растворителях

Проведенные исследования позволяют заключить, что соединение Th-C7 проявляет свойства молекулярного ротора и обладает хорошей чувствительностью к полярности (спектр поглощения) и вязкости (квантовый выход флуоресценции) растворителя. Это открывает широкие возможности для практического использования красителя.

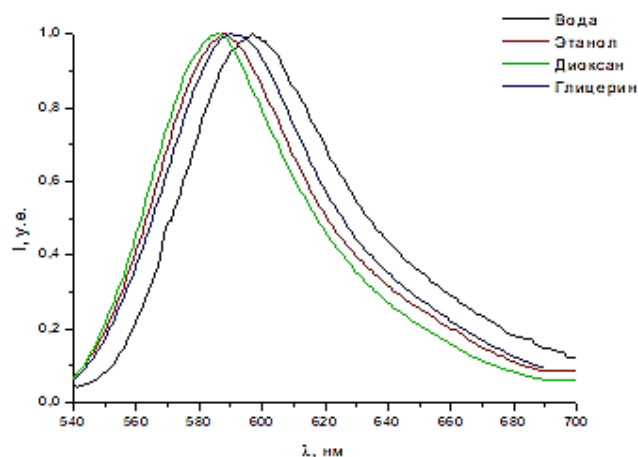


Рисунок 3 – Нормированные спектры флуоресценции Th-C7 в различных растворителях

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. – P. 1669–1678.
2. Маскевич, А. А. Флуоресцентные свойства анионного производного тиюфлавина Т / А. А. Маскевич // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2021. – № 2. – С. 4–14. – DOI: 10.33581/2520-2243-2021-2-4-14.

In this paper, the effect of solvent polarity and viscosity on absorption and fluorescence spectra is investigated. With increasing solvent polarity, the absorption spectrum undergoes a hypsochromic shift, and the fluorescence spectrum undergoes a bathochromic shift. This phenomenon is explained based on the molecular rotor model.

Чумаченко Даниил Михайлович, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, 25122011den@mail.ru.

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

УДК 621.793.184

Е. В. ШЕВЧИК, Е. Г. КУРБАКО

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА РАБОЧЕГО ГАЗА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Исследовано влияние парциального давления фреона на характеристики фторуглеродных покрытий, синтезированных прямым осаждением из ионных пучков. Установлено, что увеличение парциального давления фреона практически не влияло на величину оптического пропускания, способствовало увеличению ширины запрещенной зоны и износостойкости покрытий.

Фторуглеродные тонкопленочные покрытия широко применяются в качестве low – k диэлектриков, оптических, гидрофобных, антифрикционных, биосовместимых, антимикробных, защитных, химически стойких покрытий и т. п. [1]. Для синтеза фторуглеродных покрытий наиболее часто применяются ВЧ плазмохимическое осаждение, индуктивно-связанная плазма, импульсная плазма высокой плотности, в которых используются плазменные разряды в углерод- и фторсодержащих газах [2]. На характеристики покрытий определяющее влияние оказывают состав рабочей газовой смеси, мощность плазменного разряда, величина смещения на подложке, температура подложки и т. п. Методы, основанные на нанесении тонкопленочных покрытий из ионных пучков, позволяют изменять свойства пленок посредством регулирования энергии ионов, плотности ионного потока и его состава [3].

В данной работе будет исследовано влияние парциального давления фреона в рабочем газе на характеристики фторуглеродных тонкопленочных слоев.

Формирование фторуглеродных покрытий проводили на модернизированной установке вакуумного напыления ВУ – 1А, оснащенной ионным источником на основе ТХУ. Остаточный вакуум не превышал значений $(4-5) \cdot 10^{-3}$ Па. Рабочее давление смеси метана и фреона составляло $2,6 \cdot 10^{-1}$ Па. Ток разряда составлял 2 А, напряжение на аноде при этом составляло 78–80 В. Расстояние «ионный источник – подложкодержатель» составляло 125 мм. Покрытия наносились на подложки из кремния и стекла. Температура подложек составляла 400–450 К. Измерение оптического пропускания покрытий, нанесенных на подложки из стекла, осуществлялось в диапазоне 380–1080 нм. На рисунке 1, а приведена зависимость пропускания покрытий на $\lambda = 555$ нм, полученных при различных парциальных давлениях фреона. Установлено, что увеличение парциального давления фреона практически не влияло на величину пропускания, которое составляло 81–83 %. Следует отметить высокую прозрачность покрытий даже при низком содержании фреона в рабочем газе и относительно невысокой температуре подложки, что связано с высокой степенью химического взаимодействия между углеродом и фтором.

На рисунке 1, б приведена зависимость ширины запрещенной зоны E_g от парциального давления фреона. E_g увеличилась с 2,36 до 2,8 эВ при давлении последнего $1 \cdot 10^{-1}$ Па, что также свидетельствует о стимулировании химического взаимодействия между углеродом и фтором.

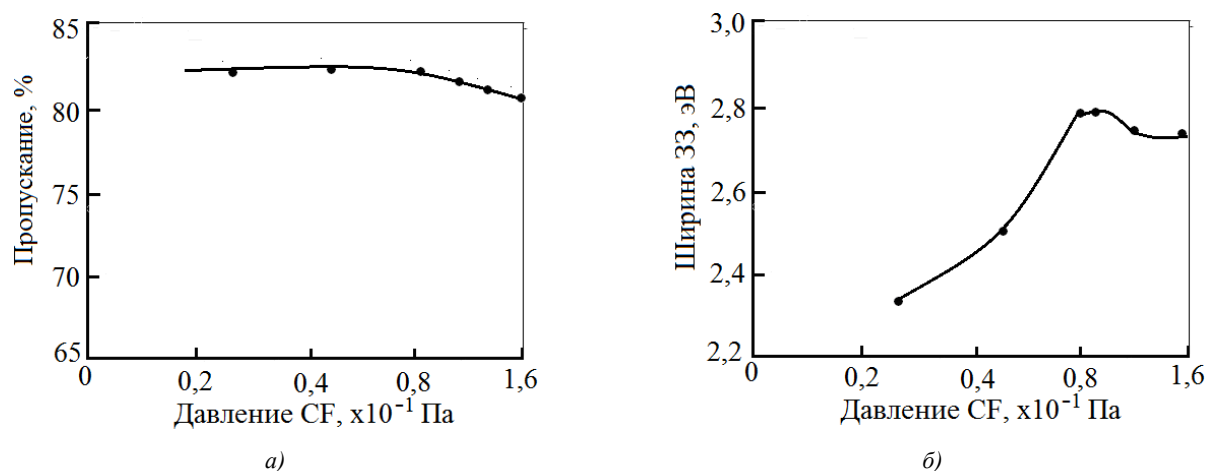


Рисунок 1 – Зависимость пропускания (а) и ширины запрещённой зоны (б) покрытий, полученных при различных парциальных давлениях фреона

Для измерения электрофизических параметров применяли МДП структуры. Измерения проводили на частоте 1 МГц. Установлено, что значение диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ неоднозначно зависело от давления фторсодержащего газа (таблица 1). Также наблюдалось увеличение удельного объемного сопротивления ρ_v до давления фреона $7,98 \cdot 10^{-2}$ Па. Дальнейший рост содержания фреона в рабочем газе привел к резкому снижению ρ_v .

Таблица 1 – Результаты измерений электрофизических и механических характеристик фторуглеродных покрытий

№ обр.	Давление CF, Па	ϵ	$\text{tg}\delta$	ρ_v , Ом·м	k
1	$2,66 \cdot 10^{-2}$	2,6	0,22	$3,0 \cdot 10^4$	0,9
2	$5,32 \cdot 10^{-2}$	3,3	0,18	$2,9 \cdot 10^4$	-
3	$7,98 \cdot 10^{-2}$	1,76	0,14	$6,7 \cdot 10^4$	0,8
4	$1,06 \cdot 10^{-1}$	4,5	0,14	$3,3 \cdot 10^4$	0,8
5	$1,33 \cdot 10^{-1}$	3,2	0,25	$2,0 \cdot 10^4$	0,8
6	$1,59 \cdot 10^{-1}$	2,8	0,52	$1,2 \cdot 10^4$	0,7

Коэффициент трения покрытий измерялся с помощью трибометра МТ-25 возвратно-поступательного типа. Нагрузка на индентор составляла 50 мН. Типичная трибограмма приведена на рисунке 2а. Покрытия обладали низкой износостойкостью, что можно объяснить невысокой температурой конденсации.

Угол смачивания θ поверхности фторуглеродного покрытия дистиллированной водой измерялся с применением гониометра ЛК-1. Зависимость θ от парциального давления фреона носила сложный характер (рисунок 2б). Максимальный угол смачивания 75° наблюдался при давлении фреона $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па.

Таким образом, проведенные исследования позволили определить оптимальный состав рабочего газа при синтезе фторуглеродных покрытий.

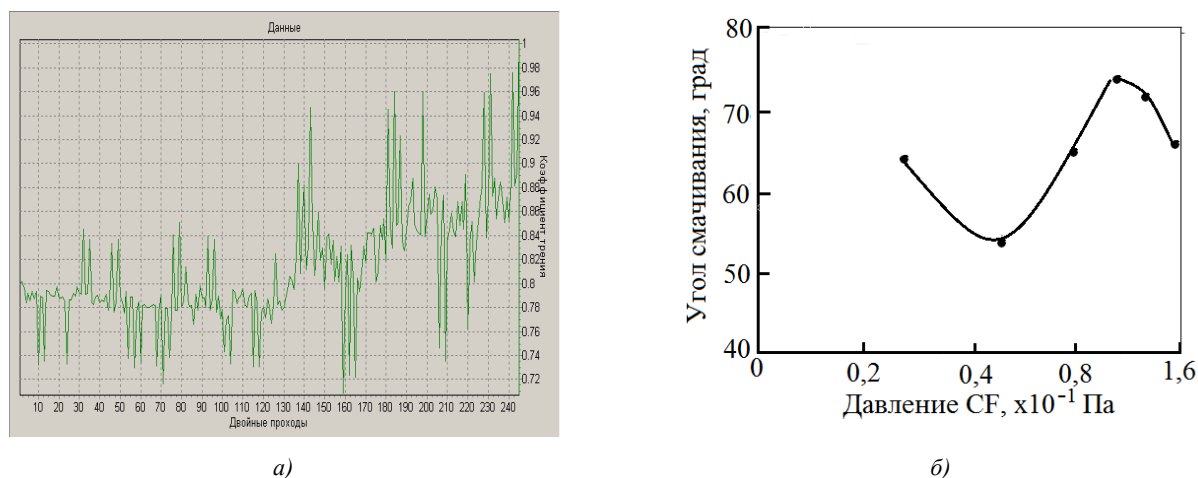


Рисунок 2 – Типичная трибограмма фторуглеродного покрытия (а) и зависимость угла смачивания от парциального давления фреона (б)

Список литературы

1. Лучников, А. П. Микроструктура и электрофизические свойства фторполимерных пленок для МЭМС и наноэлектроники / А. П. Лучников, П. А. Лучников, А. С. Сигов // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 12 (89). – С. 34–40.
2. Jacobsohn, L. G. Film growth and relationship between microstructure and mechanical properties of a – C: H: F films deposited by. PECVD / L. G. Jacobsohn, D. F. Franceschini // Diamond and Related Materials. – 2001. – № 10 (2). – P. 125–131.
3. Телеш, Е. В. Формирование оптических покрытий прямым осаждением из ионных пучков / Е. В. Телеш, Н. К. Касинский // Контент. – 2014. – Т. 1, № 2. – С. 27–30.

The influence of freon partial pressure on the characteristics of fluorocarbon coatings synthesized by direct deposition from ion beams was studied. It was found that an increase in freon partial pressure had virtually no effect on the optical transmission value, and contributed to an increase in the band gap width and wear resistance of the coatings.

Шевчик Елизавета Витальевна, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, elizaveta17oldego@gmail.com.

Курбако Егор Григорьевич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, kurbakoe@list.ru.

Научный руководитель – *Телеш Евгений Владимирович*, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, eteles@bsuir.by.

УДК 535.8

Д. И. ШТЫРЁВ, Е. А. МЕЛЬНИКОВА

ОБЪЁМНАЯ ПРОПУСКАЮЩАЯ ВОРТЕКС-ГОЛОГРАММА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗОВЫХ СИНГУЛЯРНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ

Оптимизированы условия и записана эффективная объемная пропускающая вихрекс-голограмма для формирования фазовых сингулярных световых пучков на голографической пластинке ПФГ-03 М. Элемент обладает высокой лучевой стойкостью, высокими значениями угловой и спектральной селективностей, что делает предложенную методику формирования сингулярных пучков перспективной для использования во многих приложениях современной фотоники.

В настоящее время большой научный и прикладной интерес привлекают поперечно структурированные световые лучи. Такие пучки характеризуются сложной топологией распределения амплитуды, фазы и/или поляризации. Среди многообразия пространственно-структурированных полей можно выделить оптические вихри-сингулярные световые пучки, которые переносят орбитальный угловой момент фотонов [1]. Эти световые пучки являются особенными за счёт своих необычайных свойств: наличие ядра (винтовой дислокации), в которой амплитуда обращается в нуль, а фаза является неопределенной величиной, а также винтовой структуры волнового фронта в окрестности этой дислокации. Вокруг ядра будет происходить «завихрение» энергетического потока, которое и позволяет, например, захватывать и манипулировать микрообъектами [2]. Такие пучки

нашли также применение в системах оптической связи, для эффективной лазерной обработки материалов, при зондировании атмосферы и т. д. [3; 4].

В настоящее время разработано множество способов создания таких пучков. Однако многие из них являются достаточно громоздкими, а также их практическое значение ограничено сравнительно высокой стоимостью для их применения в современной фотонике.

В 1990 году ученые Соскин и др. продемонстрировали, что если топология штрихов дифракционной решетки модифицирована таким образом, что в ней присутствует оптическая дислокация, то дифрагированный пучок содержит оптическую сингулярность [5]. Такие дифракционные элементы получили название разветвленной или вилочной решетки. Эта работа в настоящее время является классической и её принцип мы использовали при создании объемных голограмм. Несмотря на достигнутые результаты, задача поиска эффективных методов и сред для создания вихрево-голограмм предназначенных для формирования сингулярных оптических пучков остается актуальной.

В ходе работы была проведена оптимизация параметров записи объемной пропускающей амплитудной решетки, формирующей в первом порядке дифракции оптический вихрь. Запись голограммы проводилась по схеме Лейта – Упатниекса на голографической пластинке ПФГ-03М (АО «Компания Славич», Переславль-Залесский, Россия). Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

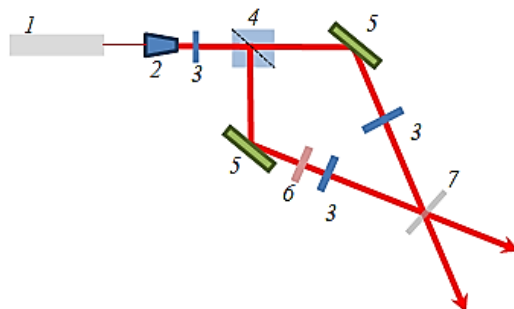


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Излучение He-Ne1 на длине волны генерации 633 нм проходило систему «микрообъектив-пинхол» 2 амплитудно делилось ($1/2$) делительным кубиком 4 на два плеча, лазерное излучение в которых при помощи зеркал 5 сводилось в плоскости фотопластинки 7. Помещенная в одно из плеч спиральная фазовая пластинка 6 формировала предметную волну в виде фазового сингулярного пучка с топологическим зарядом 4. Полуволновые пластинки 3 обеспечивали равенство мощности интерферирующих волн (мощность каждой порядка 12 мВт) и их вертикальную линейную поляризацию. Угол схождения пучков составлял 30 градусов. Параметр Клейна для данной геометрии записи $Q = 174$, что позволяет классифицировать голограмму как объемную дифракционную структуру.

На рисунке 2 представлены фотографии распределения интенсивностей в предметной волне (рисунок 2а) и опорной волне (рисунок 2б), зарегистрированные ПЗС-камерой. На рисунке 2в представлена фотография восстановленной предметной волны (дифракция первого порядка).

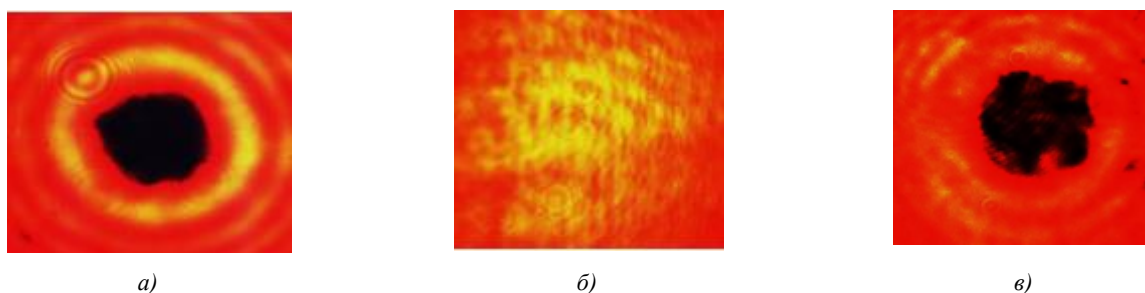


Рисунок 2 – Используемые для записи и восстановления световые пучки:

а – предметный сингулярный пучок с топологическим зарядом 4, б – опорная плоская волна, в – сингулярная волна, образованная при восстановлении голограммы

Проведенные эксперименты по оптимизации записи вихря позволили определить оптимальные параметры экспозиционной дозы, при которых была достигнута максимальная дифракционная эффективность 7 %.

На рисунке 3 представлены результаты интерференционного анализа фазовой топологии восстановленного сингулярного пучка, проведенного на основе схемы интерферометра Маха – Цандера. Анализ интерференционной структуры позволяет сделать вывод о сохранении топологии фазы оптического вихря, записанного на голограмме.

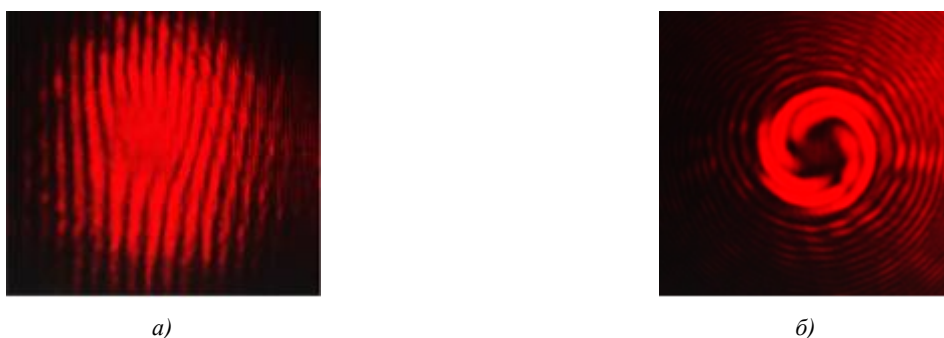


Рисунок 3 – Картины интерференции: *а* – интерференция вихря с плоской волной, *б* – интерференция вихря со сферической волной

Список литературы

1. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / Y. Shen [et al.] // *Light Sci Appl.* – 2019. – Vol. 8, № 90. – P. 1–29.
2. Using Optical Vortex To Control the Chirality of Twisted Metal Nanostructures / K. Toyoda [et al.] // *Nano Lett.* – 2012. – Vol. 12. – P. 3645–3649.
3. Terabit freespace data transmission employing orbital angular momentum multiplexing / J. Wang [et al.] // *Nat Photon.* – 2012. – Vol. 6. – P. 488–496.
4. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum / M. P. Lavery [et al.] // *Science.* – 2013. – Vol. 341. – P. 537–540.
5. 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.

The conditions are optimized and an effective volume transmitting vortex-hologram for the formation of phase singular light beams on the holographic plate PFG-03 M is written down. The element has a high beam resistance, high values of angular and spectral selectivity, which makes the proposed technique of singular beams formation perspective for use in many applications of modern photonics.

Штырëв Денис Игоревич, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, fiz.shtyrev@bsu.by.

Научный руководитель – *Мельникова Елена Александровна*, доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, Melnikova@bsu.by.

УДК 533.9.082.5;543.423;621.373.826

А. В. ЩУКО, Ю. А. ШЛОПАК, М. П. ПАТАПОВИЧ

ВОЗМОЖНОСТЬ ИЗУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ И ОТОБРАЖЕНИЯ НЕОБХОДИМЫХ ПАРАМЕТРОВ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Показана возможность проведения послойного анализа многокомпонентных сплавов методом лазерной многоканальной атомно-эмиссионной спектроскопии с помощью двухимпульсного атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1. Для наглядности отображения некоторых параметров дополнительно может применяться осциллограф серии GA 1000. Представлено краткое обсуждение полученных результатов.

Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия является одним из методов качественного, полуколичественного и количественного анализа различных объектов. Он основан на регистрации эмиссионных спектров плазмы, которая образована при абляции вещества при воздействии на них мощного лазерного излучения. Все особенности взаимодействия данного излучения с поверхностью исследуемых образцов определяется их проводящими свойствами. В частности, при изучении металлов и сплавов описать инициализацию плазмы можно с помощью модели свободных электронов, когда электроны проводимости, поглощая излучение, переходят в состояние с более высокой энергией. Затем они взаимодействуют с другими электронами, передавая им свою энергию [1; 2].

Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия является одним из методов качественного, полуколичественного и количественного анализа различных объектов. Он основан на регистрации эмиссионных спектров плазмы, которая образована при абляции вещества при воздействии на них мощного лазерного излучения. Все особенности взаимодействия данного излучения с поверхностью исследуемых образцов определяется их про-

водящими свойствами. В частности, при изучении металлов и сплавов описать инициализацию плазмы можно с помощью модели свободных электронов, когда электроны проводимости, поглощая излучение, переходят в состояние с более высокой энергией. Затем они взаимодействуют с другими электронами, передавая им свою энергию [1].

При взаимодействии лазерного излучения с металлической поверхностью применяются подходы, основанные на температурной релаксации и теплопроводности. Поглощение энергии лазерного импульса ионами кристаллической решетки не происходит из-за экранирования излучения свободными электронами. Для полупроводников и диэлектриков при воздействии лазерных импульсов имеет место образование пар электрон – дырка, обусловленное многофотонным поглощением. Что касается получения нанопорошков и возможности их получения при помощи лазерных импульсов, то здесь важную роль играет фазовый состав испаряемого вещества [1; 2].

С целью исследования атомно-эмиссионного спектра различных материалов двоекными импульсами, сдвинутыми друг относительно друга во времени, а также для создания аналитических методик качественного и количественного анализа элементного состава образцов, использовался лазерный двухимпульсный спектрометр LSS – 1. Источником возбуждения плазмы является двух импульсный неодимовый лазер с возможностью регулирования энергии накачки, временного интервала между импульсами, числом воздействующих лазерных импульсов и параметром расфокусировки. Данная установка может применяться и при проведении послойного анализа. Изменение параметров лазерного излучения осуществляется через программное обеспечение Laessspectrometer, которое дает возможность управлять параметрами лазера. Кроме того, имеется возможность проводить количественный анализ различных веществ, как в твердой, так и в жидкой фазе и сохранять зарегистрированные спектры в формате MSOfficeExcel для последующей обработки. При необходимости представить полученные результаты после соответствующей обработки можно также с помощью других программ [3].

При проведении данного эксперимента были первоначально определены рабочие условия: межимпульсный интервал этот интервал – 10 мкс, энергия импульсов – от 20 до 60 мДж, параметр расфокусировки – 0 мм. При этом размер сфокусированного пятна составил примерно 50 мкм. Для проведения корректного определения интенсивности спектральных линий исследуемых элементов были выбраны длины волн аналитических линий: для меди – Cu (510,953 нм); для железа – Fe (438,426 нм); для олова – Sn (452,560 нм). При необходимости параметры лазерного излучения можно изменять через программное обеспечение Laessspectrometer. В качестве примера, на рисунке 1, представлен внешний вид поверхности исследуемого образца после воздействия на него серии 30-ти двоекных лазерных импульсов, полученной на экране компьютера (а), а также фрагмент спектра, полученный при проведении послойного анализа металлического сплава (б).

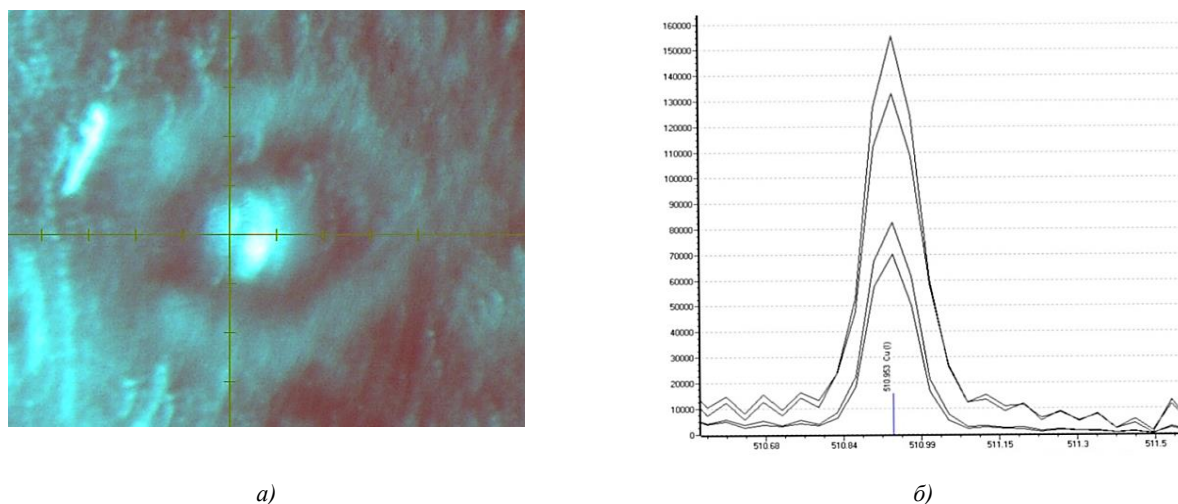


Рисунок 1 – Снимок поверхности исследуемого образца (а) и фрагмент спектра (б)

Из приведенных данных можно заключить о присутствии меди в приповерхностных слоях многокомпонентного сплава. Так как интенсивность линии уменьшается с увеличением номера последовательных двоекных лазерных импульсов, то в последующем можно говорить об уменьшении концентрации данного элемента в верхних слоях.

Для наглядности отображения изменения необходимых параметров дополнительно в помощь к основному оборудованию можно применять осциллограф, который используется для наблюдения за амплитудными и временными параметрами электрического сигнала, а также за их измерениями и записью, что актуально при по-

следующих исследованиях и сравнениях. В качестве примера, на рисунке 2 представлен внешний вид осциллографа серии GA 1000 с отображенным на дисплее реальным сигналом.



Рисунок 2 – Фотография осциллографа с полученным реальным сигналом

Таким образом, проведенные спектроскопические исследования лазерной плазмы оказываются информативными для определения интенсивности, а значит, и концентрации химических элементов в изучаемых многокомпонентных сплавах с целью изучения их послойного анализа. Использование качественного программного обеспечения может значительно ускорить и упростить данный процесс, что повышает ценность полученных результатов.

Список литературы

1. Атомно-эмиссионный многоканальный спектральный анализ: научное и практическое применение / Е. С. Воропай, [и др.] // Вестн. Бел. 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. Гулятьев, А. К. Проектирование и дизайн пользовательского интерфейса / А. К. Гулятьев, В. А. Машин. – СПб. : Корона-Принт, 2007. – 239 с.

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. For clarity of display of some parameters, an oscilloscope of the GA 1000 series can be additionally used. A brief discussion of the obtained results is presented.

Щуко Анастасия Владимировна, студент 2 курса факультета электросвязи Белорусской государственной академии связи.

Шлопак Юлия Алексеевна, студент 1 курса факультета электросвязи Белорусской государственной академии связи.

Научный руководитель – *Патапович Мария Петровна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физических и математических основ информатики факультета информатизации и технологии связи Белорусской государственной академии связи, г. Минск, Республика Беларусь, mpetrat@mail.ru

УДК 539.234

П. В. ШЕВЧИК, А. В. СТАНЧИК

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПЛЁНОК ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ⁴

Проведено исследование влияния длины волны лазерного излучения и температуры подложки на оптические свойства тонких пленок CdTe, формируемых методом импульсного лазерного осаждения. С помощью оптической спектроскопии установлено, что ширина запрещенной зоны тонких пленок CdTe, осажденных на стеклянные подложки, незначительно изменяется в диапазоне 1,45–1,51 эВ в зависимости от температуры подложки длины волны лазерного излучения.

Соединение CdTe является прямозонным полупроводником группы II–VI с оптической шириной запрещенной зоны в диапазоне 1,4–1,5 эВ и давно привлекает внимание исследователей для применения в различных оптоэлектронных устройствах [1]. Высокий коэффициент поглощения ($> 10^5 \text{ см}^{-1}$) и возможность *p*- или *n*-типа проводимости делают его очень перспективным материалом для солнечных элементов и фотодетекторов [1–3].

⁴Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект № T21APMG – 005) и ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии».

В последнее время актуальной задачей является создание эффективных координатно-чувствительных инфракрасных фотоприемников на основе гетеропереходов, которые позволяют проводить измерения координат, углов поворота, геометрических размеров и положения [2; 4]. Исследования показывают перспективную возможность использования пленок CdTe в качестве тонкого поверхностного слоя координатно-чувствительного фотоприемника. Поскольку за счет его малого коэффициента преломления ($n_{\text{CdTe}} = 3,1$) происходит уменьшение оптического потерна отражение [5]. В литературе представлено небольшое количество работ по синтезу пленок CdTe методом импульсного лазерного осаждения, который является успешной технологией в получении тонкопленочных материалов для оптических применений [6–10].

Поэтому целью данной работы является исследование влияния технологических параметров импульсного лазерного осаждения на оптические характеристики тонких пленок CdTe, полученных на стеклянных подложках.

Для напыления пленок CdTe на стеклянные подложки был использован метод импульсного лазерного осаждения [11]. Расстояние между мишенью и подложкой составляло 30 мм. В качестве источника энергии использовался лазер YAG:Nd³⁺ с длиной волны излучения 600, 1064 и 1200 нм. Интенсивность излучения на мишень CdTe составляла около 2×10^8 Вт/см². Длительность и энергия одного импульса во всех случаях составляла 30 нс и 0,35 Дж, соответственно, а число импульсов лазера за весь процесс – 200. Толщина используемых полированных стеклянных пластин была ~1 мм. Температура подложек изменялась от 100 до 300 °C или 400 °C. Во всех случаях полученные пленки CdTe проявляли *n*-тип проводимости.

Исследование оптических характеристик тонких пленок CdTe были проведены методами оптической спектроскопии с помощью спектрофотометра Photon RT SN:22719.

На рисунках 1–3 представлены спектры пропускания и отражения тонких пленок CdTe, полученные при различной длине волны лазера (600–1200 нм) и температуре подложки (100–300/400 °C). Из представленных спектров видно, что с увеличением длины волны в видимом диапазоне от 500 нм наблюдается рост пропускания образцов, что свидетельствует об уменьшении поглощения в материале [6]. Для длин волн более 900 нм, вследствие уменьшения поглощения CdTe, наблюдаются характерные интерференционные минимумы и максимумы, обусловленные резонансами Фабри – Перо [6]. Увеличение температуры подложки усиливает осциллирующий характер спектров пропускания и отражения. Максимальное пропускание соответствует значению в 80–85 %. В спектрах отражения также наблюдается картина резонансов с минимальными и максимальными значениями отражательная, положение которых в основном определяется толщиной слоя CdTe исследуемых образцов [6].

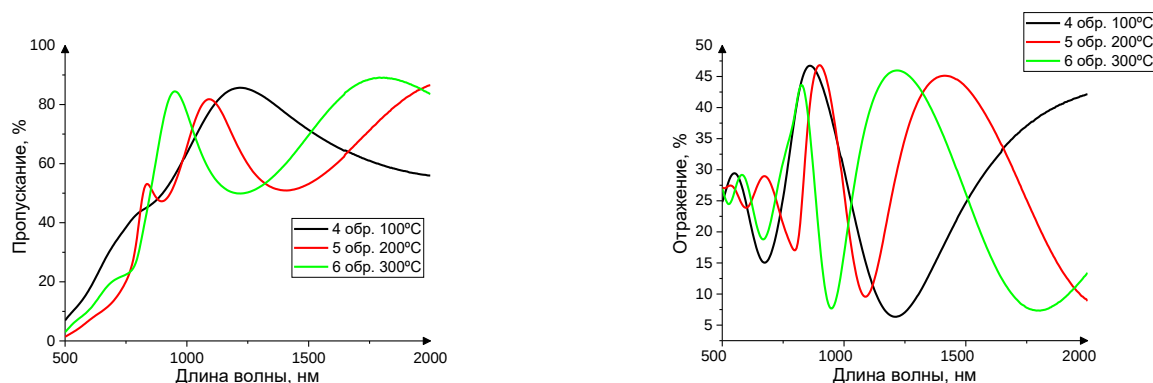


Рисунок 1 – Спектры пропускания и отражения тонких плёнок CdTe, полученных при длине волны лазера 600 нм и различной температуре подложки

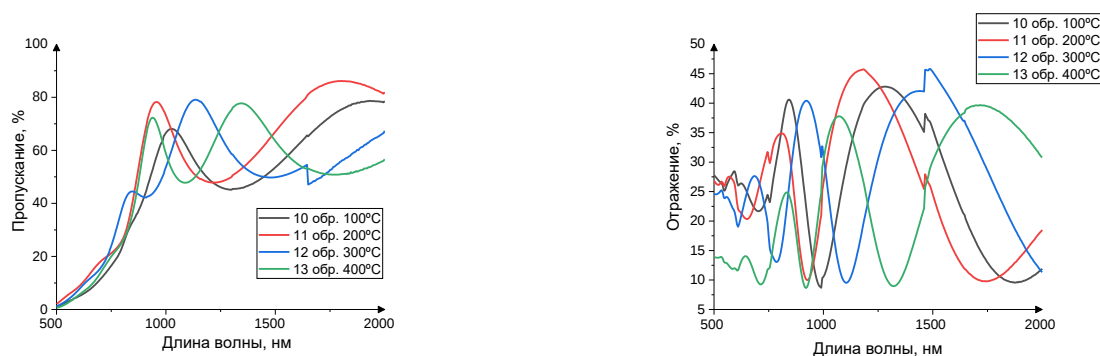


Рисунок 2 – Спектры пропускания и отражения тонких плёнок CdTe, полученных при длине волны лазера 1064 нм и различной температуре подложки

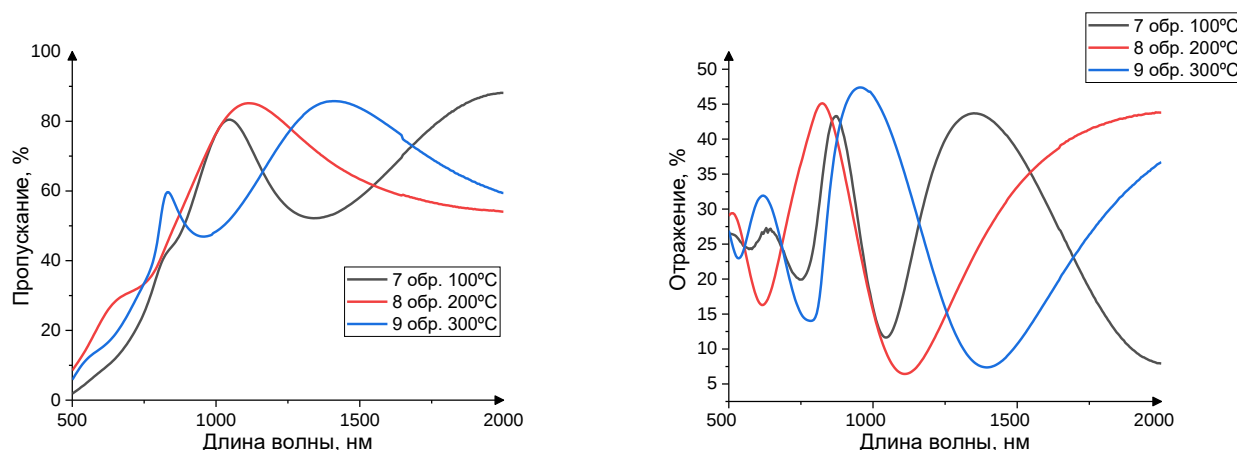


Рисунок 3 – Спектры пропускания и отражения тонких плёнок CdTe, полученных при длине волны лазера 1200 нм и различной температуре подложки

В таблице 1 представлены рассчитанные значения оптической ширины запрещенной зоны тонких пленок CdTe, полученных на стеклянных подложках импульсным лазерным осаждением, с помощью формулы (1) [12]. По формуле 1 рассчитывался коэффициент оптического поглощения α , а затем по построенной зависимости $(\alpha h\nu)^2$ от энергии излучения путем экстраполяции прямолинейного участка до пересечения с осью абсцисс определялось численное значение ширины запрещенной зоны E_g .

$$\alpha = \left(\frac{1}{d}\right) \ln \frac{1-R}{T}, \quad (1)$$

где α – коэффициент оптического поглощения,

d – толщина пленки,

R – значение отражения,

T – значение пропускания.

Таблица 1 – Значения ширины запрещенной зоны тонких плёнок CdTe, полученных импульсным лазерным осаждением, в зависимости от длины волны лазера и температуры подложки (в скобках указан номер образца)

Длина волны, нм	Температура подложки, °C			
	100	200	300	400
600	1,51 эВ (№ 7)	1,50 эВ (№ 8)	1,49 эВ (№ 9)	–
1064	1,48 эВ (№ 10)	1,47 эВ (№ 11)	1,46 эВ (№ 12)	1,45 эВ (№ 13)
1200	1,47 эВ (№ 4)	1,46 эВ (№ 5)	1,45 эВ (№ 6)	–

Из представленных результатов в таблице 1 видно, что ширина запрещенной зоны с увеличением температуры подложки от 100 до 300/400 °C линейно уменьшается. При этом изменение длины волны лазерного излучения от 600 до 1200 нм также приводит к уменьшению значения оптической ширины запрещенной зоны CdTe. Необходимо отметить, что рассчитанные значения ширины запрещенной зоны для осажденных пленок CdTe в данной работе хорошо согласуются с литературными (1,4–1,5 эВ) [1].

Методом импульсно-лазерного осаждения были получены тонкие пленки CdTe на стеклянных подложках при различной их температуре и длине волны лазера. С помощью оптической спектроскопии были получены спектры пропускания и отражения, по которым были определены значения ширины запрещенной зоны осажденных пленок CdTe. Установлено, что увеличение температуры подложки от 100 до 300/400 °C и длины волны лазерного излучения от 600 до 1200 нм приводят к уменьшению значения ширины запрещенной зоны CdTe. Во всех случаях полученные тонкие пленки CdTe характеризовались высоким коэффициентом пропускания в диапазоне 900–2000 нм.

Список литературы

1. Rakhashani, A. E. Electrodeposited CdTe–optical properties / A. E. Rakhashani // Journal of Applied Physics. – 1997. – Vol. 81. – P. 7988–7993.
2. McCandless, B. E. Cadmium telluride solar cells. In: Luque A., Hegedus S., eds. Handbook of photovoltaic science and engineering; John Wiley & Sons, Ltd / B. E. McCandless, J. R. Sites. – 2003. – P. 617–662.

3. Solar cell efficiency tables (version 62) / M. A. Green [et al.] // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2023. – Vol. 31, № 7. – P. 651–663.
4. Активный Координатночувствительный Фотоприемник / С. Г. Новиков [и др.] // Физика и электроника. – 2012. – Т. 14, № 4. – С. 941–944.
5. Фотоэлектрические свойства гетероперехода (p)InSb – (n)CdTe / Л. А. Матевосян [и др.] // Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2, № 4. – С. 403–406.
6. Подлипов, В. В. Структурные и оптические характеристики тонких пленок CdTe в видимом и инфракрасном диапазонах / В. В. Подлипов, Д. А. Быков, Д. В. Нестеренко // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 3. – С. 415–421.
7. Studies on CdTe films deposited by pulsed laser deposition technique / B. Ghosh [et al.] // Physica B: Condensed Matter. – 2012. – Vol. 407. – P. 4214–4220.
8. CdTe thin films grown by pulsed laser deposition using powder as target: Effect of substrate temperature / F. De Moure – Flores [et al.] // Journal of Crystal Growth. – 2014. – Vol. 386. – P. 27–31.
9. Growth of cubic and hexagonal CdTe thin films by pulsed laser deposition / S. K. Pandey [et al.] // Thin Solid Films. – 2005. – Vol. 473, № 1. – P. 54–57.
10. Effects of the substrate temperature on the properties of CdTe thin films deposited by pulsed laser deposition / P. Hu [et al.] // Surface & Coatings Technology. – 2012. – Vol. 213. – P. 84–89.
11. Электрические свойства полупроводниковых гетеропереходов (p)InSb – (n)CdTe / В. А. Иванов [и др.] // Актуальные проблемы физики твердого тела. – 2023. – № 10. – С. 291–294.
12. Investigation on the properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ and $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ absorber films prepared by magnetron sputtering technique using Zn and ZnS targets in precursor stacks / Neslihan Akcay [et al.] // International Journal of Energy Research. – 2020. – P. 1–18.

The effect of process parameters (laser wavelength and substrate temperature) on the optical properties of CdTe thin films obtained by pulsed laser deposition on glass substrates was investigated. The obtained CdTe thin films were studied by optical spectroscopy. The effect of substrate temperature and laser wavelength on transmission and reflection spectra was revealed. It was found that the band gap of CdTe thin films depends on both the substrate temperature and the laser wavelength.

Шевчик Павел Владимирович, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, г. Минск, Республика Беларусь, fiz.sheuchyuk@gmail.com.

Научный руководитель – *Станчик Елена Викторовна*, кандидат физико-математических наук, доцент, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, г. Минск, Республика Беларусь, alena.stanchik@bk.ru.

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

РАЗРАБОТКА ОНЛАЙН-МОДЕЛИ ПЛАЗМЕННОГО ФАКЕЛА ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Приведены теоретические основы и описан алгоритм работы программы подсчёта концентрации электронов в плазменном факеле при лазерном воздействии на цветные металлы.

Исследование влияния лазерного излучения на твёрдые тела приобрело важное значение и стало одним из ключевых направлений в науке. Актуальность лазерного излучения обусловлена его свойствами, которые обеспечивают широчайший спектр применений в современной науке, промышленности, медицине и технологиях. Непрерывное усовершенствование лазерных технологий, включая создания новых типов лазеров и уменьшение размеров устройств, способствует расширению спектра задач, которые можно решить с их помощью.

Описание процессов, происходящих в лазерном факеле, требует решения сложных систем уравнений, учитывающих взаимодействие лазерного излучения с веществом, процессы ионизации, возбуждения, рекомбинации и излучения. Разработка эффективных численных методов для моделирования этих процессов является актуальной задачей.

Лазерное излучение позволяет обнаруживать и измерять концентрации веществ в очень малых количествах, что делает его незаменимым инструментом для многих приложений. Специфичность метода достигается путем выбора длины волны лазера, которая соответствует резонансному переходу в целевом атоме или молекуле.

При диагностике плазмы ручной метод обработки интерферограмм в общем случае предполагает выполнение экспериментатором ряда трудоемких шагов: получение изображений интерферограмм с помощью скоростной фоторегистрирующей камеры; вычисление по изображению величины смещения интерференционных полос от невозмущенного состояния; расчёт изменения показателя преломления с помощью интегрального уравнения Абеля и вычисление требуемых параметров плазмы.

Использование автоматизированного подхода, основанного на возможностях пакета MATLAB и его дополнений, приводит к существенным преимуществам: происходит значительное сокращение затрат ресурсов (как временных, так и материальных) на обработку экспериментальных данных, а также достигается значительное повышение точности итоговых результатов.

Полученное в ходе эксперимента изображение интерферограммы считывается из соответствующего файла и помещается в массив данных MATLAB для возможности дальнейшей обработки средствами расширения ImageProcessingToolbox. Далее путем преобразования RGB составляющих пикселей оригинала в соответствующие им значения яркости и контрастности изображения. Для подавления шумов изображение фильтруется и сглаживается. По умолчанию используется сглаживающий фильтр Гаусса с заданным стандартным отклонением распределения.

Используется пороговый метод для создания бинарного изображения из предварительно обработанного. Пиксели, значения яркости которых ниже установленного порога, отсекаются. Пикселю в бинарном изображении присваивается значение 0 (черный), если яркость соответствующего пикселя в исходном изображении меньше порогового значения, и 1 (белый) в противном случае. Порог, принадлежащий диапазону $[0; 1]$, может быть вычислен автоматически с использованием алгоритма Оцу или задан пользователем.

Для количественной оценки смещения полосы от исходного положения (невозмущенного состояния) необходимо построить прямую, описывающую ее положение (отображается красным цветом). Эта прямая определяется путем соединения двух точек. Каждая из этих точек получается усреднением координат центров десяти строк, расположенных в начале и в конце изображения полосы.



Рисунок 1 – Интерферограмма с выбранной для определения смещения от невозмущенного состояния темной полосы

Затем запускается подпрограмма *Pearce_method*, реализующая математический алгоритм для расчета параметров интерферограммы, включая показатель преломления (подробное описание алгоритма представлено в [3]). Полученные результаты расчетов показателей преломления сохраняются в матрицах данных, на основе которых формируются таблицы и графики. В завершение данные экспортируются в файл Excel, например, *Results.xlsx*.

На основании вычисленного смещения полосы и результатов обработки формируется массив данных, содержащий значения концентрации электронов (N_e). Эти данные сохраняются и используются для построения графика.

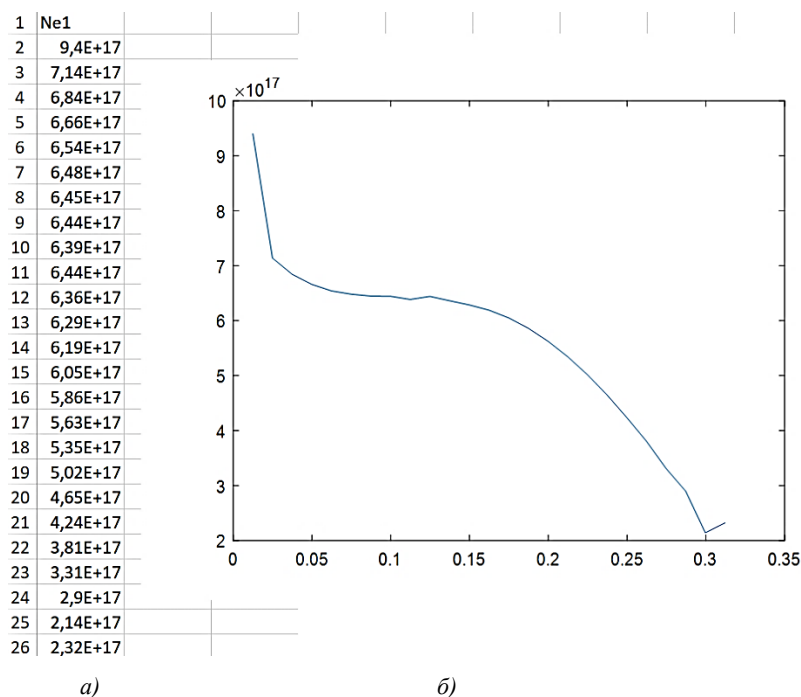


Рисунок 2 – Данные расчёта концентрации электронов Ne в плазменном факеле для выбранной на рисунке 1 тёмной полосы (а) и построенный по ним график зависимости концентрации плотности электронов Ne в лазерной плазме(б)

Заключительный этап включает обработку сохраненных массивов данных с целью визуализации картины экспериментов. Важно отметить, что промежуточные данные, полученные при анализе интерферограмм, на предыдущих этапах экспортировались в отдельный Excel – файл «Results.xlsx».

Для построения пространственно-временной модели выбранной интерферограммы используются подпрограммы *plot3dgraph.m* и *plot3dSurface.m*.

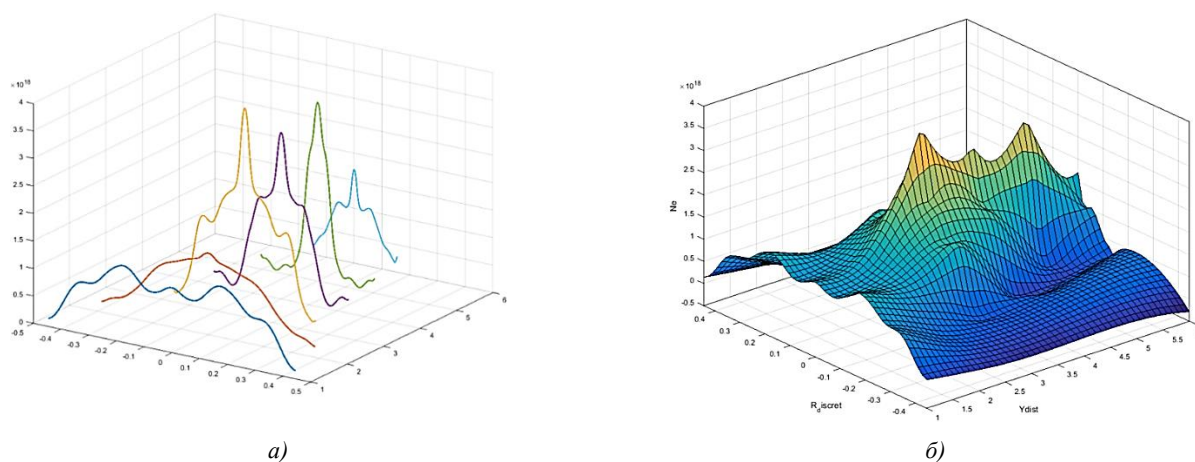


Рисунок 3 – Пространственное распределение полей плотности концентрации электронов, рассчитанной для всех изучаемых полос интерференционной картины – а, б – их поверхностное 3d-представление

Список литературы

1. Иванов, А. Ю. Акустическая диагностика процесса лазерной обработки материалов : моногр. / А. Ю. Иванов. – Гродно : ГрГУ, 2007. – 208 с.
2. Васильев, С. В. Влияние электрического поля на приповерхностные процессы при лазерной обработке материалов / С. В. Васильев, А. Ю. Иванов // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42, № 2. – С. 170–174.
3. Васильев, С. В. Автоматизация обработки результатов скоростной голографической киносъемки / С. В. Васильев, И. К. Губаревич, А. Ю. Иванов, Е. О. Семенчук, Т. А. Ситкевич // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Фізіка. Матэматыка. Інфарматыка. – 2022. – № 1. – С. 36–47.

The article provides theoretical foundations and describes the algorithm of the program for calculating the concentrations of electrons in a plasma torch during laser exposure to non ferrous metals.

Бодак Ирина Олеговна, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь.

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

УДК 53.072

М. Ю. ВОЛКОВИЧ, В. С. ОСКИРКО

МОДЕЛИ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Разработаны модели идеального газа – динамическая (метод молекулярной физики) и статистическая. Программная реализация позволяет продемонстрировать установление максвелловского распределения по скоростям, мгновенную и среднюю скорости молекул. Установлено, что динамическая и статистическая модели дают идентичный результат. Программа содержит полную теорию, алгоритмы программной реализации. Может использоваться на лекционных, практических занятиях и для самостоятельной работы.

Теоретическое описание любого реального процесса или объекта возможно только приближенно. Это означает, что необходимо выбрать модель (идеализированное представление) процесса или объекта. Например, идеальный газ – хорошая модель для описания свойств газов при низких давлениях и высоких температурах. Газ – это система большого числа частиц (молекул, атомов). Разумно предположить, что их движение и взаимодействие определяют такие свойства газа, которые можно измерить (давление, температура, объем).

Рассмотрим идеальный газ с позиций молекулярно-кинетической теории. Пусть газ находится в ящике размером $L \times L \times L$ и состоит из N молекул [1]. Будем считать, что молекулы могут двигаться с постоянными скоростями только в направлениях перпендикулярных стенкам ящика. Столкновения молекул друг с другом отсутствуют, это значит, что молекулы можно считать материальными точками. Распределение Максвелла по скоростям:

$$f_m(\vartheta^2) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{m\vartheta^2}{2kT}} \vartheta^2, \quad (1)$$

или для двумерной (плоской) задачи уравнение примет вид:

$$f_m(\vartheta^2) = \frac{m}{kT} e^{-\frac{m\vartheta^2}{2kT}}, \quad (2)$$

максимум этой функции определяется из условия $\frac{df_m}{d\vartheta} = 0$

$$\vartheta_p = \sqrt{\frac{kT}{m}}, \quad (3)$$

где ϑ_p – наиболее вероятная скорость частиц. Если ввести безразмерную скорость $U = \frac{v}{\vartheta_p}$, то распределение Максвелла для плоской задачи имеет очень простой вид:

$$f_*(U^2)dU = U e^{-U^2/2} dU. \quad (4)$$

Для того чтобы распределение Максвелла стало рабочим инструментом при изучении кинетической теории, наиболее важным является наблюдение за процессом упорядочивания скоростей частиц идеального газа, первоначально распределенных по значениям и направлениям, вообще говоря, произвольным. Для этого удобно использовать моделирование процесса с помощью компьютера, если обеспечивается вывод на экран дисплея меняющихся во времени картин положения частиц в пространстве (движение частиц) и гистограммы функции распределения частиц по скоростям $f(\mathcal{G})$. При этом для уменьшения объема счетной работы при сохранении наглядности всего процесса эволюции распределения частиц по скоростям удобно рассматривать процесс «максвеллизации» скоростей частиц идеального газа в плоской модели (4). В этой модели с точностью до числовых коэффициентов сохраняются все детали и особенности трехмерной задачи.

Если массы частиц одинаковы, то законы сохранения кинетической энергии и проекций импульса можно записать только для компонент безразмерных скоростей:

$$\begin{aligned}v_{0i}^2 + v_{0j}^2 &= v_{1i}^2 + v_{1j}^2, \\v_{0xi} + v_{0xj} &= v_{1xi} + v_{1xj}, \\v_{0yi} + v_{0yj} &= v_{1yi} + v_{1yj}.\end{aligned}\tag{5}$$

Здесь использованы обозначения:

v_{0i}, v_{0xi}, v_{0yi} – модуль и компоненты скорости i -частицы до столкновения;

v_{1i}, v_{1xi}, v_{1yi} – то же после столкновения;

v_{0j}, v_{0xj}, v_{0yj} – модуль и компоненты скорости j -частицы до столкновения;

v_{1j}, v_{1xj}, v_{1yj} – то же после столкновения;

кроме того, использованы очевидные соотношения между модулем и компонентами скорости.

Система уравнений (5) содержит три уравнения для четырех неизвестных компонент скоростей $v_{1xi}, v_{1yi}, v_{1xj}, v_{1yj}$, т. е. является неопределенной. Эту неопределенность следует использовать так, чтобы процесс столкновения носил вероятностный характер. Удобнее всего это достигается, когда одну из неизвестных величин мы будем выбирать, как случайную. Рассмотренную модель идеального газа будем называть статистической. В отличие от газа дисков (динамическая), в которой можно точно рассчитывать скорости после столкновения двух частиц, если известны скорости частиц до столкновения.

Рассмотрим далее модель идеального газа, как газ дисков. Отличие от предыдущей модели будет заключаться только в том, что столкновения двух частиц мы рассчитаем точно. Как и в предыдущем случае справедлива система уравнений (5). При этом по-прежнему число уравнений меньше, чем число неизвестных. Запишем уравнения (5) в координатной системе центра масс этих частиц:

$$\begin{aligned}v_{0im}^2 + v_{0jm}^2 &= v_{1im}^2 + v_{1jm}^2, \\v_{0xim} + v_{0xjm} &= v_{1xim} + v_{1xjm}, \\v_{0yim} + v_{0yjm} &= v_{1yim} + v_{1yjm}.\end{aligned}\tag{6}$$

Будем считать, что новая ось x совпадает по направлению с линией, соединяющей центры частиц. В этом случае между компонентами скорости в направлении оси x_m $v_{0xim}, v_{0xjm}, v_{1xim}, v_{1xjm}$ имеют место очевидные соотношения:

$$v_{1xim} = v_{0xjm}, v_{1xjm} = v_{0xim}.\tag{7}$$

Фактически имеет место аналогия с прямым ударом, когда частицы после соударения обмениваются импульсами. Таким образом, система уравнений, описывающих столкновение двух частиц, запишется в виде:

$$\begin{aligned}v_{0im}^2 + v_{0jm}^2 &= v_{1im}^2 + v_{1jm}^2, \\v_{0xim} &= v_{1xjm}, \\v_{0xjm} &= v_{1xim}, \\v_{0yim} + v_{0yjm} &= v_{1yim} + v_{1yjm}.\end{aligned}\tag{8}$$

Новая система уравнений имеет четыре неизвестных и четыре уравнения!

На рисунке 1 показан интерфейс пользователя. Входными данными являются следующие параметры: число частиц, V_{base} – база оси относительной скорости, число интервалов – число разбиений оси относительной скорости для построения гистограммы функции распределения по скоростям, L_{min} – расстояние между

центрами частиц, при котором имеет место столкновение. Движение частиц и графики реализовано с помощью графической библиотеки Axis. В поле «функция распределения» строится теоретическая кривая (4) и гистограмма функции распределения по скоростям, получаемую непосредственно из модели. В поле «энергия» отобразим зависимость полной энергии системы от времени. Этот график является тестом на корректность применяемого численного алгоритма. В поле «скорости» отображается средняя скорость, рассчитанная по распределению Максвелла, средняя скорость всех частиц и мгновенная скорость одной частицы, вычисляемое на каждом временном шаге. Мы рассмотрели две модели идеального газа: статистическую и «газ дисков». Для переключения этих режимов используется флажок «газ дисков».

Начальное расположение частиц в правом верхнем квадрате. Это сделано для возможности демонстрации парадокса Лошмидта.

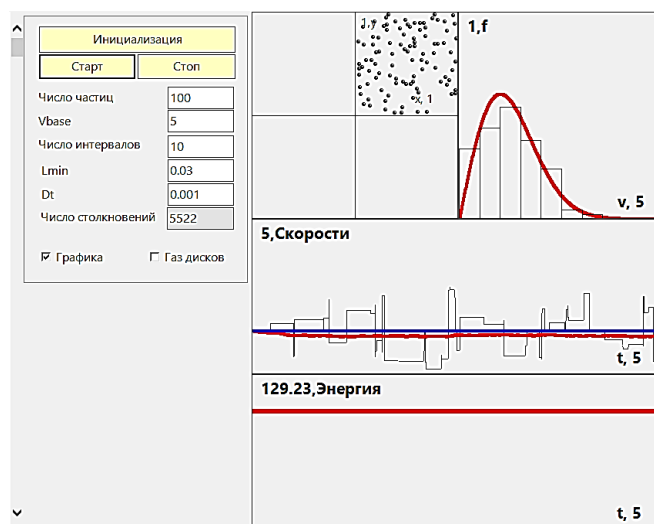


Рисунок 1 – Интерфейс программы

Список литературы

1. Никитин, А. В. Компьютерное моделирование физических процессов / А. В. Никитин, А. И. Слободянюк, М. Л. Шишаков. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2011. – 679 с.

Models of ideal gas have been developed – dynamic (molecular isics method) and statistical. The program realization makes it possible to demonstrate the establishment of the Maxwellian velocity distribution, the instantaneous and average velocities of molecules. It has been established that the dynamic and statistical models give identical results. The program contains a complete theory, algorithms for software implementation. It can be used for lectures, practical, and for independent work.

Волкович Максим Юрьевич, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, maksgrsu@gmail.com.

Оскирко Вадим Сергеевич, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, vadimgrsu@gmail.com.

Научный руководитель – Никитин Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, nik@grsu.by.

УДК 535.015

В. А. ГВОЗДОВСКИЙ

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАВЕДЁННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА НАНОКОМПОЗИТОМ С УЧЁТОМ БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Выполнено компьютерное моделирование взаимодействия лазерного излучения с нанокompозитной средой, содержащей краситель фталоцианин Zn и учёт безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения при длительности излучения 100 пс. Установлено, что в рассмотренных условиях порядка 20 % энергии импульсов излучения переносится безызлучательно, растягивая процесс релаксации поглощённой энергии во времени.

В последнее время уделяется внимание использованию лазерных красителей в виде композитных соединений. При этом обращается внимание на возможность получения высокого усиления в соответствующем спек-

тральном диапазоне, сохраняя высокой эффективность преобразования энергии возбуждения, высокого значения квантового выхода люминесценции. Работа с композитным твердотельным материалом должна обеспечить большую стабильность оптических свойств, значительно снизить температурную зависимость показателя преломления и другие важные характеристики, обеспечивая постоянство концентрации молекул [1; 2].

На нелинейно-оптические свойства композитных материалов определённым образом влияют все его компоненты, однако, как правило, определяющая роль принадлежит красителю. При этом необходимо учитывать по каким каналам и как быстро будет релаксировать сообщённая молекулам красителя энергия и сколь существенное влияние на эту релаксацию окажут молекулы окружения [3–5].

Учёт соответствующих процессов можно провести исходя из упрощённой схемы энергетических уровней красителя [3]. Указанная схема энергетических уровней, позволяет описать процессы в среде с учетом наведенного поглощения в каналах $S - S$ – и $T - T$ -уровней энергии, учесть безызлучательные и интеркомбинационные процессы.

Поглощение молекулой излучения обусловлено переходами как из основного $S_0 \rightarrow S_1$, так и возбужденных состояний $S_1 \rightarrow S_2$, $T_1 \rightarrow T_2$ и, возможно, других, более высоко лежащих уровней.

Переходы из возбужденных состояний вносят вклад в поглощение, только если населенность этих состояний будет достаточно большой.

Между частицами среды может эффективно происходить безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения, который необходимо учитывать. Безызлучательный перенос энергии сильно зависит от величины перекрытия контуров поглощения и флуоресценции молекул красителя, внедрённого в нанокompозит. В работе использованы параметры красителя фталоцианин цинка. Поглощение излучения нанокompозитом с учётом безызлучательного переноса энергии описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{dn_{S_0}}{dt} = -P(t) \cdot \sigma_{S_0} n_{S_0}(t) + k_{S_0} n_{S_1}(t) + k_{TS} n_{T_1}(t), \quad (1)$$

$$\frac{dn_{S_1}}{dt} = P(t) \cdot [\sigma_{S_0} n_{S_0}(t) - \sigma_{S_1} n_{S_1}(t)] - (k_{ST} + k_{S_1} + k_f) n_{S_1}(t) + k_S n_{S_2}(t), \quad (2)$$

$$\frac{dn_{S_2}}{dt} = P(t) \cdot \sigma_S n_{S_1}(t) - k_S n_{S_2}(t), \quad (3)$$

$$\frac{dn_{T_1}}{dt} = -n_{T_1}(t) (P(t) \sigma_T k_{TS}) + k_T n_{T_2}(t) + k_{ST} n_{S_1}(t), \quad (4)$$

$$\frac{dn_{T_2}}{dt} = P(t) \cdot \sigma_T n_{T_1}(t) - k_T n_{T_2}(t), \quad (5)$$

$$\frac{dn_A}{dt} = P(t) \cdot \sigma_A (n_{S_0}(t) - n_A(t)) - k_A n_A(t) + k_f n_{S_1}(t), \quad (6)$$

$$N = n_{S_0} + n_{S_1} + n_{S_2} + n_{T_1} + n_{T_2}, \quad (7)$$

где n_{S_i} и n_{T_i} – населенность i -го синглетного и триплетного уровней, соответственно, N – концентрация молекул органического красителя, $P(t)$ – плотность фотонов излучения Гауссовой формы.

Уравнения (1)–(7) образуют систему, решение которой дает как зависимость пропускания образца от интенсивности лазерного излучения $T = T(I)$ с учётом безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения. Данная система уравнений позволяет вычислить все определяющие параметры наведенного поглощения.

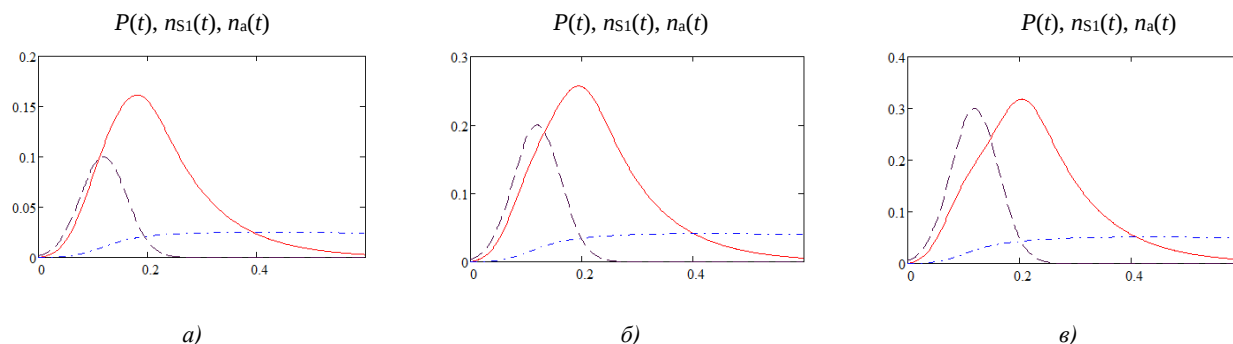
Полную вероятность переноса W можно получить из выражения $\omega = \frac{3}{2} \chi^2 \frac{R_0^6}{\tau_0 R^6}$, где $R_0^6 = 5,86 \cdot 10^{-25} \frac{\eta_0}{n^4} \int F(\tilde{\nu}) \varepsilon(\tilde{\nu}) \frac{d\tilde{\nu}}{\tilde{\nu}^4}$ – характеристическое расстояние R_0 , на котором вероятность переноса равна вероятности спонтанного перехода в молекуле донора, определяется равенством $W_{\tau_a} = 1$. Здесь $F_a(\omega)$ – нормированный спектр излучения, выраженный в числе квантов на единичный интервал частот, $\tilde{\nu} = \omega/2\pi c$ – частота в см^{-1} , $\chi^2 = 2/3$, $\varepsilon(\tilde{\nu})$ – молярный десятичный показатель поглощения (если в данной спектральной области нельзя пренебречь дисперсией показателя преломления, то множитель $n^{-4}(\omega)$ нужно ввести под знак интеграла).

Спектры поглощения и флуоресценции нанокompозита зарегистрированы, что позволяет определить расстояние R_0 и вероятность переноса при заданной концентрации молекул красителя.

Наличие перекрытия контуров поглощения и флуоресценции обеспечит достаточный эффект безызлучательного переноса, создавая миграцию энергии возбуждения на ближайшее окружение.

Выполненные численные исследования изменения населённости энергетических состояний молекул красителя в нанокompозите при длительности импульсов возбуждения 100 пс. и различной плотности мощности позволили получить интересные зависимости.

На рисунке 1 представлены изменения населённости уровня S_1 (сплошная линия) и населённости безызлучательных потерь (штрихпунктирная линия) во времени при трёх значениях плотности фотонов возбуждения: 4×10^{18} , 8×10^{18} и 12×10^{18} фот./ см^2 .



**Рисунок 1 – Изменение населённости уровня S_1 (сплошная линия), населённости безызлучательных потерь (штрих-пунктирная линия) и импульса возбуждения (штриховая линия) во времени при трёх значениях плотности фотонов возбуждения: а) – 4×10^{18} , б) – 8×10^{18} и в) – 12×10^{18} фот./см².
Длительность импульсов возбуждения – 100 пс**

Населенность уровня S_1 достигает максимума по истечении порядка 100 пс. после максимума возбуждения, т. е. смещена по времени на величину длительности возбуждения. С ростом уровня возбуждения указанное смещение незначительно увеличивается.

Населённость безызлучательных потерь в рассматриваемых условиях составляет примерно шестую часть от максимума населённости S_1 , т. е. относительно заметная часть, которая сильно растянута во времени. Миграция энергии возбуждения на невозбуждённые молекулы существенно растягивает процесс релаксации энергии во времени.

Изменение наведенного поглощения при импульсном мощном воздействии излучения короткой длительности (100 пс по полувысоте) и различной амплитуде импульсов представлено на рисунке 2. Поглощение описывается выражением:

$$\alpha(t) = \sigma_{S_0} n_{S_0}(t) + \sigma_S n_{S_1}(t) + \sigma_T n_{T_1}(t). \quad (8)$$

Величина всплеска поглощения, индуцированного излучением с ростом амплитуды плотности мощности импульсов увеличивается, причём максимум поглощения смещён во времени на величину длительности возбуждения, а спад кривой опускается ниже исходного значения в начальный момент. Рост плотности мощности приводит к увеличивающейся асимметрии кривой наведенного поглощения. По истечении 350 пс с момента действия накачки (или 3,5 длительностей импульса накачки) поглощение сменяется просветлением, которое усиливается с ростом интенсивности возбуждения.

Изменение населённости триплетных уровней энергии при трёх значениях плотности фотонов возбуждения представлены на рисунке 3.

Отметим характерные особенности изменения населённостей триплетных энергетических состояний, рисунок 3. Населённость уровня T_1 медленно возрастает и достигает своего максимума по истечении порядка 400 пс, т. е. четырёх длительностей возбуждения.

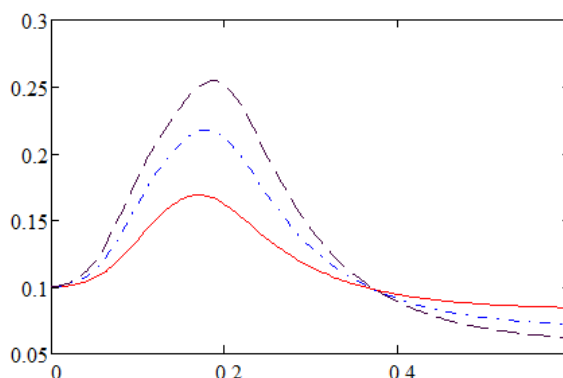


Рисунок 2 – Изменение поглощения нанокompозита во времени при различных плотностях фотонов излучения: 2×10^{18} , 4×10^{18} и 6×10^{18} фот./см²

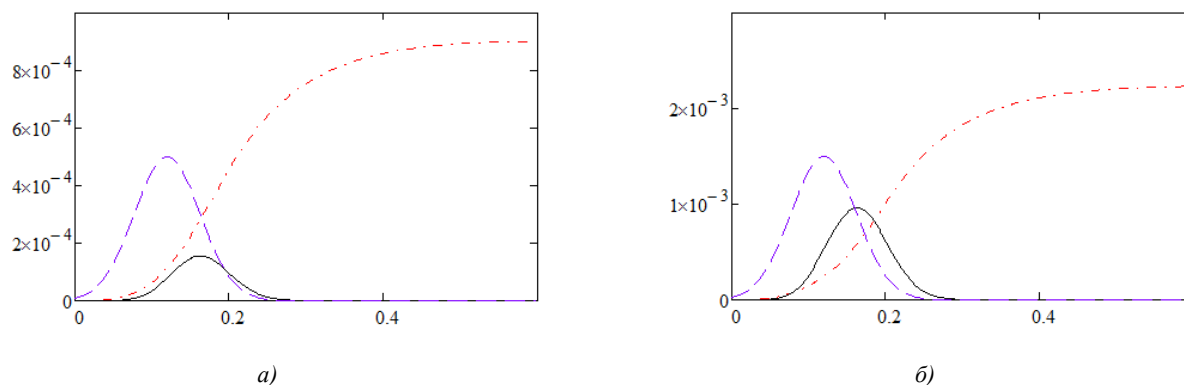


Рисунок 3 – Изменение населённости уровня T_2 (сплошная линия), населённости уровня T_1 (штрихпунктирная линия) и импульса возбуждения (штриховая линия) во времени при двух значениях плотности фотонов возбуждения: а) -2×10^{18} и б) -8×10^{18} фот./см². Длительность импульсов возбуждения составляла 100 пс

При этом максимальное её значение более чем в 150 раз меньше населённости уровня S_1 . Изменение населённости уровня T_2 носит импульсный характер, отстаёт от импульса возбуждения примерно на 0,5 его величины. Максимум населённости уровня T_2 более чем в двадцать раз меньше населённости уровня S_1 . Из этого можно сделать вывод, что роль триплетных состояний в указанных условиях пренебрежимо мала.

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. 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.
3. 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.
4. Курстак, В. Ю. Наведенное поглощение активированного красителем композита при пикосекундном возбуждении / В. Ю. Курстак, С. С. Ануфрик // VII Конгресс физиков Беларуси (Минск, 26–28 апр. 2023 г.): сб. науч. тр. / редкол.: С. Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Ковчег, 2023. – 232 с.
5. Курстак, В. Ю. Наведенное поглощение и нелинейность активированного красителем нанокompозита при пикосекундном возбуждении / В. Ю. Курстак, С. С. Ануфрик // Лазеры, полупроводниковые излучатели и системы на их основе : программа и тез. докл. 2-й Междунар. конф., Минск, 20–24 мая 2024 г. / под ред. Г. И. Рябцева, З. Н. Соколовой, Е. А. Невар. – Минск : Ин-т физики НАН Беларуси, 2024. – С. 59.

Computer simulation of the interaction of laser radiation with a nanocomposite medium containing the Zn phthalocyanine dye was performed, taking into account the nonradiative transfer of electronic excitation energy at a radiation duration of 100 ps. It was found that under the considered conditions, about 20 % of the radiation pulse energy is transferred nonradiatively, extending the relaxation process of the absorbed energy over time.

Гвоздовский Владислав Александрович, студент 4 курса физико-технического факультета (специальность «Компьютерная физика») Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, u.hvazdouski@icloud.com.

Научный руководитель – *Курстак Владислав Юзефович*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, vkurst@grsu.by.

УДК 538.913

М. О. КОВАЛЕНКО, И. В. КОНДРУСЬ

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ ПРОБЛЕМАТИКИ ФАЗОВОЙ СТАБИЛЬНОСТИ СПЛАВА HfNbZrTi К ТЕМПЕРАТУРНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Теоретически исследовано температурное воздействие на сплав HfNbZrTi при 473,773 и 973 К. Моделирование осуществлялось с помощью гибридного метода Монте-Карло и классической молекулярной динамики. Межатомное взаимодействие решётки описывались с помощью модели погружённого атома (МЕАМ). Выявлено, что исходная ОЦК фаза мета-

стабильна и в результате температурного воздействия распадается на ОЦК и ГПУ фазы, что верифицируется двумя методами: сопоставления шаблонов многогранников и расчётом средней когезионной энергии.

Предполагается, что эксплуатация конструкционных материалов в новых реакторах деления будет осуществляться в условиях более высоких температур, а также больших повреждающих доз, причём как первый, так и второй фактор вполне может приводить к структурно-фазовым превращениям в твёрдых телах [1–3]. Поэтому актуальной задачей является поиск материалов, которые будут стойкими к различным экстремальным воздействиям. Одним из перспективных кандидатов на замену устоявшимся в отрасли материалам являются высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), которые представляют собой однофазные многокомпонентные твёрдые растворы, находящиеся в эквиатомном или почти эквиатомном соотношении. Большинство исследований, связанных с данной тематикой, первоначально были направлены на рассмотрение ВЭС с гранецентрированной кубической (ГЦК) решёткой (например, сплав Кантора). Но современные исследования сдвинули своё внимание в пользу ВЭС с объёмно – центрированной (ОЦК) решёткой. Так сплав HfNbZrTi весьма интересен многим исследователям, так как такие элементы как Nb и Zr уже используются в качестве материалов ТВЭЛ, благодаря их низкому значению сечения захвата тепловых нейтронов, но одной из проблем используемых металлов заключается в соответственно низких жаростойкости и жаропрочности [2]. К настоящему моменту времени в литературе отсутствуют расчетные и теоретические данные касательно фазовой стабильности эквиатомного HfNbZrTi сплава в условиях промежуточных температур, что определило цель данной работы.

С помощью программы AtomsK был сгенерирован неупорядоченный твёрдый раствор замещения с ОЦК решёткой и эквиатомным составом в суперячейке с 28800 атомами.

Моделирование эффекта старения для ВЭС осуществлялось с помощью гибридного метода Монте-Карло и классической молекулярной динамики (МК + МД) в программном пакете LAMMPS. Межатомное взаимодействие описывались с помощью модели погружённого атома (MEAM). Моделирование проводилось при температурах 473, 773 и 973 К. Данный диапазон температур был выбран для сопоставления с внутриреакторными условиями, к которым должен быть стоек рассматриваемый сплав. Все расчёты проводились со стандартным шагом интегрирования 0,001 пс (1 фс), выборочно результаты проверялись с шагом интегрирования 0,00025 пс, но результаты не изменились, в связи с этим в статье приведены результаты только при стандартном шаге. Структура была предварительно оптимизирована методом сопряжённых градиентов, а затем уравновешены с ансамблем NPT при заданной температуре и давлении 1 бар в течение 100 пс. В ходе реализации метода МК + МД осуществлялось по 360 атомных перестановок через каждый 10 шагов и общее число перестановок составило около $(1-6) \times 10^7$.

Критерием остановки расчётов был выход на плато потенциальной энергии как переход системы в стабильное состояние, а также количественный анализ структурно – фазового состояния методом сопоставления шаблонов многогранников, который проводился с помощью программы OVITO. Параметр среднеквадратичного отклонения был выставлен на 0,25 для надёжной идентификации различных решёток (ОЦК, гексагональной плотноупакованной – ГПУ) с учётом эффектов дисторсии решётки в случае ВЭС, в связи с нахождением атомов разных радиусов в одной кристаллической решётке, а также температуры.

Для сравнения фазовой стабильности на микроскопическом уровне была рассчитана средняя когезионная энергия по формуле:

$$E_{\text{ког,атом}} = \frac{E_{\text{pot}}}{N},$$

где E_{pot} – абсолютное значение потенциальной энергии системы, а N – количество перестановок в решётке.

На рисунке 1 представлены результаты МК+ МД моделирования длительного отжига HfNbZrTi при 473, 773 и 973 К. Во всех случаях в начальный момент времени наблюдалось доминирование единой ОЦК фазы, но после воздействия температуры со временем начался интенсивный процесс выделения ГПУ фазы из первоначальной ОЦК фазы. На первом шаге процентное соотношение ГПУ фазы составляло – от 0 до 1 %, что попадает в рамки погрешности расчётов методики, что свидетельствует о единой однофазной ОЦК решётке первоначального сплава. Однако на последнем шаге после $(1-6) \times 10^7$ атомных перестановок имело место повышение объёмной доли ГПУ фазы до 60–74 %, причём процент ГПУ фазы возрастает с увеличением температуры. То есть эквиатомный состав ВЭС HfNbZrTi испытывает распад фазы твёрдого раствора, данный результат был верифицирован экспериментально. Фазовое превращение в термодинамически более стабильное состояние происходит спонтанно при промежуточных температурах, возникающих из-за внутренней метастабильности однофазной структуры. Вторичные ОЦК и ГПУ фазы обычно выделяются вдоль границ зерен, когда подвергаются отжигу при температуре ниже ~ 1000 °С [4]. Также из литературы известно, что ОЦК – матрица HfNbZrTi распадается на две фазы, вторичную ОЦК – фазу, богатую Nb – Ta, и ГПУ, богатую Zr – Hf [5].

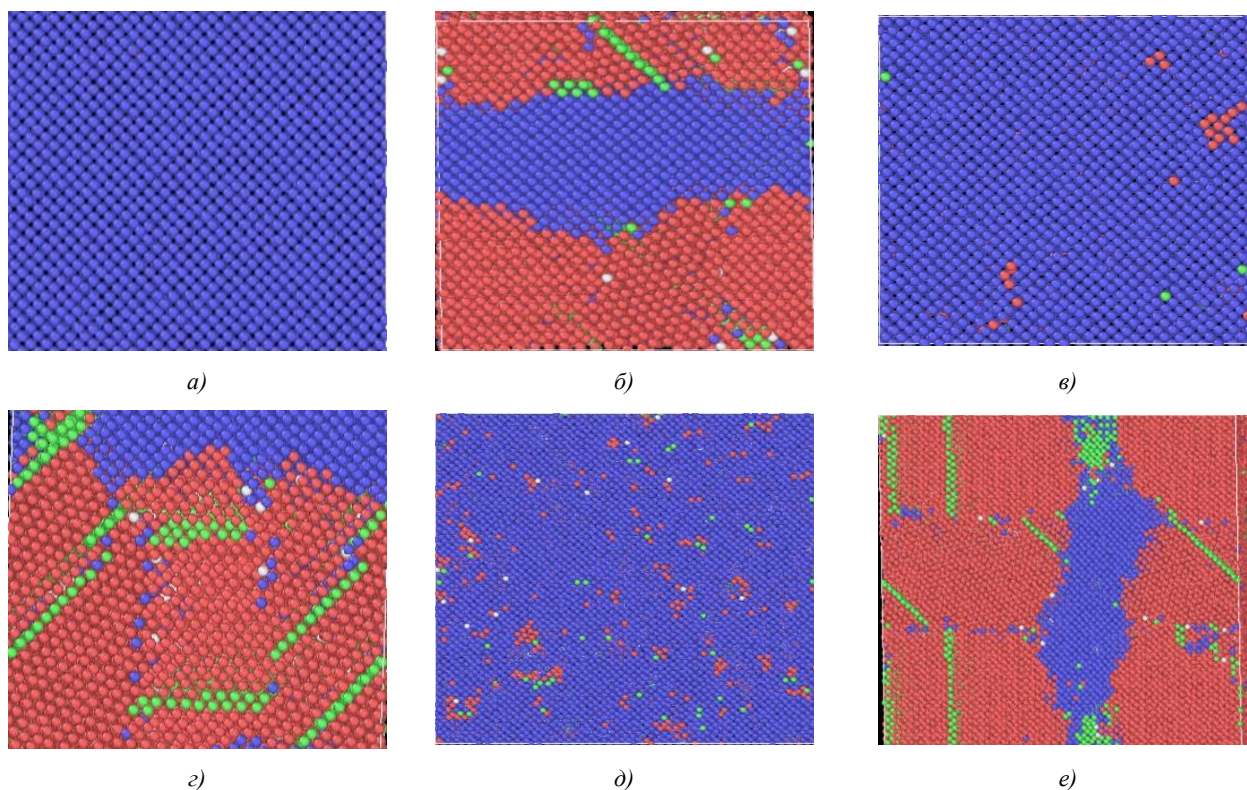


Рисунок 1 – Модель сплава HfNbZrTi, отображающая соотношение ОЦК и ГПУ фаз (ОЦК – синий, ГПУ – красный), а и б – при 473 К, в и г – при температуре 773 К, д и е – при температуре 973 К на первом и последнем шаге соответственно

На рисунке 2 продемонстрированы резкие переходы когезионной энергии, соответствующей метастабильной единой ОЦК фазе (первая «короткая полка на графиках), к стабильному уровню плато когезионной энергии, соответствующему распаду твёрдого раствора на ОЦК и ГПУ фазы, при 473, 773 и 973 К. Данные графики описывают физический принцип, согласно которому ГПУ решётка более плотно упакована, что объясняет увеличение средней когезионной энергии. При образовании двухфазной системы ОЦК + ГПУ система стремится к минимизации свободной энергии, что может привести к увеличению общей когезионной энергии за счёт появления более стабильной ГПУ фазы [6].

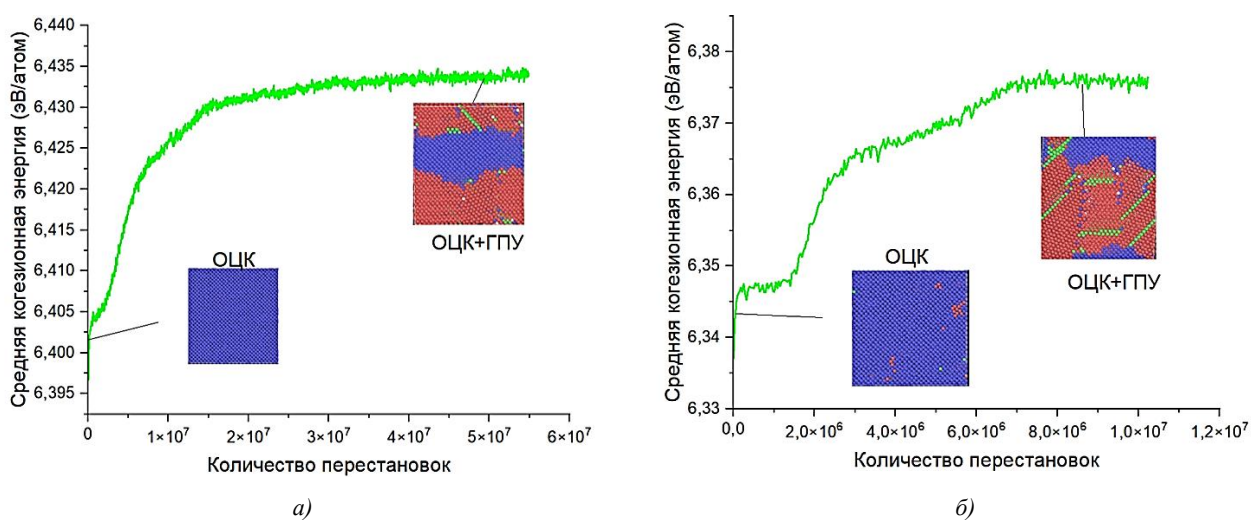


Рисунок 2 – Средняя когезионная энергия в зависимости от количества перестановок, а – 473 К, б – 773 К

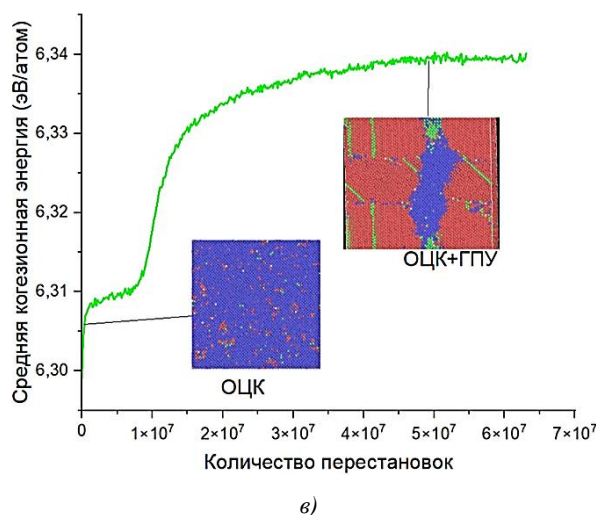


Рисунок 2 – Средняя когезионная энергия в зависимости от количества перестановок, в – 973 К

Таким образом, структурно-фазовое состояние сплава HfNbZrTi нестабильно в промежуточном интервале температур (473, 773, 973 К). Это было верифицировано двумя методами: сопоставления шаблонов многогранников и расчётом средней когезионной энергии атомов решётки. Данные гибридного метода Монте-Карло и классического молекулярного моделирования показали образование из единой метастабильной ОЦК фазы двух фаз ОЦК и ГПУ, что говорит о склонности данного сплава к образованию сегрегаций во всём диапазоне температур от 473 К до 973 К. Установлено, что средняя когезионная энергия двухфазной ОЦК + ГПУ системы резко возрастает по сравнению с первоначальным состоянием, что доказывает увеличение плотности упаковки внутри кристаллической решётки. Этот результат свидетельствует о энергетической выгоде процесса сегрегаций с образованием ГПУ решётки.

Список литературы

1. Zinkle, S. J. Structural materials for fission & fusion energy / S. J. Zinkle, J. T. Busby // Materials Today. – 2009. – Vol. 12, iss. 11. – P. 12–19. – doi: 10.1016/s1369-7021(09)70294-9.
2. Was, G. S. Fundamentals of Radiation Materials science: Metals and Alloys / G. S. Was // Fundamentals of Radiation Materials Science. – Heidelberg : Springer Berlin, 2007. – doi: 10.1007/978-3-540-49472-0.
3. Zhang, W. Science and technology in high – entropy alloys / W. Zhang, P. K. Liaw, Y. Zhang // Science China Materials. – 2018. – Vol. 61, iss. 1. – P. 2–22. – doi: 10.1007/s40843-017-9195-8.
4. Senkov, O. N. Microstructure and properties of a refractory high – entropy alloy after cold working / O. N. Senkov, S. L. Semiatin // J. Alloys Compd. – 2015. – Vol. 64. – P. 1110–1123.
5. Chen, S. Y. Phase transformations of HfNbTaTiZr high – entropy alloy at intermediate temperatures / S. Y. Chen, Y. Tong, K.-K. Tseng // Scripta Materialia. – 2018. – Vol. 158. – P. 50–56.
6. Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела : пер. с англ. / Ч. Киттель. – 8-е изд. – М. : Наука, 1978. – 792 с.

The effect of temperature on the HfNbZrTi alloy at 473, 773 and 973 K was theoretically investigated. The modeling was performed using a hybrid Monte Carlo method and classical molecular dynamics. The interatomic interaction of the lattice was described using the embedded atom model (MEAM). It was revealed that the initial bcc phase is metastable and as a result of temperature exposure it decomposes into bcc and hcp phases, which is verified by two methods: matching polyhedron templates and calculating the average cohesive energy.

Коваленко Максим Олегович, студент 5 курса физического факультета Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, maksuskoval@tut.by.

Кондрусь Илья Васильевич, студент 5 курса физического факультета Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, ilyakondrus01@gmail.com.

Научный руководитель – Углов Владимир Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, Uglov@bsu.by.

Научный руководитель – Сафронов Игорь Васильевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИЛ физики ионно-плазменной модификации твёрдых тел Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, Safronov@bsu.by.

П. А. ГОЛОМБЕВСКИЙ, В. В. КОЗЛОВСКИЙ

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ГИПЕРЗВУКОВОМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

На основе уравнений движения мелкодисперсных твердых металлических частиц анализируется их разгон гиперзвуковым газовым потоком.

На современном этапе фазовые превращения мелкодисперсных частиц в гиперзвуковом газовом потоке повышенной температуры являются актуальной задачей.

Целью исследования является оценка времени разгона частиц и их нагрев до температуры воспламенения.

Рассмотренная задача решается в два последовательных этапа. Первый заключается в оценке времени набора мелкодисперсных частицами скоростей порядка скорости гиперзвукового течения. Второй этап включает в себя оценку времени температуры разгоняемых частиц до температуры потока.

Анализ первого этапа заключается в решении уравнений движения с добавлением уравнения изменения массы частицы [1]:

$$\frac{dmv_x}{dt} = m \frac{dv_x}{dt} + v_x \frac{dm}{dt},$$

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{3\mu C_D Re}{4\rho_p D_p^2 (v - v_x)},$$

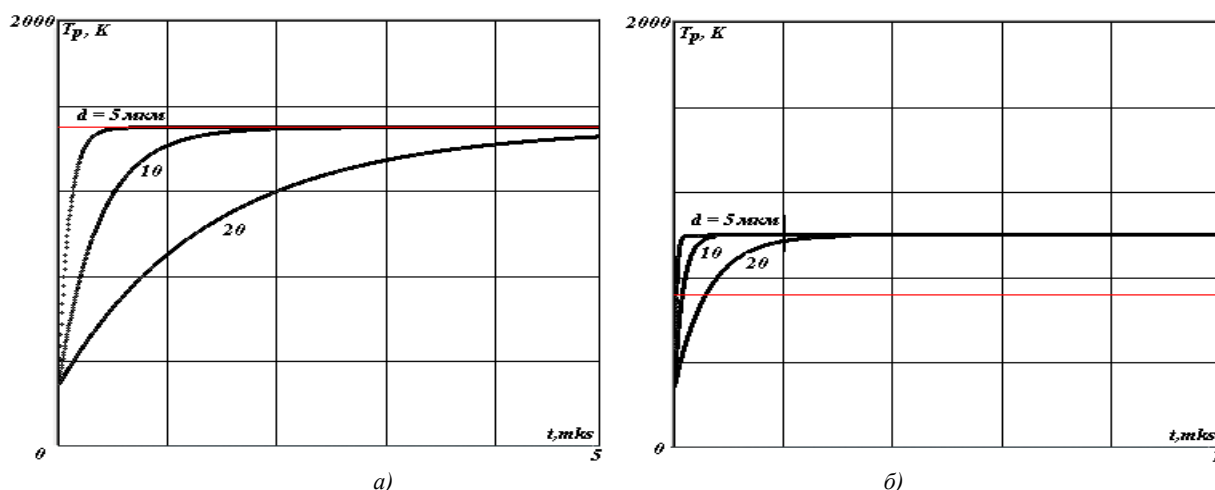
где x – координата частицы; v , v_x – соответственно, скорости газового потока и частицы; ρ_p и ρ_p – соответственно, плотности частицы и газового потока; μ – коэффициент динамической вязкости несущего потока; C_D – удельная теплоемкость частицы; Re_p – число Рейнольдса.

На втором этапе определяется время нагрева частицы до температуры ее воспламенения. Для этого решалось уравнение теплового баланса, определенного в виде:

$$V_p \rho_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \alpha (T_\infty - T_p) F_p,$$

где V_p – объем частицы; T_p , T_∞ – температуры частицы и несущего потока; t – время; α – коэффициент теплоотдачи; F_p – поверхность частицы.

Расчет уравнений (1–3) представлен на рисунке 1. Определено качественное согласие с данными других авторов [1].



а) частицы алюминия для различных размеров при температуре несущего потока 1500 К,

б) частицы активированного угля для различных размеров при температуре несущего потока 1500 К.

Рисунок 1 – Зависимости температуры частиц от времени

Список литературы

1. Ветлущий, В. Н. Исследование потока газа с твердыми частицами в сверхзвуковом сопле / В. Н. Ветлущий, В. Л. Ганимедов, М. И. Мучная // ПМТФ. – 2005. – Т. 46, № 6. – С. 65–76.

Based on the equations of motion of finely dispersed solid metal particles, their acceleration by a hypersonic gas flow is analyzed.

Козловский Владислав Вячеславович, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, kozlovskiy@gmail.com.

Голомбевский Павел Антонович, студент 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, gpravvel07@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, г. Гродно, Республика Беларусь, zharnova_oa@grsu.by.

УДК 541.1

П. А. ГОЛОМБЕВСКИЙ, В. В. КОЗЛОВСКИЙ

МОДЕЛЬ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО АЛЮМИНИЯ С ФТОРПОЛИМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ В ГИПЕРЗВУКОВОМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

Рассмотрена возможность удаления оксидной пленки алюминия, применяемого для дополнительного разогрева гиперзвукового газового потока за счет разогрева частицы в самом газовом потоке.

Для дополнительного разогрева гиперзвукового газового потока в него подаются мелкодисперсные частицы алюминия с высоким выделением энтальпии при их сгорании. Однако этот эффект ограничен образованием оксидной пленки на поверхности частицы, для удаления которой необходимы высокие температуры. Уравнения, описывающую математическую модель, включают в себя изменение энтальпии H , массы покрытия m_1 , массы образующейся оксидной пленки m_{23} и непосредственно массы частицы m_2 , записываются в виде:

$$\frac{d}{dt}(\Sigma H_i) = \Sigma Q \Sigma H_i = \begin{cases} 4\pi r_p^2 T_p \left(\frac{r_p c_2 \rho_2}{3} + \delta_1 c_1 \rho_1 + \delta_{23} c_{23} \rho_{23} \right), & T_p \leq T_x, \\ 4\pi_p^2 T_p \left(\frac{r_p c_2 \rho_2}{3} + \delta_{23} c_{23} \rho_{23} \right), & T_p > T_x, \end{cases}$$

$$\frac{dm_i}{dt} = -I_i, m_i = \begin{cases} m_1 = 4\pi_p^2 \delta_1 \rho_1, & \frac{dm_2}{dt} = 0, \\ m_p \leq T_x, & T_p > T_x, \\ m_1 = \frac{4}{3} \pi_p^3 \rho_2, & \frac{dm_1}{dt} = 0, \end{cases}$$

$$\frac{dm_{23}}{dt} = \frac{l_2}{v_{23}}, m_{23} = \begin{cases} \frac{dm_{23}}{dt} = 0, & T_p \leq T_x, \\ m_{23} = 4\pi_p^2 \delta_{23} \rho_{23}, & T_p > T_x. \end{cases}$$

В приведенных уравнениях, полностью описывающих предлагаемую модель приняты следующие обозначения: δ – толщина покрытия или оксидной пленки, c_i – удельная теплоемкость соответствующего вещества, r_p – радиальные размеры частицы, I_i – скорость изменения, соответственно, массы покрытия, оксидной пленки и алюминия, v_{23} – массовый стехиометрический коэффициент, вычисляемый по соответствующим коэффициентам реакции (4), определяемый как $v_{23} = \frac{2\mu_2}{\mu_{23}}$, причем μ – относительная молекулярная масса.

В результате протекания всех реакций получается суммарный поток тепла, состоящий из конвективного и радиационного теплообмена с окружающим газовым потоком и тепловыделением химических реакций. Расчеты температуры нагрева частиц алюминия различного диаметра с учетом вышеприведенных уравнений представлен на рисунке.

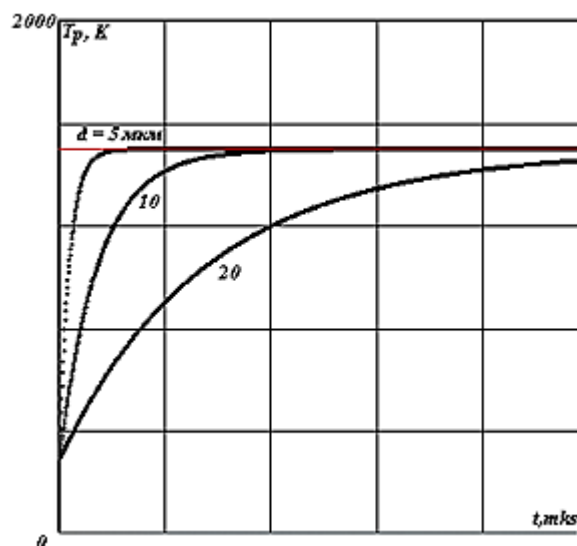


Рисунок 1 – Зависимости температуры частицы алюминия для различных размеров частиц при температуре газового потока

Список литературы

1. Похил, П. Ф. Горение порошкообразных металлов в активных средах / П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов // М. : Наука, 1972. – 273 с.

The possibility of removing the aluminum oxide film used for additional heating of a hypersonic gas flow by heating the particle in the gas flow itself is considered.

Козловский Владислав Вячеславович, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, kozlovskiy@gmail.com.

Голомбевский Павел Антонович, студент 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, gparavel07@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, г. Гродно, Республика Беларусь, zharnova_oa@grsu.by.

УДК 53.535.015

П. В. ЕРЁМЕНКО, А. Ю. МУХИНА, К. Д. ЛОМАКО, Е. А. ЖУК, Г. А. ПИЦЕВИЧ, В. А. ОРЛОВИЧ

УСИЛЕНИЕ ЭФФЕКТА ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ КЛАСТЕРАМИ ВОДЫ ЗА СЧЁТ ЗАХВАТА МОЛЕКУЛ КИСЛОРОДА И ЭЛЕКТРОНОВ

Проводится оценка способности комплексов молекул воды с кислородом усиливать ГВГ. Для исследования этой ситуации были оптимизированы конфигурации кластера, содержащего 6 молекул воды, были рассчитаны компоненты кубического тензора первой гиперполяризуемости. Расчеты предсказывают увеличение эффективности ГВГ на три порядка и на четыре порядка в зависимости от кластера.

Поиск перспективных сред, характеризующихся выраженными нелинейно-оптическими свойствами, с использованием экспериментальных методик является сложной и ресурсозатратной задачей. Вместе с тем, в последнее время появились возможности с помощью квантово-химических пакетов теоретически предсказывать эффективность некоторых молекулярных сред для таких нелинейно-оптических эффектов, как генерация второй и третьей гармоник (ГВГ, ТГГ), двухфотонное поглощение, эффект Керра и естественное вращение плоскости поляризации [1; 2]. Ранее [3] комплексы кластеров воды с кислородом были использованы для объяснения экспериментально наблюдаемого вынужденного комбинационного рассеяния на частоте около 3000 см^{-1} вблизи границы раздела жидкая вода – воздух. Отмечено, что захват молекул кислорода способствует увеличению значений ряда элементов кубического тензора первой гиперполяризуемости на несколько порядков. Это послужило основанием для оценки способности таких комплексов молекул воды с кислородом усиливать ГВГ по сравнению с исходными кластерами воды. Для исследования этой ситуации были прежде всего оптимизи-

рованы конфигурации кластера, содержащего 6 молекул воды, его аниона, а также комплекса кластера с молекулой кислорода в триплетном и синглетном состояниях. Оптимизация проводилась на уровне теории B3LYP/dAug-cc-pVDZ. Оптимизированные конфигурации показаны на рисунке 1.

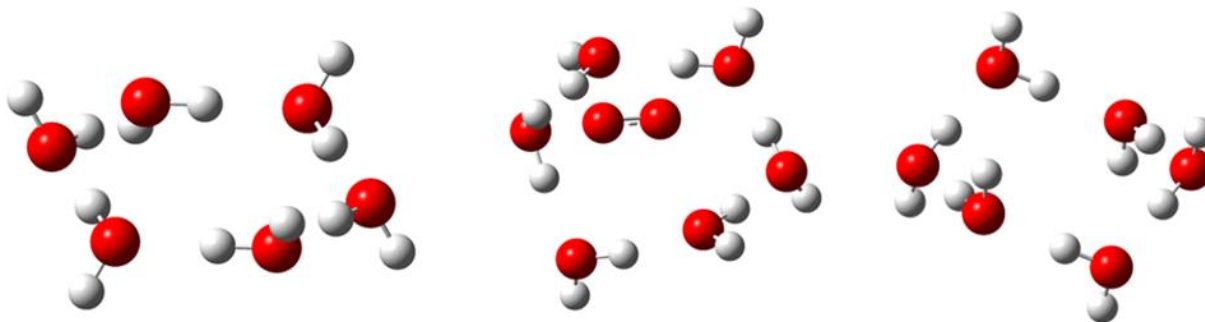


Рисунок 1 – Равновесные конфигурации кластера, содержащего 6 молекул воды (слева), его аниона (справа), а также комплекса кластера с молекулой кислорода (посередине), рассчитанных на уровне B3LYP/dAug-cc-pVDZ

Затем на этом же уровне теории были рассчитаны некоторые компоненты кубического тензора первой гиперполяризуемости β ($-2\omega; \omega, \omega$), определяющие эффективность процесса ГВГ. Поскольку предполагается, что обе среды изотропны, т. е. все ориентации кластеров и комплексов равновероятны, то процесс усреднения при переходе от индивидуальных компонент к характеристикам среды одинаков и соотношение эффективностей ГВГ будет в основном определяться соотношением соответствующих компонент тензора β ($-2\omega; \omega, \omega$) кластера и комплексов. Расчеты были выполнены для шести длин волн падающего излучения: $\lambda = 379,7, 455,6, 569,5, 759,4, 1139,1$ и $2278,2$ нм. Таблица 1 содержит рассчитанные значения некоторых компонент кубического тензора первой гиперполяризуемости β ($-2\omega; \omega, \omega$) для длины волны $569,5$ нм.

Таблица 1 – Значения некоторых компонент и инвариантов кубического тензора первой гиперполяризуемости β ($-2\omega; \omega, \omega$) в атомных единицах, рассчитанные на уровне теории B3LYP/dAug-cc-pVDZ для кластера воды $(\text{H}_2\text{O})_6$, его аниона и комплексов $(\text{H}_2\text{O})_6 + \text{O}_2^t$ and $(\text{H}_2\text{O})_6 + \text{O}_2^s$ для падающего излучения с длиной волны $569,5$ нм

Кластер / комплекс	β_{zzz}	β_{zzx}	$\beta_{ }$	$\beta_{\perp}$
$(\text{H}_2\text{O})_6$	$0,54 \times 10^{-2}$	$0,15 \times 10^{-3}$	$0,41 \times 10^{-2}$	$0,13 \times 10^{-2}$
$^-(\text{H}_2\text{O})_6$	$-0,22 \times 10^1$	$-0,41 \times 10^1$	$0,68 \times 10^1$	$-0,31 \times 10^1$
$(\text{H}_2\text{O})_6 + \text{O}_2^t$	$-0,23 \times 10^2$	$-0,45 \times 10^1$	$-0,75 \times 10^2$	$0,88 \times 10^1$
$(\text{H}_2\text{O})_6 + \text{O}_2^s$	$0,79 \times 10^3$	$0,24 \times 10^2$	$0,68 \times 10^3$	$0,21 \times 10^3$

Как следует из данных таблицы 1, расчеты предсказывают увеличение эффективности ГВГ на три порядка (в случае захвата кластером свободного электрона), на четыре порядка (в случае включения в кластер триплетного кислорода) и даже на пять порядков (в случае включения в кластер синглетного кислорода). Очевидно, что такое увеличение эффективности способно компенсировать уменьшение плотности среды при переходе из жидкой в газовую фазу в слое, прилегающем к границе раздела: жидкая вода – воздух. Расчеты также предсказывают, что максимальная эффективность ГВГ достигается для длины волны $759,4$ нм.

Список литературы

1. Santos, F. A. Nonlinear Optical Materials: Predicting the First – Order Molecular Hyperpolarizability of Organic Molecular Structures / F. A. Santos, C. E. R. Cardoso // Potonics. – 2023. – P. 545.
2. Beer, A. Molecular Orientation – Induced Second – Harmonic Generation: Deciphering Different Contributions Apart / A. Beer, R. Damari, Y. Chen, S. Fleischer // J. Phys. Chem. – 2022. – Vol. 152, iss. 22. – P. 3732–3735.
3. Pershin, S. M. Picosecond Stimulated Raman Scattering at 3000 and 3430 cm^{-1} O – H Vibrations Without Optical Breakdown / S. M. Pershin, A. I. Vodchits, I. A. Khodasevich, M. Ya. Grishin, V. N. Lednev, V. A. Orlovich, P. A. Chizhov // Opt. Lett. – 2020. – Vol. 45, iss. 5. – P. 5624–5625.

In this work, the ability of complexes of water molecules with oxygen to enhance SHG is evaluated. To investigate this phenomenon, the configurations of a cluster containing 6 water molecules were optimised and the components of the cubic tensor of the first hyperpolarizability were calculated. The calculations predict an increase in the GWH efficiency by three orders of magnitude and by. four orders of magnitude depending on the cluster.

Еременко Полина Владимировна, Белорусский государственный университет физический факультет, г. Минск, Республика Беларусь, eremenkopolina250@gmail.com.

Ломако Кристина Дмитриевна, Белорусский государственный университет физический факультет, г. Минск, Республика Беларусь, lomakokristina133@gmail.com.

Мухина Анна Юрьевна, Белорусский государственный университет физический факультет, г. Минск, Республика Беларусь, ann.mkhnn@gmail.com.

Жук Екатерина Андреевна, Белорусский государственный университет физический факультет, г. Минск, Республика Беларусь, @titanSifer@mail.ru

Научный руководитель – *Пицевич Георгий Александрович*, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра физической оптики и прикладной информатики, физический факультет Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, pitsevich@bsu.by.

Научный руководитель – *Орлович Валентин Антонович*, доктор физико-математических наук, профессор, академик Национальной академии наук Беларуси, Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь, v.orlovich@dragon.bas-net.by.

УДК 533.9.924:621.793.18

А. С. ИВАНОВ, В. В. ШЕКЕЛЕВСКИЙ

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЁТА ТЕПЛОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

Рассматривается применение метода конечных разностей для расчета теплораспределения в магнетронной распылительной системе. Приведено краткое описание используемой методики, а также сравнение расчетов с Comsol Multiphysics.

Магнетронное распыление является одним из самых распространенных методов ионно-плазменного напыления тонкопленочных покрытий. На сегодняшний день, этот метод широко используется в производстве продукции областей микро-, нано- и оптоэлектроники [1]. Это объясняется высоким качеством получаемых пленок и хорошей воспроизводимостью результатов. Однако к недостаткам магнетронного распыления можно отнести конструкционную особенность, заключающуюся в том, что магнитная система магнетронной распылительной системы (МРС), чувствительная к изменениям температуры, находится прямо под мишенью, которая, подвергаясь бомбардировке ионами рабочего газа, может разогреваться до высокой температуры (~400 °С). Поэтому в таких устройствах существует необходимость в эффективной системе охлаждения, которая не допустит перегрева магнитной системы и потери при этом её магнитных свойств. В виду этого разработка численных методов расчета позволит облегчить задачу проектирования и оптимизации систем охлаждения, а также снизить на это временные и материальные затраты.

В данной работе при численном моделировании процесса охлаждения мишени магнетронной распылительной системы было использовано двухмерное стационарное уравнение теплопроводности с фиктивной производной по времени [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right),$$

где – ρ плотность материала, – C_p удельная теплоёмкость, λ – коэффициент теплопроводности, T – температура.

Для решения данного уравнения использовался метод конечных разностей с неявной схемой решения и метод прогонки для решения систем линейных уравнений. Фиктивная производная используется из-за того, что стационарные уравнения не могут быть решены методом прогонки. Данный способ работает в виду того, что граничные условия не зависят от времени, а при $t \rightarrow \infty$ решение стремится к стационарному $\frac{\partial T}{\partial t} \rightarrow 0$. Алгоритм решения для двухмерного случая с подробной блок схемой представлен на рисунке 1.

При этом делались следующие допущения:

1. Нагрев мишени происходит равномерно по всей ее поверхности (не учитывается форма зоны эрозии).
2. По всей внешней поверхности магнетрона, кроме мишени, выполняется условие ($T = 25$ °С).
3. Используются граничные условия первого рода.

Для решения данной задачи нами была написана программа с использованием языка программирования Python 3.10 и сторонними бесплатными библиотеками для этого языка. При проведении расчетов была использована упрощенная модель магнетрона, изображенная на рисунке 2.

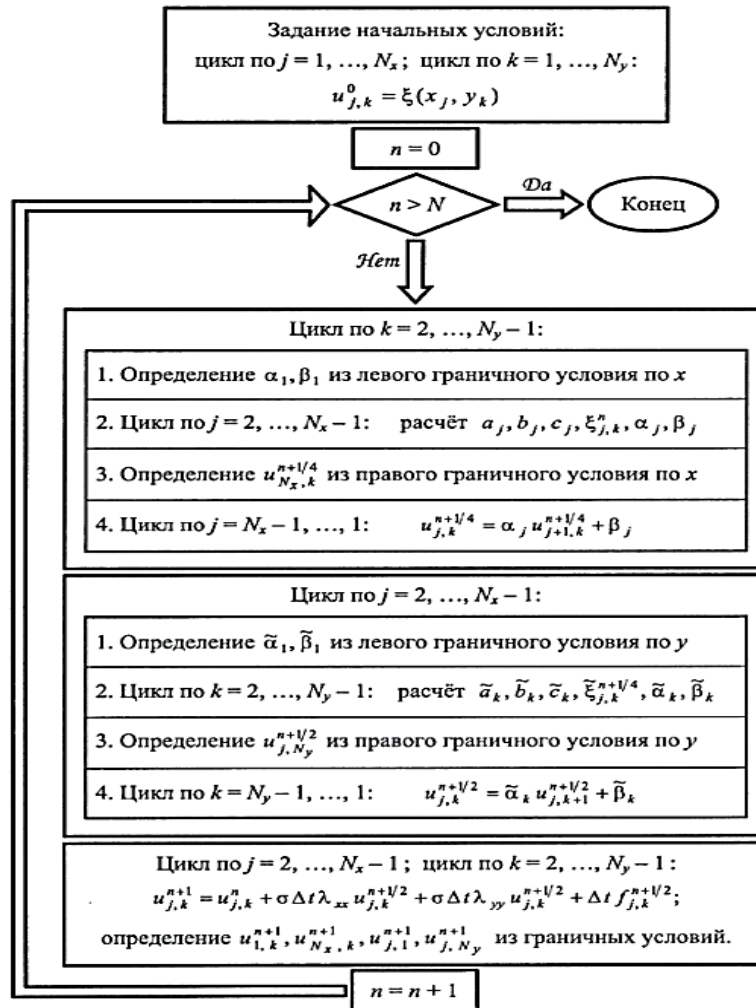


Рисунок 1 – Блок-схема решения неявной схемы методом прогонки

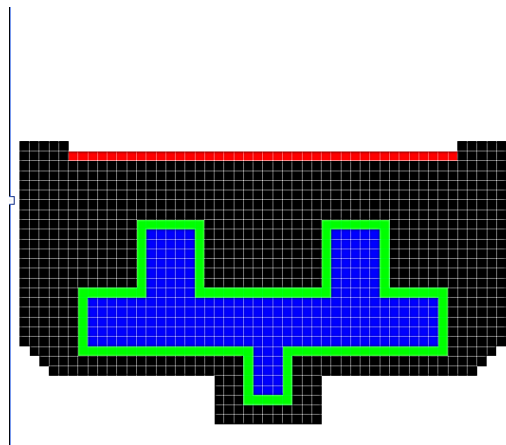


Рисунок 2 – Упрощённая схема магнетрона, использованная при расчётах

На изображении красными пикселями была показана граница мишень-магнетрон. В этих точках была задана температура -100°C , так как это температура ниже которой стараются охлаждать мишень. Зелеными пикселями была показана граница между магнетроном и трубками, в которых протекает вода. И синими пикселями была выделена сама вода. Было проведено 5000 итерации алгоритма для обеспечения достаточной сходимости. Размер схемы 50×50 узлов. Результаты вычислений приведены на рисунке 3.

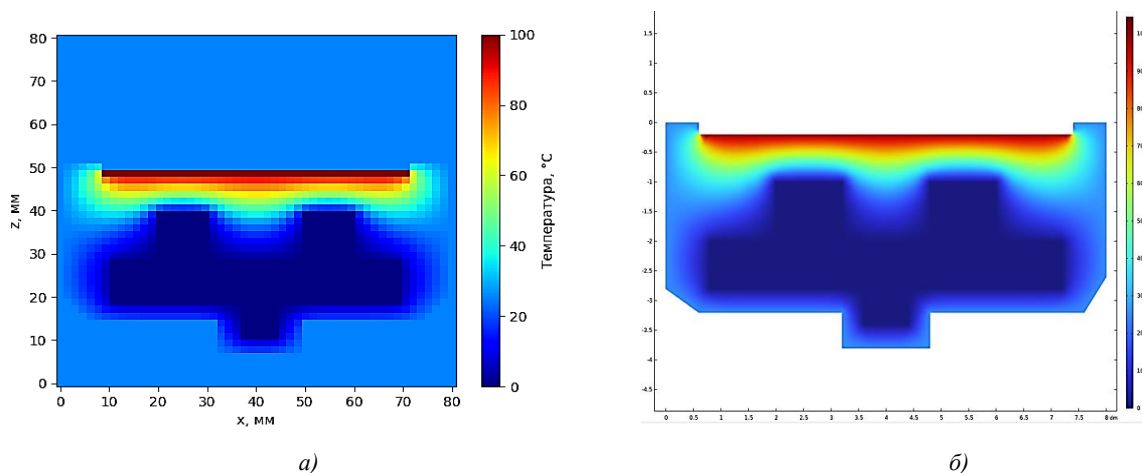


Рисунок 3 – Графики полученных результатов: температурное поле магнетрона (а), температурное поле магнетрона, полученное в Comsol Multiphysics (б)

Полученные результаты мы сравнивали с уже существующим верифицированным программным обеспечением Comsol Multiphysics, которое использует метод конечных элементов для решения дифференциальных уравнений в частных производных. Срезы вдоль оси магнетрона показаны на рисунке 4а на рисунке 5 показана относительная погрешность решения.

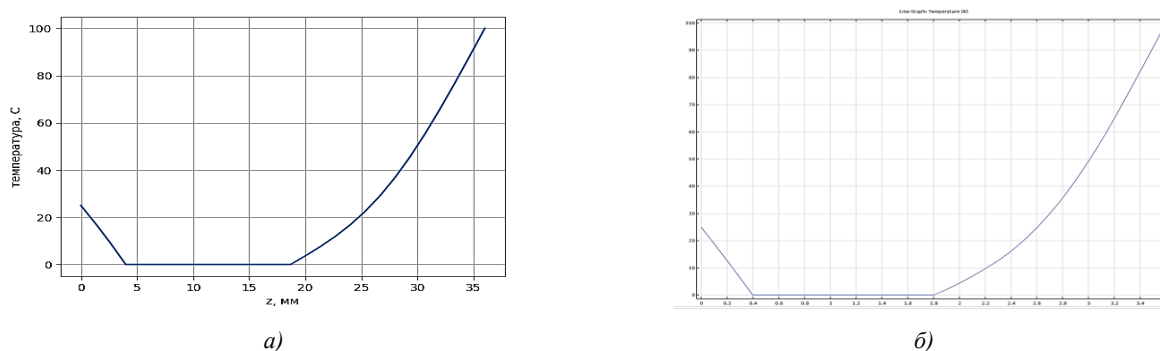


Рисунок 4 – Значения температуры вдоль оси магнетрона: полученные в программе на Python (а), полученные в Comsol Multiphysics (б)

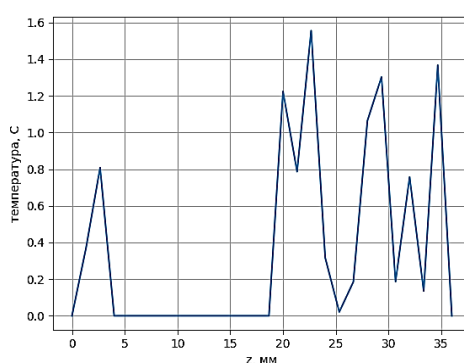


Рисунок 5 – Относительная погрешность вычислений температуры вдоль оси магнетрона

Как видно из рисунков, расчеты, полученные с использованием написанной нами программы на Python, показывают хорошее соответствие с расчетами Comsol Multiphysics, а максимальное значение относительной погрешности равно 1,55 %.

Таким образом рассмотрено применение метода конечных разностей для моделирования теплового поля в магнетронной распылительной системе в стационарном случае. Приведено краткое описание реализации метода, а также сравнение с расчетом в Comsol Multiphysics. По результатам сравнения показано, что средняя получаемая

относительная погрешность вычислений меньше 1 %, что говорит о правильности используемой методики и ее применимости для решения практических задач. В дальнейшем будет вестись работа по добавлению более сложных граничных условий, а также решению нестационарного случая.

Список литературы

1. Шекелевский, В. В. Влияние профиля зоны эрозии мишени на распределение осаждаемого материала на подложке при магнетронном распылении / В. В. Шекелевский // ФКС-2021 : материалы XXIX междунар. науч.-практ. конф. аспирант., магистр. и студ. (Гродно, 22–23 апр. 2021 г.) / ГрГУ им. Янки Купалы, физ.-техн. фак. – Гродно : ГрГУ, 2021. – С. 170–172.
2. Кольцова, Э. М. Численные методы решения уравнений математической физики и химии : учеб. пособие / Э. М. Кольцова, А. С. Скичко, А. В. Женса. – М. : Юрайт, 2024. – 220 с.

This paper discusses the application of the finite difference method to calculate heat distribution in a magnetron sputtering system. A brief description of the method is given, as well as a comparison of calculations with Comsol Multiphysics.

Иванов Алексей Семёнович, студент 4 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, aliv200421@gmail.com.

Шекелевский Вадим Владимирович, аспирант 3 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, ivadim2703@gmail.com.

Научный руководитель – *Котов Дмитрий Анатольевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и радиоэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, kotov@bsuir.by.

УДК 535.015

В. Д. КАРДАШ

ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛИ НАВЕДЁННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПИКΟΣЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ В НАНОКОМПОЗИТЕ С КРАСИТЕЛЕМ

Оптимизирована модель, описывающая наведенное поглощение излучения пикосекундной длительности в композите – нанопористое стекло с полимером и красителем фталоцианином цинка, учитывающая двухфотонное поглощение. Установлено, что на двухфотонное излучение расходовалась значительная часть энергии импульсов, увеличивающая изменение коэффициента наведенного поглощения.

Сложные органические соединения, какими являются лазерные красители, привлекают внимание исследователей с момента их открытия и до настоящего времени прежде всего уникальными своими свойствами и находят в связи с этим всё большее практическое применение. В последнее время уделяется внимание использованию лазерных красителей в композитных соединениях. Работа с композитным твердотельным материалом должна обеспечить большую стабильность оптических свойств, значительно снизить температурную зависимость показателя преломления и другие важные характеристики, обеспечивая постоянство концентрации молекул.

При исследовании новых активных лазерных сред и композитных в частности, работающих при высоких интенсивностях излучения, важно обратить внимание на все физические процессы, заметно влияющие на параметры данных сред. Прежде всего речь идёт о учёте такого процесса как двухфотонное поглощение [1].

На нелинейно-оптические свойства композитных материалов определённым образом влияют все его компоненты, однако, как правило, определяющая роль принадлежит красителю [2].

Учёт соответствующих процессов можно провести исходя из схемы энергетических уровней красителя [3], которая, позволяет описать процессы с учетом наведенного поглощения в каналах S – S – и T – T-уровней энергии, учесть спонтанные, безызлучательные и интеркомбинационные процессы.

Исходя из указанной энергетической схемы с учётом двухфотонного поглощения излучения была записана следующая система уравнений.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} S_1(t) &= k_S \cdot S_{14}(t) + k_S \cdot S_{20}(t) + P(t) \cdot \sigma_S \cdot (S_{25}(t) - S_1(t)) - \\ &\quad - k_{ST} \cdot S_1(t) - k_{S0} \cdot S_1(t), \\ \frac{d}{dt} S_{14}(t) &= P(t) \cdot \sigma_{S0} \cdot (1 - S_1(t) - 2 \cdot S_{14}(t) - S_{20}(t) - S_{25}(t) - \\ &\quad - T_{10}(t) - T_{15}(t) - T_{20}(t) - T_{22}(t) - S_{01}(t) - S_{27}(t)) - k_S \cdot S_{14}(t), \\ \frac{d}{dt} S_{20}(t) &= k_{S2} \cdot S_{25}(t) - k_S \cdot S_{20}(t) + k_{S2} \cdot S_{27}(t), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} S_{25}(t) &= P(t) \cdot \sigma_s \cdot (S_1(t) - S_{25}(t)) - k_{S2} \cdot S_{25}(t), \\
\frac{d}{dt} T_{15}(t) &= k_{ST} \cdot S_1(t) - k_T \cdot T_{15}(t), \\
\frac{d}{dt} T_{10}(t) &= -P(t) \cdot \sigma_T \cdot T_{10}(t) - k_{TS} \cdot T_{10}(t) + k_T \cdot T_{15}(t) + k_T \cdot T_{20}(t), \\
\frac{d}{dt} T_{22}(t) &= P(t) \cdot \sigma_T \cdot T_{10} - k_T \cdot T_{22}(t), \\
\frac{d}{dt} T_{20}(t) &= k_T \cdot T_{22}(t) - k_T \cdot T_{20}(t), \\
\frac{d}{dt} S_{01}(t) &= k_{TS} \cdot T_{10}(t) - k_{S0} \cdot S_{01}(t), \\
\frac{d}{dt} S_{27}(t) &= P(t)^2 \cdot \sigma_2 \cdot (1 - S_1(t) - S_{14}(t) - S_{20}(t) - S_{25}(t) - \\
&\quad - T_{10}(t) - T_{15}(t) - T_{22}(t) - T_{20}(t) - S_{01}(t) - S_{27}(t)) - k_{S2} \cdot S_{27}(t);
\end{aligned}$$

где $P(t)$ – интенсивность пучка накачки, N – концентрация частиц в образце, S_i – населённость соответствующих возбужденных синглетных состояниях, T_i – населённость соответствующих возбужденных триплетных состояниях, σ_i – сечение перехода. Коэффициенты k_{ij} отвечают за безызлучательную релаксацию состояния i на переходе $i - j$.

Решение системы уравнений (1) дает как зависимость пропускания образца от интенсивности лазерного излучения $T = T(I)$. Значениям показателей качества соответствует наибольшее изменение поглощения молекулы при действии излучения, что реализуется при наибольшем изменении населенностей энергетических уровней молекулы.

При моделировании воздействия мощного излучения на образец с красителем, использовались параметры красителя фталоцианин цинка: $N = 4,22 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\sigma_{S0} = 2,6 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, $\sigma_S = 10^{-17} \text{ см}^2$, $k_{S0} = 1,0 \text{ нс}^{-1}$, $k_S = 10^3 \text{ нс}^{-1}$, $k_{ST} = 0,1 \text{ нс}^{-1}$, $k_{S2} = 400 \text{ нс}^{-1}$, $k_T = 10^3 \text{ нс}^{-1}$, $\sigma_T = \sigma_S$, $\sigma_2 = \sigma_{S0}\sigma_S$, $k_{TS} = 0,5 k_{ST}$.

Длительностью импульсов возбуждения была принята равной 70 пс.

Результаты исследований изменения населённости энергетических состояний молекул красителя в нано-композите, полученные в результате численного решения системы уравнений (1), приведены на рисунке 1.

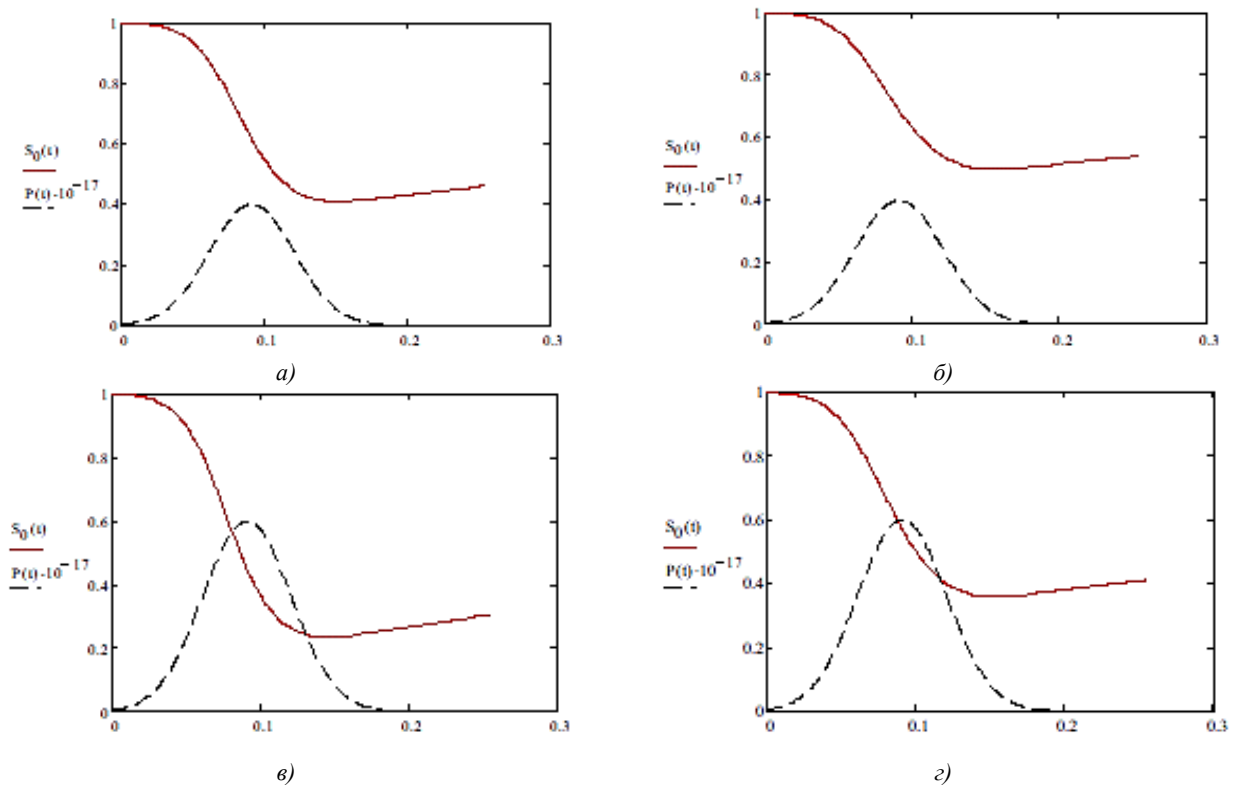


Рисунок 1 – Зависимости населённости энергетического уровня S_0 (сплошная) и интенсивности излучения $P(t)$ (прерывистая) от времени (нс); $I = 4,0 \cdot 10^{16} \text{ фотон/см}^2$ – а и б, $I = 6,0 \cdot 10^{16} \text{ фотон/см}^2$ – в и г, с учётом двухфотонного поглощения излучения – графики а и в, без его учёта – графики б и г

Под действием излучения при его максимальном значении $I = 4,0 \cdot 10^{16}$ фотон/см² населённость энергетического состояния S_0 значительно, почти на 60 %, уменьшается с учётом двухфотонного поглощения излучения (рисунок 1а). Без учёта двухфотонного поглощения соответствующее уменьшение населённости состояния S_0 заметно меньше – на 50 % (рисунок 1б). Увеличение максимального значения интенсивности излучения до $I = 6,0 \cdot 10^{16}$ фотон/см² приводит к ещё большему снижению населённости состояния S_0 (на 75 %) (рисунок 1в). Без учёта двухфотонного поглощения соответствующее уменьшение населённости S_0 было на 64 % (рисунок 1г).

Вычислив значения населённостей при соответствующей интенсивности возбуждающего излучения может быть определен коэффициент поглощения

$$\alpha(t) = \sigma_{S_0} S_0(t) + \sigma_2 S_0(t) P(t) + \sigma_S S_1(t) + \sigma_T T_{10}(t), \quad (1)$$

изменение во времени которого приведено на рисунке 2.

Выполнены численные исследования нелинейного поглощения излучения образцом нанопористого стекла с полимером и красителем фталоцианином цинка при импульсном возбуждении излучением длительностью 70 пс показали: 1. Зависимость коэффициента поглощения в исследованных условиях имеет сложный характер. Коэффициент поглощения с учётом двухфотонного поглощения излучения вначале увеличивается, достигает максимального значения, а затем уменьшается до своего минимального значения с последующим слабым ростом (рисунок 2а и рисунок 2б). Увеличение поглощения заканчивается до того момента, как воздействующий импульс излучения достигнет своего максимума. Минимум поглощения достигается тогда, когда заканчивается действие излучения. Увеличение интенсивности излучения приводило к росту максимума поглощения (рисунок 2в).

При отсутствии двухфотонного поглощения излучения увеличения поглощения не наблюдается, а разность между максимальным и минимальным его значениями наименьшая.

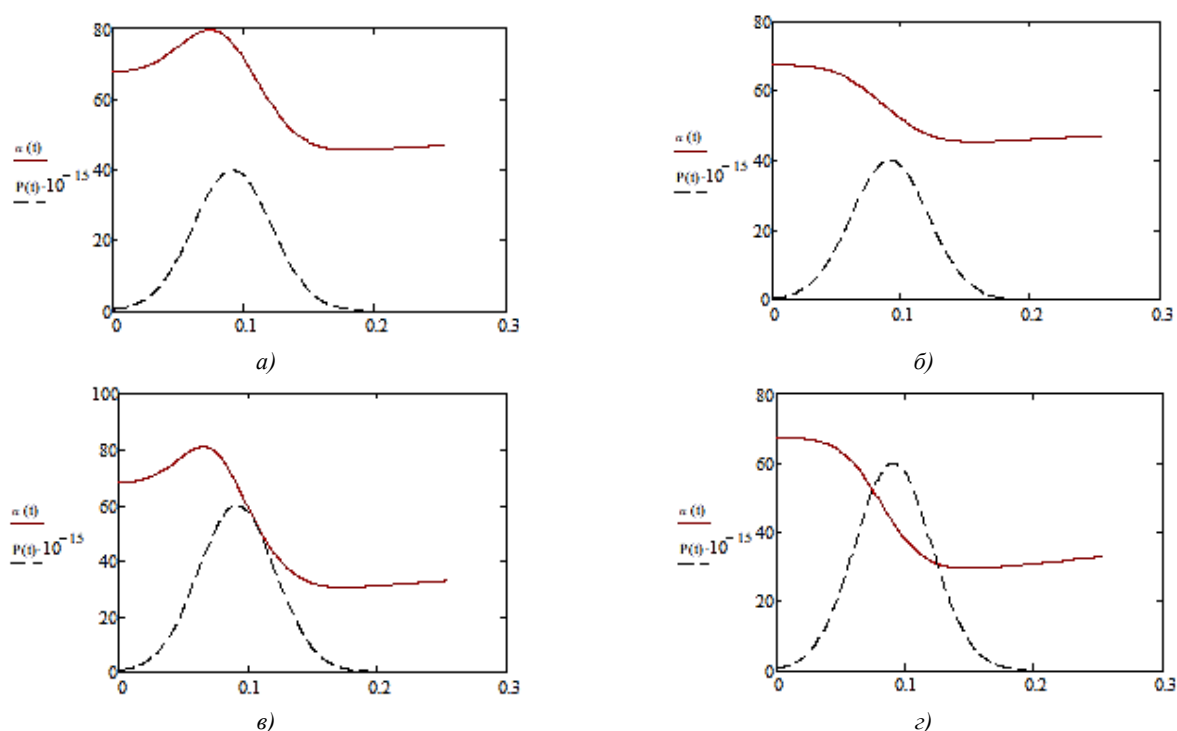


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента поглощения (сплошная) и интенсивности излучения $P(t)$ (прерывистая) от времени (нс); $I = 4,0 \cdot 10^{16}$ фотон/см² – а и б и $I = 6,0 \cdot 10^{16}$ – в и г, с учётом двухфотонного поглощения излучения – графики а и в, без его учёта – графики б и г

Список литературы

1. Шен, И. Р. Принципы нелинейной оптики : пер. с англ. / И. Р. Шен ; под ред. С. А. Ахманова. – М. : Наука, 1989. – 560 с.
2. 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.
3. 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.

A model describing the induced absorption of picosecond radiation in a composite: nanoporous glass with a polymer and zinc phthalocyanine dye, taking into account two-photon absorption, has been optimized. It has been established that a significant portion of the pulse energy was spent on two-photon radiation, increasing the change in the induced absorption coefficient.

Кардаш Валерий Дмитриевич, студент 4 курса физико-технического факультета (специальность «Компьютерная физика») Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, kardash.valer@gmail.com.

Научный руководитель – *Курстак Владислав Юзефович*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, vkurst@grsu.by.

УДК 523.681,533.9.082.5

Н. А. ОРЕХОВА, Е. В. АБРАМЕНКО, М. А. МАРТЫНОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОБОЯ СТАЛЕЙ И МЕТЕОРИТА БРАГИН МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии исследованы процессы пробивки нескольких марок сталей и метеорита Брагин. Результаты по легированным сталям позволяют определить среднюю толщину снимаемого слоя за импульс и оценить среднюю толщину пробиваемого слоя в железных и железокремниевых метеоритах.

Метеориты были и, несмотря на интенсивное развитие космических исследований, остаются ключевым, а часто и единственным источником информации о протопланетной и ранней планетной истории Солнечной системы. По составу все метеориты делят на три группы: каменные, железокремниевые, железные. Железные метеориты преимущественно состоят из железа и никеля. Железокремниевые метеориты состоят из примерно равных частей каменного (силикатного) и железистого (металлического) материала и представлены в основном двумя классами: мезосидериты и палласиты. Метеориты с валовым содержанием Ni 6–16 мас. % и к которым, в частности относится и Брагин, имеют видманштеттену структуру и называются октаэдритами. Они образованы пересекающимися пластинами камасита, ориентированными по плоскостям октаэдра в тэните. Толщина камаситовых балок связана обратной зависимостью с валовым содержанием Ni и является основой для более детального подразделения октаэдритов на тонко-, средне-, грубо- и весьма грубоструктурные октаэдриты, с примерными размерами балок 0,6, 0,6–1, 3, 1,3–3,3 и более 3,3 мм [1].

Целью настоящей работы являлась разработка методики оценки толщины балок в железных и железокремниевых метеоритах типа Брагин методом лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии. Для анализа использовался лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Лазерное излучение фокусируется на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 104 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм. Энергия импульсов 35 мДж. Интервал между двоекными импульсами 10 мкс.

Для более точного определения начала пробоя мишени стальная пластинка наклеивалась на подложку из алюминиевого сплава Д16Т.

На рисунок 1а в качестве примера приведена зависимость интенсивности линий железа и алюминия от номера импульса для образца трансформаторной стали с содержанием кремния порядка 3,8 %. Толщина пластинки 0,35 мм. На рисунок 1б аналогичная зависимость для образца чистого железа толщиной 0,25 мм.

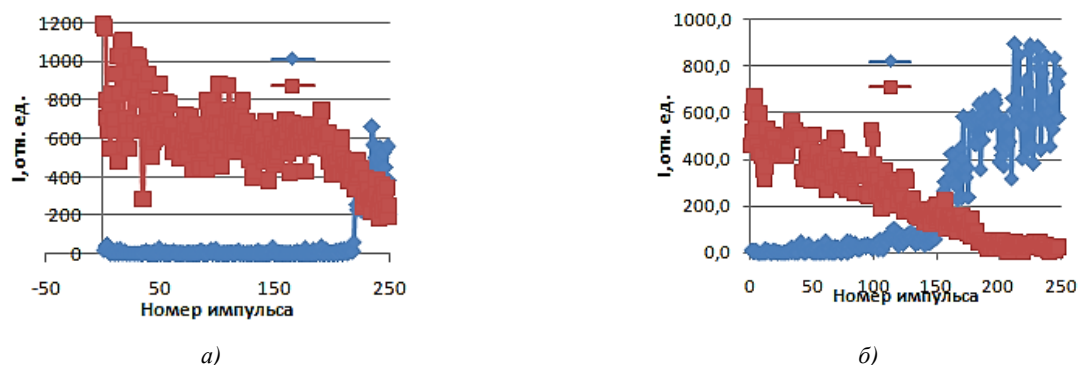


Рисунок 1 – Зависимость интенсивности линий железа (404,581 нм) и алюминия (396,158 нм) от номера импульса в образцах: а – трансформаторная сталь; б – чистое железо

Аналогичным образом была изучена глубина пробоя для других образцов сплавов железа: кровельная сталь, сталь 2412 толщиной 0,51 мм. В качестве образца близкого по составу к метеоритам использована пластинка нержавеющей стали марки А2 (прокат). Содержание железа 65–70 %, никеля 10–12 %.

Практически для всех легированных сталей средняя скорость абляции примерно равна 1,5 мкм. Для нелегированной кровельной стали значение несколько больше $\approx 1,7$ – $1,75$ мкм. С использованием полученных результатов оценены примерные толщины балок в метеорите Брагин.

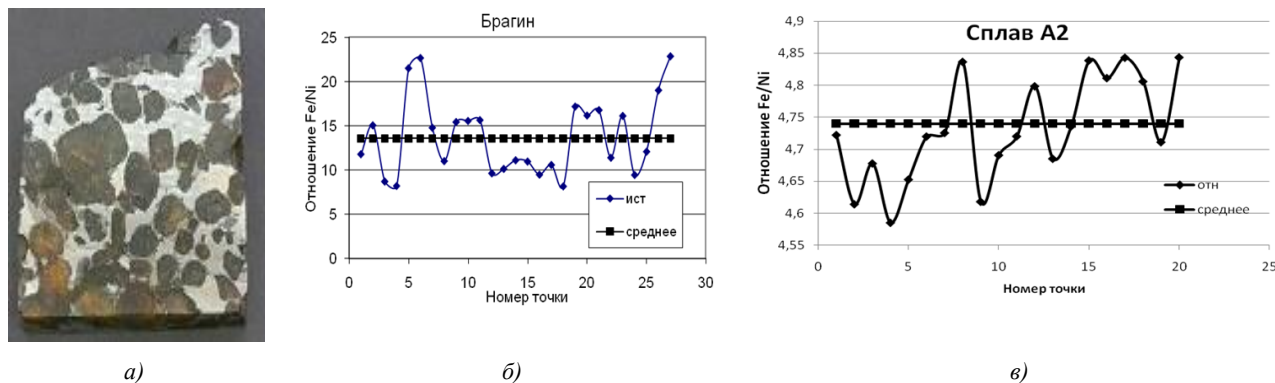


Рисунок 2 – а – снимок поверхности образца; б и в – отношение интенсивностей линий Fe/Ni в образцах

Анализ приведенных на рисунке 2б результатов позволяет сделать предположение о наличии в метеорите трех типов октаэдритов: средне-, грубо- и весьма грубоструктурных. В образце сравнения (сталь марки А2), полученном путем проката, существенных отличий не наблюдается, что свидетельствует о более – менее однородном распределении атомов железа и никеля.

Валовой химический состав железо-каменных метеоритов, к которым относится и метеорит Брагин, может быть представлен следующим образом (мас. %): Fe 85,64–89,08, Ni 8,79–9,26. В чисто железных метеоритах количество никеля может быть значительно больше. Сплав Fe – Ni – Co в метеоритах представлен такими фазами, как α – Fe(Ni, Co), α_2 – Fe(Ni, Co), γ – Fe(Ni, Co) и γ – FeNi. В переходных частях метеорита зерна сплава Fe – Ni – Co могут состоять как из одной фазы, так и из смеси разных фаз. Основные металлические фазы – это α – Fe(Ni, Co) (камасит) и γ – Fe(Ni, Co) (тэнит) [2].

В работе [3] при исследовании в электропечах физических свойств трех образцов «железных» и одного железо – каменного метеоритов были изучены температурные зависимости кинематической вязкости, поверхностного натяжения и плотности. Было установлено, что вязкость расплава образца железо – каменного метеорита с оливиновыми включениями имеет в среднем полтора-кратное превышение вязкости расплавов других образцов во всем температурном диапазоне, однако при этом наблюдается существенно меньший перепад значений $\nu(t)$. Зависимость $\nu(t)$ образца метеорита с оливиновыми включениями имеет максимальную (по сравнению с другими расплавами) неравномерность как при нагреве, так и при охлаждении. Кроме того, имеется значительный гистерезис. Особенности зависимости $\nu(t)$ предположительно обусловлены, во-первых, существенной зашлакованностью, неоднородностью и неомогенностью материала образца (в том числе из-за включений оливина в металл); во-вторых, различием температур плавления собственно оливиновой и металлической фракций.

Таким образом, выполненные спектроскопические исследования характеристик приповерхностной лазерной плазмы, образуемой при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на металлические образцы, позволили определить среднюю скорость абляции. Для метеорита Брагин показано, что наибольшее отличие в верхних слоях наблюдается для никеля, железо распределено более равномерно.

Список литературы

1. Теплякова, С. Н. Петрология и геохимия железных метеоритов группы ПЕ с силикатными включениями на примере метеорита Эльга : дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 25.00.09 / С. Н. Теплякова ; ГЕОХИ РАН. – М., 2017. – С. 15–16.
2. Особенности состава и генезиса метеорита Брагин / А. И. Бахтин [и др.] // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2018. – Т. 160 (2). – С. 324–338.
3. Исследование физических свойств расплавов «железных» метеоритов / В. С. Цепелев [и др.] // Изв. высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59, № 6. – С. 392–396.

By the method of laser atomic emission multichannel spectrometry, the processes of piercing several grades of steel and the Bragin meteorite were investigated. The results for alloy steels make it possible to determine the average thickness of the removed layer per pulse and to estimate the average thickness of the penetrated layer in iron and iron-stone meteorites.

Абраменко Евгений Валерьевич, учащийся 9 класса, ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», г. Минск, Республика Беларусь.

Мартынова Мария Артёмовна, учащаяся 9 класса, ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», г. Минск, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Орехова Наталия Андреевна*, учитель астрономии, ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», г. Минск, Республика Беларусь, sotis-nil@yandex.ru.

Научный консультант – *Зажогин Анатолий Павлович*, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

УДК 616:577.35

Т. Г. ЯРЫШКИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСФУНКЦИИ СТОП С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ «FOOT EXAMINATION»

В ходе исследования методом плантографии установлены количественные характеристики отпечатков стопы. Обработку плантограмм проводили с помощью методов И. М. Чижина и В. А. Штритера. Работа проводилась на ранее разработанном программном пакете «Foot examination», предназначенном для диагностики стопы и выявления в ней патологических изменений.

Самой частой причиной постоянной усталости и болей в ногах является плоскостопие. Врожденная или приобретенная патология, связанная с изменением формы свода стопы, влечет за собой потерю амортизирующих функций, нарушение осевой нагрузки, формирование костно-хрящевых разрастаний и другие патологические изменения, существенно ухудшающие качество жизни человека. И только своевременная коррекция, направленная на восстановление биомеханики стопы, позволяет достигать стойких положительных результатов.

Цель работы: определить количественные характеристики сводов стопы у студентов различных возрастных категорий на физико-техническом факультете Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, с помощью разработанным ранее программным пакетом «Foot examination». По полученным результатам провести сравнение с уже имеющимися патологиями стопы, определенными в медицинских лечебно – профилактических учреждениях.

Существуют различные методы диагностики стопы, например: биометрические, биомеханические, рентгенографические и комплексные [1]. Диагностическая визуализация стопы позволяет быстро, неинвазивно определять анатомию и патологию. Рентгенография является стандартным методом начальной диагностической визуализации для оценки состояния стопы и голеностопного сустава. Ряд факторов позволяет рентгенографии служить прекрасным методом обследования опорно-двигательного аппарата. Кроме того, рентгенограммы можно получить довольно быстро и недорого, что помогает клиницистам и специалистам по визуализации принимать решения и своевременно начинать терапию. Ультразвук является очень эффективным средством диагностики широкого спектра заболеваний стопы и голеностопного сустава, особенно проблем с открытыми тканями и является абсолютно безопасной, неинвазивной и безболезненной диагностической процедурой. Компьютерная томография используется в ортопедии для диагностики и лечения проблем со стопой или голеностопным суставом.

В данном исследовании для получения плантограммы-подошвенной поверхности стопы – использовалась подставка, способная выдерживать большие нагрузки, и специально подобранная краска, и водозадерживающая ткань. Обратную сторону ткани подкрашивали краской, затем ставили на ткань пациента, у которого под покрашенной тканью находился лист бумаги [2]. Перед снятием отпечатка обследуемый должен принять привычную осанку, ему предлагалось стать удобно. После снятия отпечатка подошвенной поверхности его фотографировали и полученные снимки обрабатывали написанной программой «Foot examination».

Для написания программы использовалась среда разработки: «IntelliJ IDEA Community Edition 2022.2.1». IntelliJ IDEA – это интеллектуальная контекстно-зависимая среда разработки, которая применяется для написания, исполнения, отладки и оптимизации кода на таких языках программирования, как: Java, Kotlin, Scala, Groovy. При разработке приложения использовался язык программирования Java. Java – мультифункциональный объектно-ориентированный язык программирования со строгой типизацией. К преимуществам Java можно отнести: простота, безопасность, производительность, надёжность, динамичность, возможность параллельной разработки. Для создания графического интерфейса использовался JavaFX, FXML, CSS. Обработка отпечатков стопы проводилась методом В. А. Штритера и И. М. Чижина.

Компьютерная обработка отпечатков стопы позволяет анализировать и рассчитывать параметры, индексы и углы, помогающие определить различного рода нарушения, наличие, а также тип плоскостопия. Компьютерная плантография дает возможность обеспечить качество и скорость расчетов. Компьютерная плантография не используется как самостоятельный метод диагностики плоскостопия, а применяется совместно с осмотром вра-

ча хирурга-ортопеда. Заболевания стопы заставляют испытывать дискомфорт, боль, и если не принимать своевременные меры, то это приведет к проблемам с опорно-двигательным аппаратом. Учитывая данную проблему, необходима компьютерная диагностика стопы.

В ходе исследования были определены количественные характеристики сводов стопы у студентов различных возрастных категорий на физико-техническом факультете Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, было выполнено:

- 1) с использованием плантографа получили снимок стопы и оцифровку стопы на автоматизированном программно-аппаратном комплексе;
- 2) вычисление индексов стопы (с использованием автоматизированного программно-аппаратного комплекса);
- 3) формирование отчета.

Пример обработки данных двумя методами представлен на рисунке 1 (В. А. Штритера) и на рисунке 2 (И. М. Чижина).

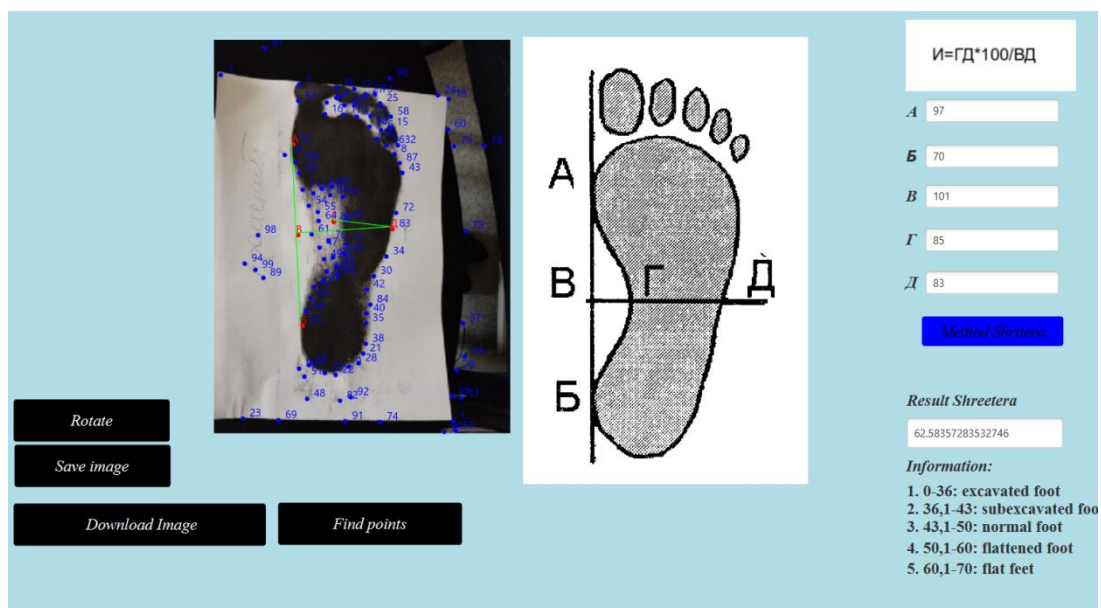


Рисунок 1 – Обработка стопы методом В. А. Штритера

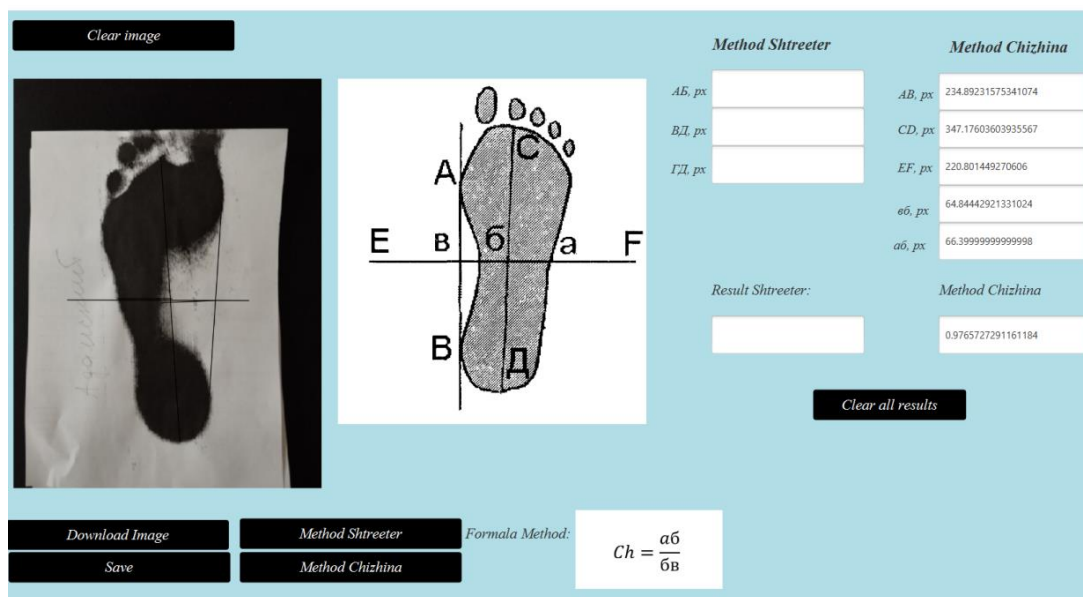


Рисунок 2 – Обработка стопы методом И. М. Чижина

Часть испытуемых имели выраженное продольное плоскостопие, а также уплощение стопы, остальные были без особенностей и патологий. Согласно результатам проведенного анкетирования, у студентов, имеющих дистрофические изменения стопы, определенные в медицинских лечебно-профилактических учреждениях, наблюдалась хорошая корреляция с полученными нами результатами.

Список литературы

1. Биомеханика и коррекция дисфункций стоп / под ред. А. И. Свиридѐнка, В. В. Лашковского. – Гродно : ГрГУ, 2009. – 279 с.
2. Разработка программы «Footexamination» для исследования дисфункции стопы / В. В. Вашина ; науч. рук. О. А. Жарнова // Физика конденсированного состояния : материалы XXXI междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов. (Гродно, 13–14 апр. 2023 г.) / Гродн. гос. ун-т им. Янки Купалы ; гл. ред. Г. А. Гачко ; редкол.: О. А. Жарнова [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2023. – С. 157–159.

During the study, quantitative characteristics of footprints were established using the plantography method. The plantograms were processed using the methods of I. M. Chizhin and V. A. Shtriter. The work was carried out using the previously developed software package «Foot examination», designed for foot diagnostics and detection of pathological changes in it.

Ярышкіна Тат'яна Геннад'евна, преподаватель-стажѐр кафедры медицинской и биологической физики Гродненского государственного медицинского университета, г. Гродно, Республика Беларусь, atanasja@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, г. Гродно, Республика Беларусь, zharik783@tut.by.

УДК 523.681,533.9.082.5

А. О. ПУХТЕЕВ, Р. А. ХАРИТОНЧИК, Н. А. ОРЕХОВА

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНЫХ МЕТЕОРИТОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Обосновано внеземное происхождение и принадлежность всех исследуемых образцов к группе железных метеоритов. Определено среднее значение содержания никеля в образцах (около 7 %), что подтверждает их принадлежность к железным метеоритам. Методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии в одном из образцов выявлен грубофруктурный элемент видманштеттеновой структуры.

Исследование метеоритов помогает определить состав вещества и описать геологические процессы в Солнечной системе на различных этапах ее развития. Некоторые метеориты, образовавшиеся вне Солнечной системы, несут информацию и о составе вещества за ее пределами. Согласно современной статистике [1], среди упавших на Землю за последние 100–200 лет метеоритов основная часть является каменными, на железные метеориты (сидериты) приходится 5,3–5,7 % общего количества, а на железнокаменные – всего 0,8–1,3 %.

Наибольший научный интерес представляют железные метеориты с силикатными включениями, а также железо – каменные метеориты, так как их изучение дает возможность выявить связи между железными и каменными метеоритами, то есть между железным ядром и силикатной оболочкой планетезималей.

В разное время на геологических выставках нами были приобретены металлические образцы, заявленные как фрагменты железных метеоритов (рисунок 1).



1



2



3

Рисунок 1 – Исследуемые образцы

Для образца 3 указано название метеорита и место его находки: метеорит Campodel Cielo, Аргентина [2]. Ряд исследований образца 1 был выполнен нами в предыдущие годы.

Следовательно, цель работы – показать наличие отдельных структурных элементов в железных метеоритах.

Образцы 2 и 3 имеют неправильную форму (рисунок 1), их размеры составляют 7,5×6,5×5 мм (для образца 2) и 7×7×5 мм (для образца 3). Плотность образцов 2 и 3 вычислена на основе экспериментальных данных, полученных путем их взвешивания и определения объема. Она оказалась равной 8,32 г/см³ для образца 2 и 7,85 г/см³ для образца 3. Оба значения согласуются со значением плотности железных метеоритов, которая составляет по разным оценкам около 8 г/см³ [3].

Химический анализ метеоритов производился в лаборатории аналитической спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета с помощью лазерного многоканального атомно – эмиссионного спектрометра LSS-1.

Плавление вещества и возбуждение плазмы в спектрометре осуществляется излучением двухимпульсного неодимового лазера с регулируемой энергией и интервалом между импульсами (модель LS2131 DM). Лазер обладает широкими возможностями как для регулировки энергии импульсов (от 10 до 80 мДж), так и временного интервала между импульсами (от 0 до 100 мкс). Лазер может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц и максимальной энергией излучения каждого из сдвоенных импульсов до 80 мДж на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов ≈15 нс. Временной сдвиг между сдвоенными импульсами может изменяться с шагом 1 мкс. Динамику развития процессов абляции и приповерхностного образования плазмы исследовали по атомно-эмиссионным спектрам при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на анализируемую поверхность образцов. Первый импульс испаряет тонкий слой образца. Второй импульс возбуждает полученные пары, спектр излучения которых регистрирует спектрометр.

Метод лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии (ЛАЭМС) позволяет определять не только качественный, но и количественный состав исследуемых образцов. Зависимость интенсивности спектральных линий от концентрации соответствующего химического элемента является логарифмической, поэтому для определения концентрации никеля в изучаемых железных метеоритах необходимо построить градуировочные графики, посредством определения интенсивности спектральных линий в образцах с известным содержанием никеля. Построенные нами градуировочные графики представлены на рисунке 2.

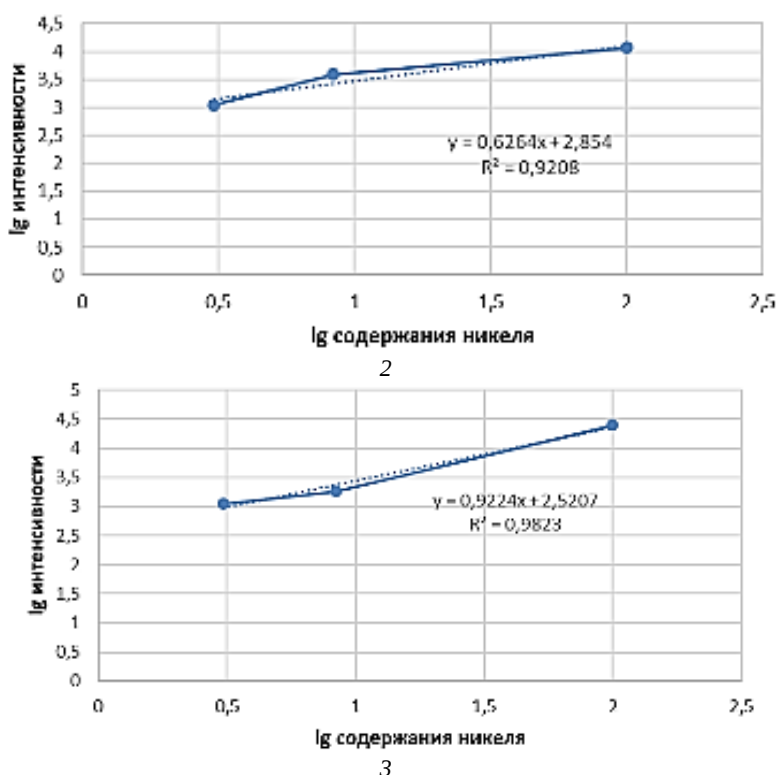


Рисунок 2 – Градуировочные графики для определения содержания никеля: сверху – для образца 2; внизу – для образца 3

Как видно, графики хорошо описываются линейной зависимостью, где x – логарифм содержания никеля, y – логарифм интенсивности спектральной линии 352–411 нм.

Таким образом, среднее значение содержания никеля в образце 2 будет 7,4 %, а в образце 3 – 6,9 %. Содержание никеля в образцах говорит о том, что это фрагменты железных метеоритов, которые состоят в основном

из камасита – разновидности самородного железа, содержащего от 4 % до 7,5 % никеля и встречающегося только в метеоритах [1].

Изучавшийся ранее образец 1 имеет достаточно большую поверхность спила и элементы его видманштеттеновой структуры будут иметь заметную протяженность. Структуру образуют пересекающиеся пластины камасита, ориентированные по плоскостям октаэдра в тэните. Толщина камаситовых балок является основой для подразделения октаэдритов на тонко-, средне-, грубо- и весьма грубоструктурные с примерными размерами балок 0,6; 0,6–1, 3; 1,3–3,3 и более 3,3 мм [3].

Для выявления элементов видманштеттеновой структуры образец 1 был пробит в двух областях (рисунок 3). В каждой точке области (а) количество сдвоенных импульсов составляло 20, в области б – 50, т. е. метеорит был пробит на глубину 34 мкм в области (а) и на глубину 85 мкм в области б.

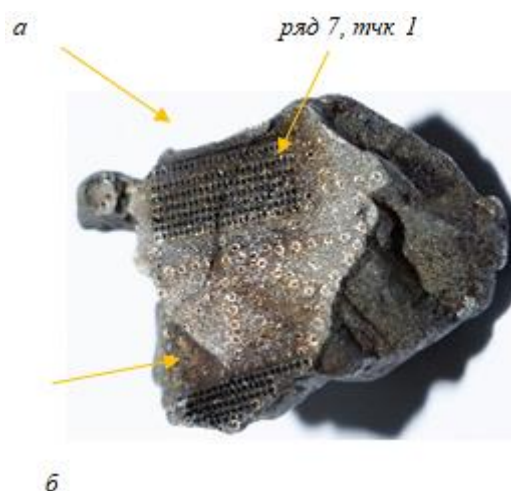


Рисунок 3 – Исследуемые области образца 1

В области (а) пробито 7 рядов с интервалом между точками 0,3 мм и 0,25 мм между рядами. В области (б) пробито 5 рядов с интервалом между точками 0,4 мм и между рядами 0,3 мм. На данный момент исследуется область а.

На рисунке 4 показана зависимость отношения интенсивностей линий Fe и Ni от номера точки на поверхности спила. Из данных рисунка видно, что концентрация никеля во всех точках исследуемой части спила различается. В определенных рядах выделяются места с повышенной концентрацией никеля, что свидетельствует о наличии фрагментов видманштеттеновой структуры на спиле железного метеорита. Учитывая то, что на рисунке приведены отношения суммарных интенсивностей элементов по 20 слоям, то есть на глубину 34 мкм, для выявления более мелких элементов структуры необходимо изучить распределение никеля в каждом слое.

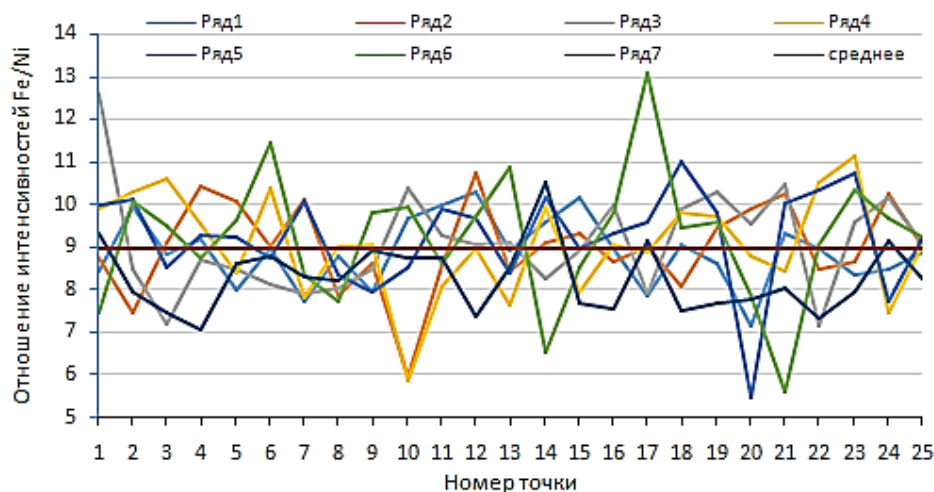


Рисунок 4 – Зависимость отношения интенсивностей линий Fe и Ni в спектрах спила образца от номера точки на поверхности спила

Тем не менее, на рисунке 4 выделяется ряд 7, показанный отдельно на рисунке 5.

На рисунке 5 видно, что почти по всей длине ряда 7 количество никеля выше среднего значения. Между точками 2 и 13 располагается камаситовая балка шириной 3,3 мм с оторочкой тэнита шириной примерно 0,5 мм слева и 0,2 мм справа. Таким образом, мы выявили грубоструктурный элемент видманштеттеновой структуры. Далее в ряду имеются включения тэнита шириной около 0,5 мм (точки 15 и 16) и шириной около 1,5 мм между точками 18–23. Точка 4 выделяется самым большим содержанием никеля, составляющим 8 %.

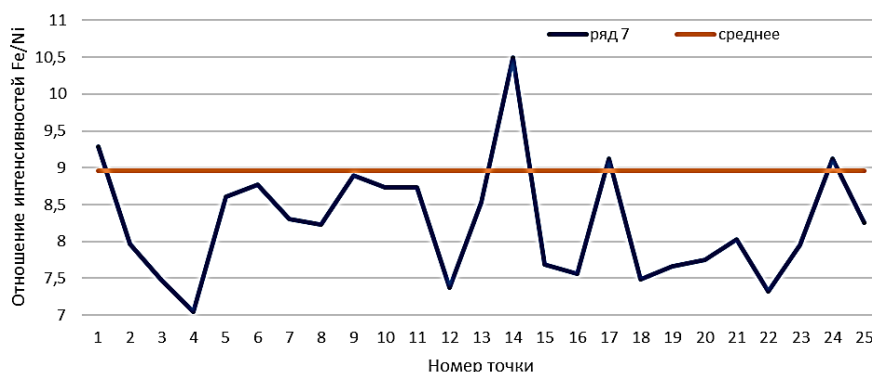


Рисунок 5 – Зависимость отношения интенсивностей линий Fe и Ni в спектрах сплава образца от номера точки на поверхности сплава в ряду 7

Список литературы

1. Железный метеорит Большой Долгучан: результаты минералого-геохимических исследований / В. И. Силаев [и др.] // Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2016. – Т. 7. – С. 10–18.
2. Минералого-геохимическое исследование и классификационные признаки железного метеорита с силикатными включениями Маслянино [Электронный ресурс] / Д. С. Пономарев [и др.]. – Режим доступа: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/e1d/e1db3f230f98dd53c6e0dfe98af71173.pdf?ysclid=m3leaf53la498437416>. – Дата доступа: 17.11.2024.
3. Теплякова, С. Н. Петрология и геохимия железных метеоритов группы ПЕ с силикатными включениями на примере метеорита Эльга : дис. канд. геол.-минерал. наук : 25.00.09 / С. Н. Теплякова ; ГЕОХИ РАН. – М., 2017. – С. 15–16.

The work substantiates the extraterrestrial origin and belonging of all the studied samples to the group of iron meteorites. The average value of the nickel content in the samples (about 7 %) was determined, which confirms their belonging to iron meteorites. by the method of laser atomic emission multichannel spectrometry, a coarse – structural element of the Widmanstätten structure was detected in one of the samples.

Пухтеев Александр Олегович, учащийся 11 класса, ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», г. Минск, Республика Беларусь.

Харитончик Роман Александрович, учащийся 11 класса, ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», г. Минск, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Орехова Наталия Андреевна*, учитель астрономии, ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», г. Минск, Республика Беларусь, sotis-nil@yandex.ru.

Научный консультант – *Зажогин Анатолий Павлович*, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

УДК 533.9.924:621.793.18

М. С. ЦВЕРОВ, В. В. ШЕКЕЛЕВСКИЙ

РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ

Описывается метод расчета распределения электрических полей в разрядном промежутке между анодом и катодом магнетронной распылительной системы, основанный на решении уравнения Пуассона методом конечных разностей. Приводится краткое описание методики, а также сравнение с результатами расчета методом конечных элементов.

В настоящее время одним из наиболее распространенных методов получения тонкопленочных покрытий является магнетронное распыление. Данный метод позволяет наносить пленки из различных материалов в ши-

роком диапазоне рабочих параметров. Из-за большой важности данного метода в промышленности значительную роль играет разработка численных методов моделирования процесса магнетронного распыления для упрощения проектирования и наладки магнетронных распылительных устройств. Одним из наиболее важных факторов, влияющим на процесс плазмообразования, является распределение электрического поля в разрядном промежутке, которое влияет на процесс ионизации рабочего газа, распыление материала мишени и осаждение материала на подложке.

Для расчета электрических полей было использовано двухмерное уравнение Пуассона, преобразованное для случая распределения электростатического поля [1]:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon},$$

где V – электростатический потенциал, ρ – объёмная плотность заряда, ε – диэлектрическая проницаемость.

Для решения данного уравнения использовался метод конечных разностей, как наиболее простой и пространственный метод решения дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных. В нашем случае использовалась неявная разностная схема, в виду ее абсолютной устойчивости. Для решения неявной схемы применялся метод прогонки, который не применим для стационарных уравнений. Для обхода данного ограничения производится модификация уравнения (1) с применением фиктивной производной по времени [2]:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + \frac{\rho}{\varepsilon}.$$

Данный способ работает в виду того, что граничные условия не зависят от времени, а при $t \rightarrow \infty$ решение стремится к стационарному $\frac{\partial V}{\partial t} \rightarrow 0$.

При этом разностный шаблон неявной разностной схемы имеет вид

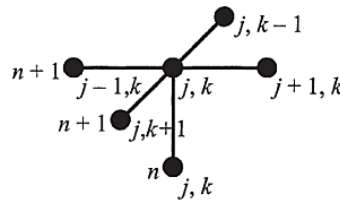


Рисунок 1 – Разностный шаблон неявной разностной схемы, аппроксимирующей дифференциальное уравнение второго порядка параболического типа

Для данного шаблона была построена равномерная квадратная разностная сетка, состоящая из 100 на 100 узлов, где j, k – индексы узлов разностной сетки, $n, n+1$ – итерация в момент времени t и $t + \Delta t$ соответственно. Расстояния между узлами для упрощения приняты за единицу. На поверхности электродов используются граничные условия первого рода.

В результате аппроксимации каждой производной в дифференциальном уравнении (2) было получено его конечно – разностное представление:

$$\frac{V_{j,k}^{n+1} - V_{j,k}^n}{\Delta t} = \left(\frac{V_{j+1,k}^{n+1} - 2V_{j,k}^{n+1} + V_{j-1,k}^{n+1}}{h_x^2} + \frac{V_{j,k+1}^{n+1} - 2V_{j,k}^{n+1} + V_{j,k-1}^{n+1}}{h_y^2} \right) + \frac{\rho}{\varepsilon}.$$

Для дальнейшего решения использовался метод расщепления, как наиболее простой метод решения неявной разностной схемы, заключающая в представлении неявной разностной схемы в виде двух схем, решаемых отдельно методом прогонки.

Напряженность электростатического поля рассчитывалась по следующим конечно-разностным схемам:

$$E_x = \frac{\varphi_{i+1,j,k}^n - \varphi_{i-1,j,k}^n}{2h}, E_y = \frac{\varphi_{i,j+1,k}^n - \varphi_{i,j-1,k}^n}{2h}, E_z = \frac{\varphi_{i,j,k+1}^n - \varphi_{i,j,k-1}^n}{2h}.$$

Для решения данной задачи нами была написана программа с использованием языка программирования Python 3.10 и сторонними бесплатными библиотеками для этого языка. Для расчета была использована упрощенная схема магнетронной распылительной системы с плоской мишенью диаметром 40 мм, состоящей из заземленной камеры, двух заземленных анодов и катода-магнетрона, с заданным потенциалом в -500 В.

В результате решения уравнения Пуассона за 3000 итераций метода прогонки было получено распределение электростатического потенциала и напряжённости поля в разрядном промежутке магнетронной распылительной системе. Все данные были сравнены с результатом расчета в программном обеспечении ComsolMultiphysics [3].

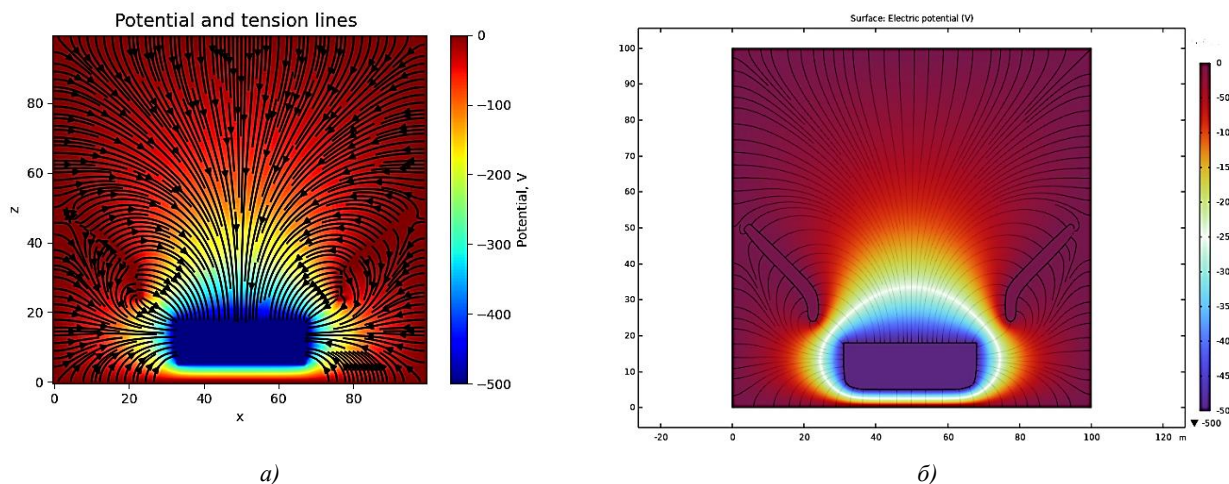


Рисунок 2 – Распределение электростатического потенциала и вектора напряжённости поля в Python (а) и ComsolMultiphysics (б)

Для более наглядного сравнения был получен срез с распределением потенциала вдоль оси z через центр магнетрона.

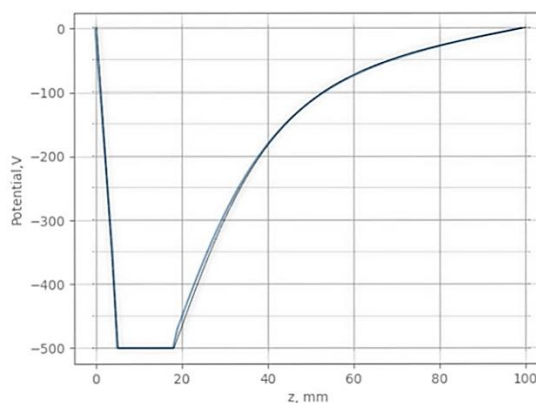


Рисунок 3 – Сравнение результатов расчётов ComsolMultiphysics и Python

Был построен график относительной погрешности по оси Z для сравнения результатов Python относительно ComsolMultiphysics.

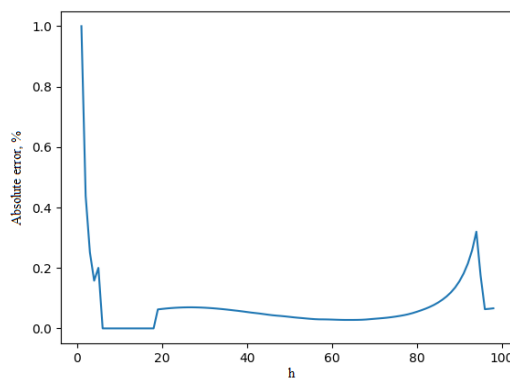


Рисунок 4 – Абсолютная погрешность результатов расчёта

Как видно из рисунка 4, расчеты, полученные с использованием написанной нами программы на Python, показывают хорошее соответствие с расчетами ComsolMultiphysics, с отклонением порядка 1 %.

Таким образом рассмотрено применение метода конечных разностей для моделирования электростатических полей в магнетронной распылительной системе. Приведено краткое описание реализации метода, а также сравнение с расчетом в ComsolMultiphysics. По результатам сравнения показано, что средняя получаемая относительная погрешность вычислений меньше 1 %, что говорит о правильности используемой методики и ее применимости для решения практических задач.

Список литературы

1. Усачёв, А. Е. Методы расчета электрических полей / А. Е. Усачёв // КГЭУ. – 2013. – 112 с.
2. Кольцова, Э. М. Численные методы решения уравнений математической физики и химии : учеб. пособие / Э. М. Кольцова, А. С. Скичко, А. В. Женса. – М. : Юрайт, 2024. – 220 с.
3. Sandip, Ghosh. Electric field calculations by numerical techniques / Ghosh Sandip // Department of electrical engineering national institute of technolog. – 2009. – 99 p.

This paper describes a method for calculating the distribution of electric fields in the discharge gap between the anode and cathode of a magnetron sputtering system, based on solving the Poisson equation by the finite difference method. A brief description of the technique is given, as well as a comparison with the results of calculation by the finite element method.

Цверов Максим Сергеевич, студент 4 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, maximtsverov@mail.ru.

Шекелевский Вадим Владимирович, аспирант 3 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, ivadim2703@gmail.com.

Научный руководитель – *Котов Дмитрий Анатольевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и радиоэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, kotov@bsuir.by.

УДК 621.373.826

А. Ю. ЧИЖЕВСКИЙ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРОВ НА КРАСИТЕЛЯХ

Рассмотрены теоретические и практические аспекты компьютерного моделирования лазеров на красителях в среде MathCad 14, на примере генерации раствора родамина 6G.

Компьютерное моделирование лазеров на красителях представляет собой важную и актуальную область исследований по ряду причин. Лазеры на красителях широко используются в науке и технике. Их уникальные свойства, такие как возможность перестройки длины волны и высокая мощность, делают их незаменимыми в спектроскопии, медицине, телекоммуникациях и других областях. Постоянное развитие этих технологий требует глубокого понимания и оптимизации их работы. Компьютерное моделирование позволяет значительно сократить расходы на проведение экспериментальных исследований. Моделирование помогает глубже понять физику процессов, происходящих в данных лазерах. Это позволяет не только объяснить наблюдаемые явления, но и предсказывать их поведение при изменении различных параметров, что важно для дальнейшего прогресса в этой области. Объектом исследования являются лазеры на красителях и их поведение при различных условиях работы. Их основные преимущества включают в себя возможность генерации излучения в различных областях спектра благодаря широкому диапазону длин волн, высокую эффективность конверсии энергии, гибкость в настройке параметров излучения и относительную экономичность производства. Эти характеристики делают их идеальными для различных приложений, включая научные исследования, медицину, материаловедение и коммуникационные технологии. [1].

Среди множества органических соединений для лазеров чаще выбирают красители кумаринового и родаминового классов: родамин 6G, кумарин 1 и родамин 110. Родамин 6G, например, излучает в оранжево-красном диапазоне (550–650 нм) и ценится за высокую квантовую эффективность (до 95 %). Кумарин 1 работает в синей области спектра и идеален для задач, требующих ультрафиолетовой накачки. Всех их объединяет стабильность в растворах и лёгкая настраиваемость под нужные условия.

В основе моделирования лазеров на красителях лежат скоростные уравнения – математические формулы, которые описывают методы расчёта генерационных параметров, а именно, как меняется состояние молекул красителя и интенсивность излучения с течением времени, позволяют предсказать, как лазер поведёт себя при увеличении мощности накачки, изменении длительности импульса или замене красителя.

Например, в простой двухуровневой модели электроны в молекуле красителя могут находиться в основном состоянии (N_1) или возбуждённом (N_2). Под действием накачки (P) они перескакивают в N_2 , но не задерживаются там надолго – через время (τ_2) возвращаются обратно, испуская фотоны. Однако, если в резонаторе уже есть интенсивное излучение (I), процесс ускоряется: фотоны «подталкивают» электроны к переходу, создавая лавину стимулированного излучения. Всё это описывается системой уравнений (1) [2]:

$$\frac{dN_2}{dt} = P - \frac{N_2}{\tau_2} - \sigma_{12}N_2I, \quad \frac{dI}{dt} = \Gamma(\sigma_{12}N_2 - \alpha)I,$$

где σ_{12} – вероятность перехода между уровнями, Γ – коэффициент усиления, а α – потери в системе.

Решение системы уравнений (1) выполняется численными методами, которые разбивают время на микроотрезки. Был использован метод Рунге – Кутты 4-го порядка, основное преимущество которого заключается в 4-кратном анализе функции, минимизирующем ошибку. Преимущество данного метода заключается в балансе между точностью и вычислительной нагрузкой, делая его идеальным для моделирования лазеров. Метод Эйлера, например, считает производную только в начальной точке шага, что приводит к накоплению ошибок. А метод Адамса – Бэшфорта, хотя и эффективен для длинных интервалов, требуют хранить предыдущие значения, усложняя код. В задачи моделирования входит не только оптимизация процессов, но и избегание возможных проблем. Так, например, если в резонатор лазера на красителях добавить дифракционную решётку, спектр генерации сужается с 60 Å до 0,6 Å, но при этом сохраняется ~60 % энергии импульса.

Несмотря на это, у численных методов есть свои ограничения. Трёхуровневые системы, где добавляется метастабильное состояние (N_3), требуют более сложных уравнений и больших вычислительных ресурсов. Здесь уже приходится учитывать переходы между тремя уровнями и дополнительные потери, усложняющие модель. Но даже в таких случаях метод Рунге – Кутты справляется, хотя и требует более мелких шагов.

При компьютерном моделировании работы лазера на красителях основная задача – расчёт динамики изменения ключевых параметров системы при импульсной накачке. Основой для расчётов послужили скоростные уравнения, описывающие поведение молекулярной системы под действием внешнего излучения. В качестве активной среды рассматривался раствор родамина 6G – один из наиболее эффективных органических красителей, демонстрирующий высокий квантовый выход излучения (до 95 %) и хорошую фотостабильность. Для этого соединения время жизни возбуждённого синглетного состояния S_1 составляет около 2 наносекунд, что и было использовано в расчётах как параметр τ_2 .

Математическая модель строилась на основе системы из нескольких связанных дифференциальных уравнений. Первое уравнение описывает изменение населённости возбуждённого уровня N_2 (2):

$$\frac{dN_2}{dt} = P(t) - \frac{N_2}{\tau_2} - \sigma_{12}N_2I.$$

Здесь $P(t)$ – мощность накачки, имеющая гауссову форму с длительностью импульса 6 нс и пиковой мощностью 15 кВт/см². Второе слагаемое учитывает спонтанное излучение, а третье – индуцированные переходы под действием генерируемого излучения интенсивности I .

Второе уравнение моделирует динамику интенсивности лазерного излучения в резонаторе (3):

$$\frac{dI}{dt} = \Gamma(\sigma_{12}N_2 - \alpha)I,$$

где $\Gamma = 0,8$ – коэффициент усиления, $\alpha = 0,05 \text{ см}^{-1}$ – коэффициент потерь в резонаторе. Сечение вынужденного перехода σ_{12} для родамина 6G принималось равным $1,2 \times 10^{-16} \text{ см}^2$, что соответствует экспериментальным данным для этого красителя.

Для численного решения системы уравнений был выбран вышеописанный метод Рунге – Кутты. Расчёты проводились в среде MathCad 14 с временным шагом 0,01 нс на интервале от 0 до 10 наносекунд. Начальные условия задавались как $N_2(0) = 0$ (все молекулы в основном состоянии) и $I(0) = 10^{-10}$ (фоновый уровень излучения).

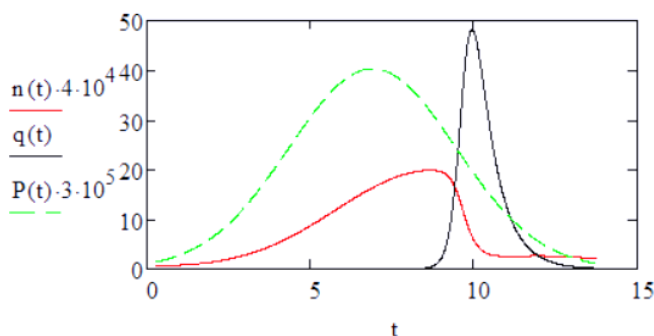


Рисунок 1 – Расчётная модель изменения населённости уровня $n(t)$, плотности фотонов генерируемого излучения $q(t)$ и интенсивности накачки $P(t)$ для красителя родамин 6G

В результате моделирования была получена зависимость во времени трёх ключевых параметров: населённости уровня $n(t)$, плотности фотонов излучения $q(t)$ и интенсивности накачки $P(t)$. Эти зависимости наглядно демонстрируют основные этапы процесса лазерного излучения: накопление инверсной населённости, запуск генерации и её последующий спад. На начальном этапе, когда $t < 7$ нс, интенсивность накачки $P(t)$ растёт, что приводит к увеличению населённости возбужденного уровня $n(t)$. Однако при этом плотность фотонов излучения $q(t)$ остаётся практически нулевой. Это объясняется тем, что процесс генерации ещё не начался – накапливается инверсная населённость, но её недостаточно для лавинообразного увеличения числа фотонов. Когда населённость достигает порогового значения, начинается резкий рост интенсивности генерации, который сопровождается скачкообразным увеличением $q(t)$. Это происходит примерно на $t \approx 9$ нс, после чего плотность фотонов быстро достигает максимума. Однако из-за истощения запасённой энергии и неизбежных потерь излучение довольно быстро ослабевает. В результате, наблюдается характерная картина [2] импульсной лазерной генерации:

1. Этап накопления инверсной населённости – рост $n(t)$ и $P(t)$, но отсутствие излучения.
2. Запуск генерации – резкий рост $q(t)$, связанный с достижением порога инверсной населённости.
3. Спад генерации – уменьшение плотности фотонов из-за истощения энергетического запаса.

Полученные данные хорошо согласуются с известными экспериментальными результатами для аналогичных лазерных систем. Время выхода на пик интенсивности (~9–10 нс) соответствует значениям, полученным в ряде работ по импульсным лазерам [3; 4]. Практическое значение этих результатов заключается в том, что они позволяют оптимизировать параметры лазерных систем. Например, управление интенсивностью накачки может существенно влиять на форму и продолжительность импульса генерации. Увеличение мощности накачки приводит к более быстрому запуску генерации, но при этом сокращает длительность импульса. Перспективным направлением развития данной модели является её усложнение с учётом пространственного распределения энергии в резонаторе, а также введение более сложных механизмов взаимодействия уровней, например, включение триплетных состояний. Эти улучшения позволят более точно предсказывать поведение лазерных систем и находить оптимальные режимы их работы.

Список литературы

1. Борейшо, А. С. Лазеры: устройство и действие : учеб. пособие / А. С. Борейшо, С. В. Ивакин. – СПб. : Лань, 2016. – С. 230–234.
2. Харанжевский, Е. В. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество : учеб. пособие / Е. В. Харанжевский, М. Д. Кривилёв ; под ред. П. К. Галенко. – Ижевск : Удмурт. гос. ун-т, 2011. – 47–49 с.
3. Влияние длины волны возбуждения на генерационные характеристики лазеров на красителях с когерентной накачкой / С. С. Ануфрик [и др.] // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2013. – № 2. – С. 111–117.
4. Тарковский, В. В. Влияние наведенных потерь на спектральную зависимость эффективности генерации родамина 6Ж при микросекундной когерентной накачке / В. В. Тарковский, С. С. Ануфрик, В. Ю. Курстак // Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51, № 6. – С. 525–532.

The article discusses theoretical and practical aspects of computer modeling of dye lasers in the MathCad 14 environment, using the example of generating a rhodamine 6G solution.

Чижевский Артемий Юрьевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, 4izyk123@gmail.com.

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

УДК 004.9

Д. В. ЛАТОШ

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА PHYSICS

Рассматривается разработка архитектуры вспомогательного программного комплекса для работы с физическими величинами. Исследование охватывает анализ существующих библиотек, их функциональные возможности и ограничения, а также обоснование необходимости создания новой библиотеки на языке C#. Основное внимание уделено вопросам типобезопасности, автоматического преобразования единиц измерения и поддержки различных систем единиц. Представлена иерархия классов разрабатываемой библиотеки, обеспечивающая удобное представление физических величин, их размерностей и операций с ними. Проведен сравнительный анализ существующих решений, выявлены их недостатки, включая узкую

направленность, закрытый код и высокую стоимость лицензий. Разработка данной библиотеки может быть востребована в научных и инженерных вычислениях, требующих точной и надежной обработки физических величин.

В современном мире физические величины имеют ключевое значение в различных областях науки, инженерии и повседневной жизни. Они применяются для измерения и описания физических явлений, а также для выполнения вычислений и моделирования процессов. Тем не менее, работа с физическими величинами может быть связана с рядом сложностей, включая необходимость учета единиц измерения, выполнения преобразований между разными системами и обеспечения типобезопасности операций.

При использовании традиционного подхода к программированию легко упустить, в каких единицах измеряются данные, что может приводить к сбоям или даже серьезным последствиям. Так, например, космический аппарат Mars Climate Orbiter, достигнув Марса, разбился о его поверхность из-за ошибок в использовании единиц измерения в разных частях программного обеспечения. По этой же причине происходили аварии в космической и авиационной технике, терпели крушения корабли и гибли люди [1].

Современные подходы включают в себя разработку специализированных библиотек классов, направлены на автоматизацию преобразований между системами единиц, проверку совместимости типов.

Создание библиотеки классов для работы с физическими величинами позволит упростить и стандартизировать обработку, обеспечивая более надежный и качественный код. Такие библиотеки критически важны для обеспечения надежности кода в научных и инженерных расчетах.

Основные проблемы в работе с физическими величинами:

1. Системы единиц и их преобразование: физические величины могут выражаться в разных единицах (метры, футы, килограммы, фунты), что требует тщательного контроля за преобразованием единиц [2].

2. Типобезопасность операций: операциям сложения и вычитания можно подвергать только величины с одинаковыми размерностями. Например, сложение массы и длины – некорректное действие, и библиотека должна уметь такие ошибки предотвращать.

3. Выражение физических величин через их размерности: согласно принципу размерности, любые физические величины можно представить, как комбинации базовых величин, что требует продуманной иерархии классов. Такие преобразования предотвращают случайные ошибки и позволяют хранить значения в удобном формате для дальнейшей обработки [3].

Таблица 1 – Сравнительный анализ кратко изложим в виде таблицы

План сравнения	Название библиотеки	PyPhys	KotUniL	PHYSICS C#	Units
Функционал		Работа с физическими величинами, преобразование единиц, поддержка размерностей, встроенные константы	Работа с физическими величинами, поддержка системы СИ	Работа с физическими величинами, преобразование единиц, поддержка размерностей, встроенные константы	Работа с физическими величинами, преобразование единиц, поддержка размерностей
Простота расширения		Средняя	Высокая	Высокая	Высокая
Поддержка C#		Нет	Нет	Да	Нет
Кроссплатформенность		Да	Да	Ограниченная	Да
Документации		Достаточная	Ограниченная	Хорошая	Обширная
Платная лицензия		Нет	Нет	Да	Нет

Обоснование создания собственной библиотеки на C#:

1. Ограниченная доступность: существующие библиотеки для работы с физическими величинами на C# немногочисленны и часто платные, что ограничивает их использование, особенно при санкциях.

2. Закрытый код: Коммерческие библиотеки обычно не предоставляют открытый код, что препятствует их модификации под проектные нужды. Собственная библиотека позволит полностью контролировать код и его архитектуру.

3. Зависимость от поставщиков: использование внешних библиотек влечет риски, связанные с обновлениями и поддержкой. Собственное решение устранил эту зависимость.

4. Соответствие специфическим требованиям: коммерческие библиотеки не всегда поддерживают нужные системы измерений и алгоритмы, тогда как своя библиотека может быть адаптирована под конкретные требования проекта.

5. Гибкость и расширяемость: создание собственной библиотеки обеспечит легкость добавления новых функций и систем измерений, сохраняя при этом структуру кода.

6. Обучение и развитие навыков: процесс разработки собственной библиотеки станет важным опытом для разработчиков, углубляя их знания в проектировании и обработке физических величин.

Таким образом, разработка собственной библиотеки на C# обеспечит независимость, гибкость и возможность точной настройки, преодолевая ограничения существующих коммерческих решений.

Иерархия классов.

Физическая величина – это свойство объекта или явления, которое можно измерить и выразить числом. Существуют фундаментальные величины, такие как длина, масса и время, и производные, например, скорость и объем, которые определяются через базовые величины. В объектно-ориентированном программировании (ООП) физические величины можно представить в виде иерархии классов. Базовый класс `PhysicalQuantity` определяет общие свойства всех физических величин. От него наследуются `FundamentalQuantity` для базовых величин и `DerivedQuantity` для производных. Такой подход позволяет упростить создание новых величин и операций с ними.

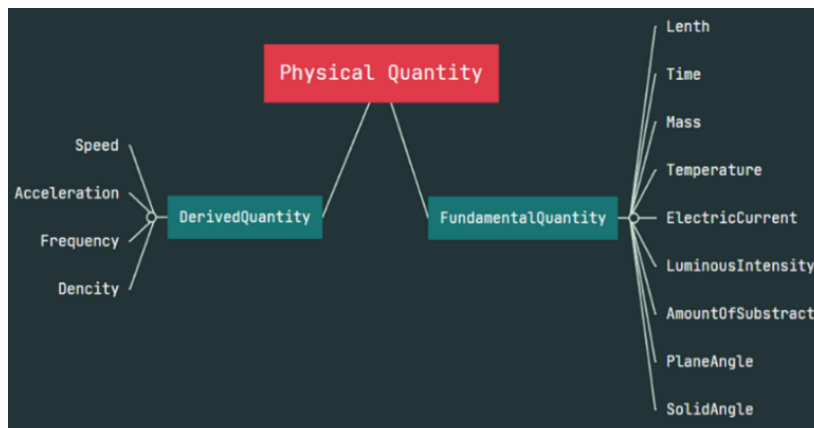


Рисунок 1 – Иерархия классов

ООП обеспечивает абстракцию, инкапсуляцию и наследование. Полиморфизм позволяет использовать единый интерфейс для различных типов величин, а иерархия классов делает систему гибкой и расширяемой. В начальный набор методов включены операции сложения, вычитания, умножения и деления, а также преобразование единиц через метод `Convert`.

Пример метода:

```

private double ConvertToMeters(double value, string fromUnit)
{
    fromUnit = fromUnit.ToLower();
    switch (fromUnit)
    {
        case «m»:
            return value;
        case «mm»:
            return value / 1000;
        case «um»:
            return value / 1_000_000;
        case «km»:
            return value * 1000;
        default:
            throw new ArgumentException($»Неизвестная единица измерения: {fromUnit}«);
    }
}

```

Пример использования конвертации:

```
double result = length.Convert(5, «km», «m»);
```

Этот код вызывает метод `Convert` у объекта `length`, передавая в него значение 5 километров («km») и указывая, что требуется конвертация в метры («m»). Результат конверсии сохраняется в переменную `result`.

Анализ существующих программных решений для работы с физическими величинами показал, что, хотя эти библиотеки предоставляют некоторый функционал для работы с единицами измерения, ни одна из них не соответствует полностью требуемым критериям и функциональным возможностям. Некоторые библиотеки имели ограниченный набор поддерживаемых единиц измерения, другие не позволяли выполнять определенные операции над физическими величинами, многие из них были коммерческими и требовали оплаты.

По результатам анализа было принято решение о разработке собственной физической библиотеки на C# для работы с единицами измерения.

Так же была разработана архитектура будущей библиотеки, иерархия классов. А именно: выбраны базовые классы, классы-наследники, их ключевые методы и свойства.

Дальнейшее развитие библиотеки может включать в себя расширение поддерживаемых физических величин и единиц измерения, улучшение производительности, а также интеграцию с существующими библиотеками и инструментами .NET экосистемы.

Данная библиотека может стать полезным инструментом для разработчиков, проектирующих приложения, связанные с научными вычислениями, инженерным моделированием и другими областями, требующими эффективной работы с физическими данными.

Список литературы

1. Сиротин, В. Магия размерностей и магия Котлина. Часть первая: Введение в KotUniL [Электронный ресурс] / В. Сиротин. – Habr, 2022. – Режим доступа: <https://habr.com/en/articles/705588>. – Дата доступа: 02.05.2023.
2. Библиотеки классов в .NET. Microsoft [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/standard/class-libraries>. – Дата доступа: 02.05.2023.
3. McConnell, S. Code Complete: A practical handbook of Software Construction (2nd ed.) / S. McConnell // Microsoft Press. – 2004. – Vol. 960.

This paper considers the development of the architecture of an auxiliary software package for working with physical quantities. The study covers the analysis of existing libraries, their functionality and limitations, as well as the rationale for creating a new library in C#. The main attention is paid to the issues of type safety, automatic conversion of units of measurement and support for various systems of units. The class hierarchy of the library being developed is presented, providing a convenient representation of physical quantities, their dimensions and operations with them. A comparative analysis of existing solutions is carried out, their shortcomings are identified, including a narrow focus, closed code and high cost of licenses. The development of this library may be in demand in scientific and engineering calculations that require accurate and reliable processing of physical quantities.

Латош Даниил Владимирович, студент 4 курса физико-технического факультета (специальность «Компьютерная физика») Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, daniillatosh585@gmail.com.

Научный руководитель – *Ситкевич Анастасия Леонидовна*, магистр физико-математических наук, старший преподаватель физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, girl-physicist@mail.ru.

УДК 53.072

М. А. ЛОБАЧ, Э. В. ШВАЛЮК, А. М. КОТКО

МОДЕЛИ ФРАКТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрены алгоритмы и разработано программное обеспечение построения алгебраических и стохастических фрактальных объектов. На примере расчета эффективного коэффициента теплопроводности композита показана зависимость этого коэффициента от фрактальной размерности.

Фракталы как геометрические объекты широко используются для описания различных структур в физике [1–4]. Различают геометрические, алгебраические и стохастические фракталы. В нашей модели мы рассмотрим алгебраические, геометрические и стохастические фракталы. Вторые позволяют понять важнейшее свойство фрактальных объектов – самоподобие, а третьи – по способу генерации очень похожи на реальные физические объекты: деревья, кристаллы, природные узоры. Алгоритмов построения алгебраических фракталов большое количество. Мы остановимся на двух фракталах: Жули и Мандельброта. Все необходимые термины мы введем по мере рассмотрения конкретных примеров, не вдаваясь в подробности обобщения (для этого есть специальная литература). Оба фрактала строятся на основе итерации комплексной функции. Пусть имеем комплексное число:

$$z = a + bi,$$

Графически это число можно отобразить на комплексной плоскости (рисунок 1) a , задавая значения действительной и мнимой частей.

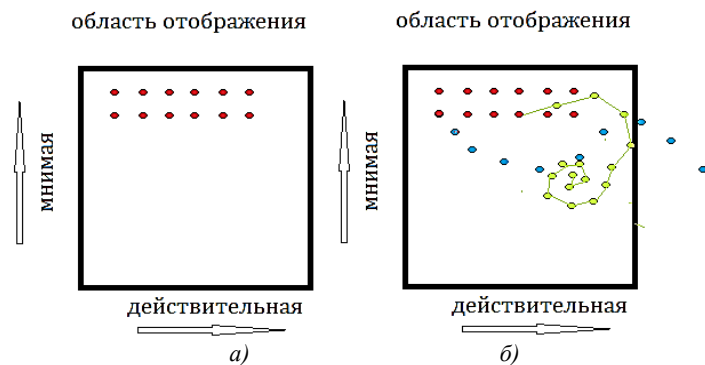


Рисунок 1 – а) отображение точек на комплексной плоскости;
б) отображение точек в результате итерационного процесса

Рассмотрим некоторую функцию от этой переменной:

$$f(z) = z^2 + c,$$

c – комплексное число (константа).

Выражение (2) частный случай многочлена, на основе которого и строятся алгебраические фракталы. Под итерациями функции $f(z)$ будем понимать последовательные значения этой функции, получаемые на основе предыдущего ее значения. Первой итерацией будем считать само комплексное число z – выражение (1). Далее, используя функцию $f(z)$, получим вторую итерацию, для которой аргументом является первая. Далее, аналогично можно получить все последующие итерации.

$$\begin{aligned} f^0(z) &= z, \\ f^1(z) &= [f^0(z)]^2 + c, \\ f^n(z) &= [f^{n-1}(z)]^2 + c; \end{aligned}$$

n – номер итерации.

В результате итераций появляется последовательность комплексных чисел, которые можно отобразить на комплексной плоскости рисунок 1б. При этом последовательность отображаемых точек может уходить в бесконечность (синие), либо собираться в некоторой малой области точки (зеленые), называемой аттрактором (бассейн аттрактора). Если отображать только точки, попадающие в бассейны аттрактора, мы получим множество Жюли. Множество точек на комплексной плоскости, которые не уходят в бесконечность при увеличении числа итераций n , образуют множества Жюли. Граница между множеством Жюли и аттрактором к бесконечности представляет собой алгебраический фрактал.

Рассмотрим алгоритм построения такого фрактала:

1. Задаем значение константы c , мнимую и действительную части C_x, C_y .
2. Определяем размеры поля отображения точек: L_x, L_y .
3. Вычисляем R для заданного полинома $f(z) = z^2 + c$.
- 4.

$$R = \frac{1 + \sqrt{1 + 4|c|}}{2}$$

$$|c| = \sqrt{C_x^2 + C_y^2}$$

$R > \sqrt{z_x^2 + z_y^2}$ – условие попадания точки в бассейн аттрактора (во множество Жюли).

5. Задаем максимальное число итераций IterCount. Значение этого числа априори установить нельзя, поэтому для него выбираем большое значение, например, 300.

6. Для каждой точки поля отображения (рисунок 1а), считая их нулевой итерацией, вычисляем итерации функции $f^n(z)$ (рисунок 1б).

7. Для каждой точки вычисляем является ли она частью заполненного множества Жюли или нет $R > \sqrt{z_x^2 + z_y^2}$, а также номер текущей итерации DefIter, на которой порог был превышен.

8. Цикл итерации продолжаем до выполнения условия $R < \sqrt{z_x^2 + z_y^2}$ – в этом случае точка не попадает во множество Жюли. Если цикл совершает максимальное число итераций IterCount, считаем, что точка попадает во множество Жюли.

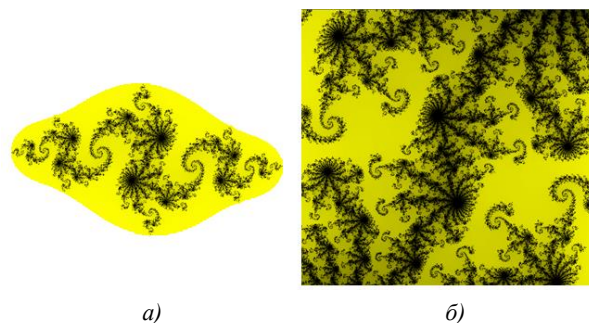


Рисунок 2 – Фрактал Жюли: а) масштаб 1, б) масштаб 5

Моделей генерирования стохастических фракталов множество. Тем не менее наиболее применяемым методом является «диффузия, ограниченная агрегацией» – DLA (Diffusion Limited Agregation) и ее модификации. Рассмотрим наиболее популярную модель – Виттена – Сандера.

Модель Виттена – Сандера. Уравнения движения частиц:

$$\begin{aligned} X_{n,k+1} &= X_{n,k} + \xi; \\ Y_{n,k+1} &= Y_{n,k} + \xi; \\ n &= 1..N, k = 0, 1, \dots; \end{aligned}$$

ξ – случайная величина, принимает значения 1 или – 1.

При построении фрактала методом Виттена – Сандера новая частица запускается, когда предыдущая прилипает к кластеру. Для ускорения процесса формирования фрактала мы одновременно запустим N частиц. Будем считать, их движения статистически независимыми. В модели Виттена – Сандера, частица, уходящая за пределы области обзора, исчезает. Мы к такой частице применим периодические граничные условия. Если частица уходит за левую (или верхнюю) границу – она появляется на правой (или нижней) границе.

Рассмотрим алгоритм расчета:

1. Исходные данные: объемная концентрация частиц.

2. Формируем сетку области отображения частиц $(N + 1) \times (N + 1)$ (рис. 2). В центр области помещаем затравочную частицу (синяя), диффундирующие частицы (красные), в количестве, пропорциональном их концентрации, случайным образом размещаем в области отображения. Диффундирующие частицы перемещаются случайным образом до соприкосновения с затравочной частицей или любой другой, которая принадлежит кластеру с затравочной частицей. Перемещение частиц осуществляется в области $(N \times N)$, отмеченной жирной линией. Дополнительные ячейки вне этой области предусмотрены для реализации периодических граничных условий.

3. После завершения формирования кластера рассчитываются фрактальная размерность, радиус гирации.

На рисунке 3 показана начальная стадия формирования кластера.

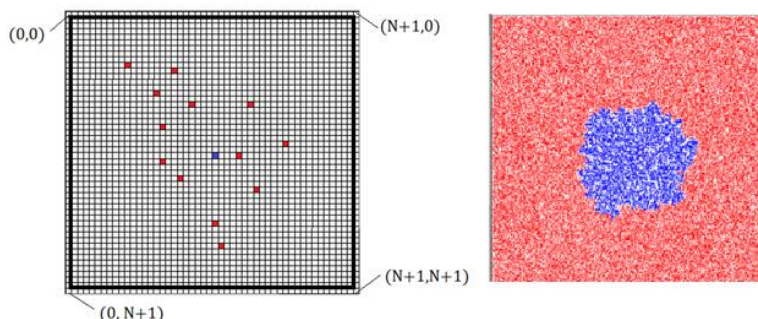


Рисунок 3 – Начальная стадия формирования кластера. Поле 600×600, концентрация частиц 0,5. Размерность 1,865

Разработанная программа использована для расчета теплопроводности композита рисунок 4. Коэффициент теплопроводности для матрицы принимался равным 2, а для наполнителя – 200.

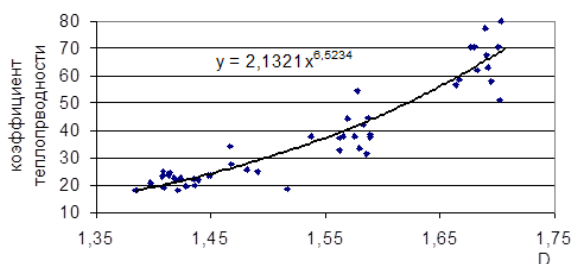


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента теплопроводности от фрактальной размерности D

Список литературы

1. Федер, Е. Фракталы / Е. Федер ; пер. с англ. – М. : Мир, 1991. – 254 с. : ил.
2. Смирнов, Б. М. Физика фрактальных кластеров / Б. М. Смирнов. – М. : Наука, 1991. – 136 с. – (Современные проблемы физики).
3. Смирнов, Б. М. Фрактальные / Б. М. Смирнов // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 149, вып. 2. – С. 177–217.
4. Фракталы в физике : материалы 6-го Междунар. симпозиума по фракталам в физике / под ред. Л. Пьетронеро. – М. : Мир, 1988. – 670 с.

Algorithms are considered and software for the construction of algebraic and stochastic fractal objects is developed. Using the example of calculating the effective coefficient of thermal conductivity of a composite, the dependence of this coefficient on the fractal dimension is shown.

Лобач Михаил, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, mishalobach.04@mail.ru.

Швалюк Эмма, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, emma1607emma@gmail.com.

Котко Александр, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, alexkappareal@mail.ru.

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, nik@grsu.by.

УДК 53.082:539.26

М. Д. МИКУЛА

НАЧАЛЬНЫЕ ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ С ДАННЫМИ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Статья посвящена созданию программного обеспечения (ПО) для импорта и обработки данных рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). Рассматриваются подходы к проектированию ПО, выбор ORM-библиотек и шаблонов разработки, а также инструменты для миграции данных из устаревшего формата DBF, используемого в программе ElvaX 2.4 для хранения результатов РФА. Предлагаемое решение обеспечивает набор инструментов и методов, которые помогут создать программу, обеспечивающую удобство анализа, редактирования и экспорта данных, а также улучшить совместимость с современными системами. Особое внимание уделено разработке интуитивно понятного интерфейса, направленного на повышение удобства пользования.

Необходимость создания нового программного обеспечения обусловлена устаревшим форматом экспортируемых данных из программы ElvaX 2.4. Помехи в работе может создавать ограниченность текущего формата по его рекомендуемым размерам, выход за пределы которого влечет за собой последствия начиная от простейшей нестабильной работой, заканчивая искажением данных. Обособленность же существующих данных негативно сказывается на удобстве анализа и изучения результатов. Всё это создаёт значительные трудности при попытках статистического анализа результатов, создании выборок по определённым параметрам и экспорте данных в другие форматы.

Необходимо подобрать инструментарий для переноса экспортируемых данных из программы ElvaX 2.4 на более современные и удобные для использования аналоги, а также определить программный фундамент для будущего приложения, которое обеспечит пользователю максимальную свободу и гибкость в работе с результатами РФА.

РФС является одним из наиболее эффективных методов анализа, позволяющих быстро и достаточно точно получить наиболее полную и достоверную информацию об элементном составе сложных образцов независимо

от их агрегатного состояния и происхождения. Этот метод позволяет одновременно определять более 80 химических элементов таблицы Менделеева [1].

DBF файлы, в контексте ElvaX, представляют собой базы данных, содержащие непосредственную информацию об образцах волос, их элементный анализ, информация о владельце образца: информация о месте проживания, дата проведения анализа, дата рождения, пол, фамилия, имя, отчество, паспортный номер, идентификационный номер в базе данных и т. д.

DBF (Data Base File) – формат хранения данных, используемый в качестве одного из стандартных способов хранения информации в системах управления базами данных [2].

Первоначально DBF формат использовался системами управления базами данных dBASE для хранения таблиц данных, а затем был принят аналогичными пакетами СУБД. Данный формат файла привлекал внимание сочетанием простой структуры и поддержкой типов данных, подходящих для использования в бизнесе. Он лучше всего подходил для данных с фиксированным полем. По тем же причинам он был принят разработчиками специализированного программного обеспечения как простой формат для хранения таблиц с фиксированными полями текстовых и числовых данных [2].

Формат DBF имеет так же определенные недостатки:

1. Создан давно и не включает многие современные функции и возможности, доступные в современных системах управления базами данных.
2. Есть ограничения по размеру и количеству полей в таблице, что может усложнить работу с большими объемами данных или таблицами с большим числом полей.
3. Поддерживает ограниченный набор типов данных, что иногда требует использования альтернативных методов хранения сложных или специфических типов данных.
4. Не является оптимальным с точки зрения использования памяти, особенно при работе с большими объемами данных. Это может привести к увеличению кода, а также потребности в масштабировании и оптимизации приложений для работы с файлами DBF.
5. Приложения, использующие формат DBF, могут столкнуться со сложностями в масштабировании при увеличении объема или нужде в обработке высокоскоростных данных.

Формат DBF подходит для простых приложений и небольших объемов данных, однако может быть недостаточным для более сложных и расширяемых приложений.

Для переноса существующей информации из DBF файлов необходимо создать фундамент для построения новой базы данных, куда будет автоматически импортироваться информация из существующих DBF файлов.

Замена должна представлять из себя современный и более совместимый с новыми программными и аппаратными конфигурациями аналог, а для её проектирования требует подходящая система управления базами данных.

В качестве языка программирования выбран C#, так как приложение разрабатывается под операционную систему Windows, .NET и C# предоставляют широкий функционал для написания приложений под Windows, а объектно-ориентированный подход позволяет представлять части приложения как объекты (например, объект изображения или объект результатов эксперимента). Автоматическое управление памятью и сборка мусора в C# позволяют не беспокоиться о проблемах утечек памяти [3].

Одна из проблем использования языков объектно-ориентированного программирования (ООП) и баз данных в сложности их согласования между собой. Знание языка структурированных запросов (SQL) и умение писать запросы позволяют взаимодействовать с БД напрямую. Но использование «чистого» SQL может занять довольно много времени, предъявляя повышенные требования к навыкам специалиста. Для упрощения этой задачи необходимо использовать ORM-библиотеку.

Определившись с выбором СУБД и ORM-библиотеки, можно приступить к выбору шаблона разработки, языка программирования, на котором программа будет написана, и определиться с реализацией фронтенд-части программы (её интерфейса).

Архитектура приложения играет важную роль в обеспечении структурированного и поддерживаемого кода. Для разработки настольного приложения, которое работает с DBF-файлами и предоставляет пользователю удобный интерфейс для анализа данных рентгенофлуоресцентного анализа, был выбран архитектурный шаблон Model – View – ViewModel (MVVM). Этот шаблон проектирования хорошо подходит для настольных приложений, построенных с использованием WPF (Windows Presentation Foundation) или Windows Forms с реализацией MVVM, так как он разделяет логику представления, бизнес-логику и обработку данных, обеспечивая лучшее разделение обязанностей.

В качестве языка программирования выбран C#, так как приложение разрабатывается под операционную систему Windows, .NET и C# предоставляют широкий функционал для написания приложений под Windows, а объектно-ориентированный подход позволяет представлять части приложения как объекты (например, объект изображения или объект результатов эксперимента). .NET Windows Forms позволяют создавать пользовательские интерфейсы без знаний HTML, CSS и JavaScript. Автоматическое управление памятью и сборка мусора в C# позволяют не беспокоиться о проблемах утечек памяти.

Не малую роль играет проектирование и создание пользовательского интерфейса, так как именно он определяет, насколько легко и удобно будет пользоваться программой. Пользовательский интерфейс представляет собой совокупность используемых в программе средств ввода данных, способов отображения информации и элементов управления. Эффективность работы программного продукта определяется не только его функциональными возможностями, но и доступностью этих возможностей. Поэтому создание интуитивно – понятного дружелюбного интерфейса является важной задачей при разработке программного продукта [3]. Начать разработку интерфейса стоит с создания вайрфрейма.

Wireframes имеют ограниченные визуальные характеристики, поскольку большинство элементов дизайна не включены в этот инструмент. Вместо конкретных элементов дизайнеры используют заполнители. Этот прием имеет важное значение – заполнители объектов и серая палитра помогают сосредоточиться на макете и структуре страницы, а не на визуальных аспектах дизайна [5].

После создания вайрфрейма можно приступать к разметке. WPF позволяет разрабатывать приложения, используя как разметку, так и код программной части, что привычно для разработчиков на ASP.NET. Разметка XAML обычно используется для определения внешнего вида приложения, а управляемые языки программирования (код программной части) – для реализации его поведения [6].

XAML – это язык разметки на основе XML, который служит для определения внешнего вида приложения в декларативной форме. Обычно он используется для определения окон, страниц и пользовательских элементов управления, а также их заполнения элементами управления, фигурами и графическими элементами [6]. В листинге 1 прилагается код разметки для воссоздания вейрфрейма как части проекта, а сам полученный графический интерфейс пользователя можно увидеть на рисунке 1.



Рисунок 1 – Скриншот реализованного в WPF интерфейса

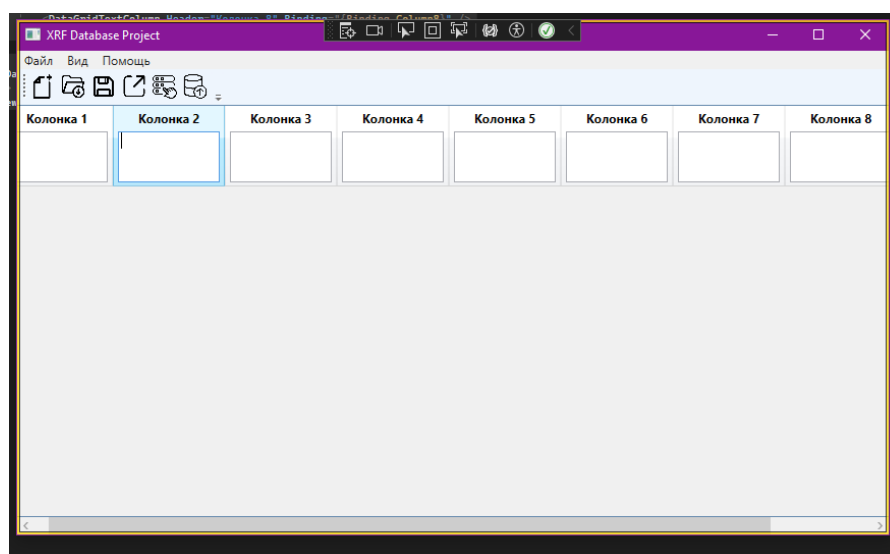


Рисунок 2 – Скриншот реализованного в WPF интерфейса

Далее остается создать остальные элементы программы, начиная от создания логики, заканчивая добавлением в текущий интерфейс новых элементов, по необходимости. Например, расширить панель инструментов, если работникам лаборатории понадобятся новые возможности.

Список литературы

1. Черноруков, Н. Г. Теория и практика рентгенофлуоресцентного анализа : электрон. учеб.-метод. пособие / Н. Г. Черноруков, О. В. Нипрук, – Н. Новгород : Нижегород. гос. ун-т, 2012. – 57 с.
2. Bachmann, E. Xbase (&dBASE) File Format Description [Electronic resource] / E. Bachmann. – Mode of access: <https://www.clicketyclick.dk/databases/xbase/format/index.html>. – Date of access: 26.05.2024.
3. C# documentation [Electronic resource] // Microsoft. – 2024. – Mode of access: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/csharp>. – Date of access: 26.05.2024.
4. Коробов, А. А. Анализ пользовательского интерфейса сотрудника и внедрение на официальном сайте КФУ : выпускная квалификационная работа / А. А. Коробов. – Казань : Казан. (Приволж.) федер. ун-т, 2019. – 56 с.
5. Что такое вайрфреймы [Electronic resource] // АНО ДПО «Образовательные технологии Яндекса». – 2023. – Mode of access: <https://practicum.yandex.ru/blog/chto-takoe-vajrfrejmy>. – Date of access: 12.11.2024.
6. Руководство по классическим приложениям (WPF.NET) [Electronic resource] // Microsoft. – 2024. – Mode of access: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/desktop/wpf/overview/?view=netdesktop-9.0>. – Date of access: 12.11.2024.

This article describes the stages that precede writing the program logic when developing software for processing, exporting and importing X – ray fluorescence analysis results from Elvax 2.4. The article also contains a set and a brief description of the tools that will be useful during development. Approaches to software design, the choice of ORM libraries and development templates, as well as tools for data migration from the outdated DBF format used in the ElvaX 2.4 program for storing X – ray fluorescence results are considered.

Микула Максим Дмитриевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, mikmax.2003@gmail.com.

Научный руководитель – *Ситкевич Анастасия Леонидовна*, магистр физико-математических наук, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, girl-physicist@mail.ru.

УДК 537.8

А. А. ОБРЯДОВА

РАСЧЁТ ПРОХОЖДЕНИЯ СВЕТА ЧЕРЕЗ ПЛАСТИНКУ СО СВОЙСТВАМИ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО МЕТАМАТЕРИАЛА

Проведено теоретическое исследование прохождения электромагнитной волны через пластинку со свойствами сильно анизотропного вещества – гиперболического метаматериала, у которого компоненты тензора диэлектрической проницаемости отличаются знаками для поперечного и продольного направлений в пластинке. Разработана программа в численной системе MathCad и изучены коэффициенты отражения, пропускания и поглощения для пластинок со свойствами гиперболического метаматериала 1-го и 2-го типов. Полученные результаты могут найти применение при исследовании оптических свойств сильно анизотропных сред.

В последние десятилетия к оптическим свойствам искусственных гетерогенных сред имеется повышенный интерес, что обусловлено возможностью создания искусственных материалов (метаматериалов) в виде многослойных структур или в виде упорядоченно расположенных в диэлектрике нанообъектов (метаатомов). Такие искусственные вещества могут обладать весьма нетривиальными оптическими характеристиками, которые почти не встречаются в природе, например, образовывать фотонный кристалл, что обуславливает их детальное исследование в нанофотонике [1].

Относительно новым классом метаматериалов являются гиперболические метаматериалы (ГММ), излучающие поверхности которых имеют вид гиперболоидов [2; 3]. Гиперболические метаматериалы могут быть получены различными путями, например, с помощью чередования нанослоев из диэлектрика и металла или с помощью упорядоченного расположения металлических нанопроволок в диэлектрике. При усреднении оптических свойств такая наноструктура будет иметь сильную анизотропию диэлектрической проницаемости в двух направлениях: вдоль и поперек структуры. Гиперболические метаматериалы могут иметь целый ряд прикладных применений: при создании новых типов нанобиосенсоров, приборов для субволнового изображения, источников одиночных фотонов и др.

Целью работы является теоретическое исследование коэффициентов пропускания, отражения и поглощения электромагнитных волн пластинкой со свойствами гиперболических метаматериалов и разработка программы в численной системе MathCad для вычислений данных коэффициентов.

В настоящей работе метаматериал рассматривается как одноосная анизотропная среда, с осью анизотропии диэлектрической проницаемости, направленной перпендикулярно к поверхности плоской пластинки толщиной h . Пусть пластинка расположена перпендикулярно декартовой оси Z так, что ее поверхности задаются соотношениями: $z = 0$ и $z = -h$. Над пластинкой ($z > 0$) и под пластинкой ($z < -h$) находятся полубесконечные диэлектрические среды со скалярными диэлектрическими проницаемостями ε_1 и ε_2 . Величины, относящиеся к той, либо иной среде, далее выделяем соответствующими индексами (1, 2 и 3). Магнитные проницаемости сред равны единице. На пластинку под углом θ (см. ниже), падает эллиптически поляризованная электромагнитная волна с напряженностями электрического и магнитного полей $\mathbf{E}_0$ и $\mathbf{H}_0$, соответственно (рисунок 1).

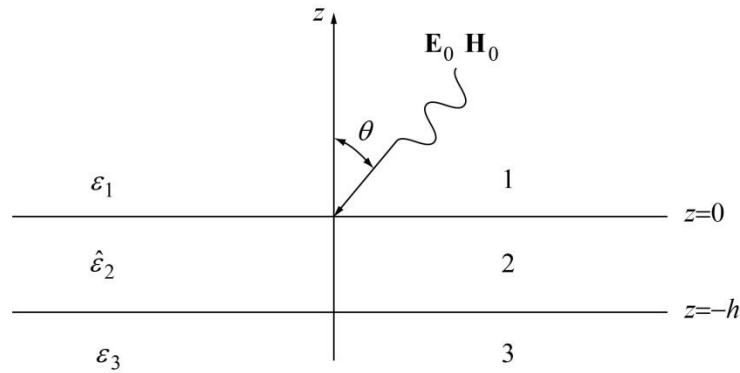


Рисунок 1 – Геометрия задачи о прохождении плоской электромагнитной волны через пластинку со свойствами гиперболического метаматериала

Тензор диэлектрической проницаемости пластинки описывается выражением:

$$\hat{\varepsilon}_2 = \begin{pmatrix} \varepsilon_{2,\rho} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{2,\rho} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{2,z} \end{pmatrix} \quad (1)$$

В случае $\varepsilon_{2,\rho} > 0$ и $\varepsilon_{2,z} < 0$ выражение (1) описывает гиперболический метаматериал 1-го типа (ГММ – I), у которого изочастотные поверхности имеют вид двуполостных гиперboloидов, а случай $\varepsilon_{2,\rho} < 0$ и $\varepsilon_{2,z} > 0$ (1) соответствует гиперболическим метаматериалам второго типа (ГММ – II), для которого изочастотные поверхности имеют вид однополостных гиперboloидов.

В результате решения поставленной задачи были получены формулы для расчетов коэффициентов отражения (R), пропускания (T) и поглощения ($A = 1 - R - T$) волны от пластинки:

$$T = \frac{1}{|A_0|^2 + |B_0|^2} \left(\left| \frac{(1 + a_{TE})(1 + b_{TE}) \exp(i\beta_{2,TE}h)}{1 + a_{TE}b_{TE} \exp(2i\beta_{2,TE}h)} \right|^2 |A_0|^2 + \right. \\ \left. + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} \left| \frac{(1 + a_{TM})(1 + b_{TM}) \exp(i\beta_{2,TM}h)}{1 + a_{TM}b_{TM} \exp(2i\beta_{2,TM}h)} \right|^2 |B_0|^2 \right) \frac{Re \beta_3}{k_1 \cos \theta}, \quad (2)$$

$$R = \frac{1}{|A_0|^2 + |B_0|^2} \left(\left| \frac{a_{TE} + b_{TE} \exp(2i\beta_{2,TE}h)}{1 + a_{TE}b_{TE} \exp(2i\beta_{2,TE}h)} \right|^2 |A_0|^2 + \left| \frac{a_{TM} + b_{TM} \exp(2i\beta_{2,TM}h)}{1 + a_{TM}b_{TM} \exp(2i\beta_{2,TM}h)} \right|^2 |B_0|^2 \right), \quad (3)$$

где A_0 и B_0 – амплитуды падающей волны; θ – угол, который составляет вектор, указывающий направление распространения волны, с отрицательным направлением оси z (рисунок 1). 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) [4]. Другие коэффициенты, входящие в (2) и (3) имеют вид:

$$a_{TE} = \frac{k_1 \cos \theta - \beta_{2,TE}}{k_1 \cos \theta + \beta_{2,TE}}, \quad b_{TE} = \frac{\beta_{2,TE} - \beta_3}{\beta_{2,TE} + \beta_3},$$

$$a_{TM} = \frac{\varepsilon_{2,\rho} k_1 \cos \theta - \varepsilon_1 \beta_{2,TM}}{\varepsilon_{2,\rho} k_1 \cos \theta + \varepsilon_1 \beta_{2,TM}}, \quad b_{TM} = \frac{\varepsilon_3 \beta_{2,TM} - \varepsilon_{2,\rho} \beta_3}{\varepsilon_3 \beta_{2,TM} + \varepsilon_{2,\rho} \beta_3}. \quad (4)$$

$$\beta_{2,TM} = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_{2,\rho} - \frac{\varepsilon_{2,\rho}}{\varepsilon_{2,z}} k_1^2 \sin^2 \theta}, \quad \beta_{2,TE} = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_{2,\rho} - k_1^2 \sin^2 \theta}, \quad \beta_3 = \sqrt{k_3^2 - k_1^2 \sin^2 \theta}, \quad (5)$$

в которых $k_1 = k_0 \sqrt{\varepsilon_1}$ и $k_3 = k_0 \sqrt{\varepsilon_3}$ – волновые числа в средах 1 и 3.

На рисунках 2 и 3 приведены графики для коэффициентов отражения и пропускания R и T , полученные с помощью программирования формул (2) и (3) в среде MathCAD, как функции угла падения θ . Зависимости представлены для частного случая пластинки толщиной $k_0 h = 1$ 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 3 равны единице.

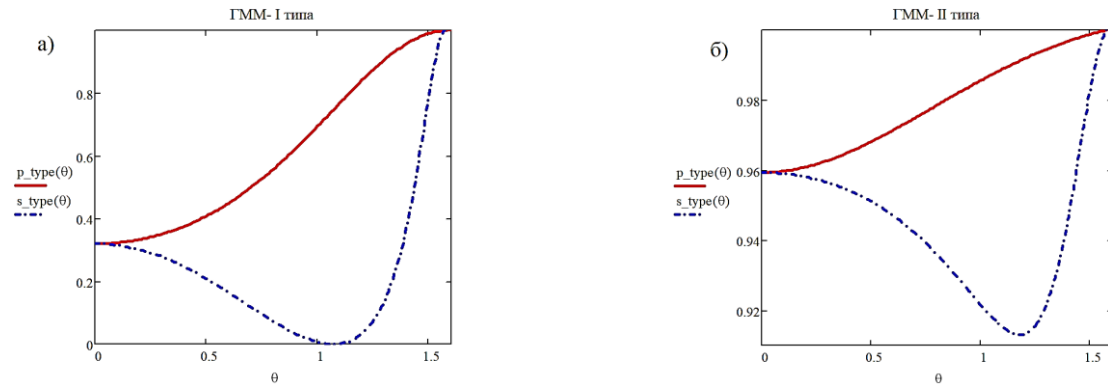


Рисунок 2 – Коэффициенты отражения для ГММ – I (а) и ГММ – II (б) для волн s- и p-типов как функция θ

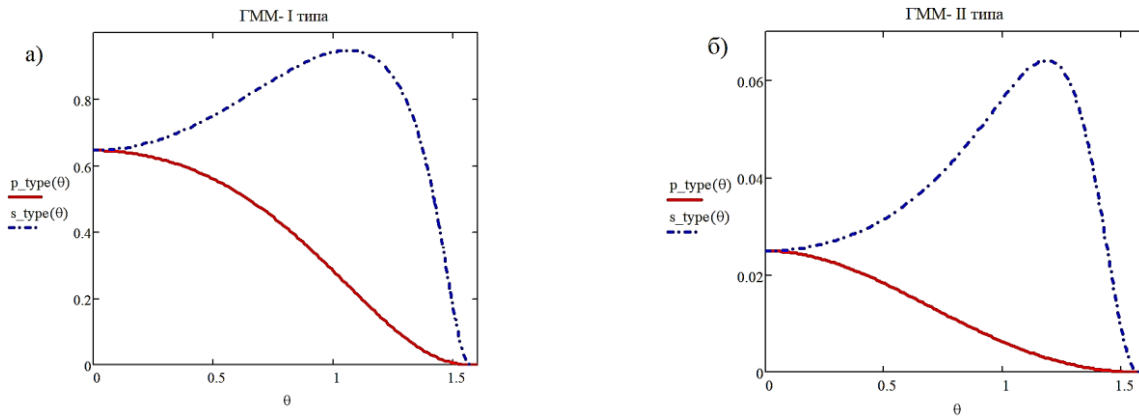


Рисунок 3 – Коэффициенты пропускания для ГММ – I (а) и ГММ – II (б) для волн s- и p-типов как функция θ

При проведении расчетов найдено, что при изменении толщины типа метаматериала, а также поляризации падающей волны они меняются сложным образом. Тем не менее, можно выявить некоторые общие закономерности. В частности, при увеличении толщины пластинки из ГММ – II (компонента диэлектрической проницаемости вдоль оси z – отрицательная) коэффициент отражения стремится к 1, а коэффициент пропускания стре-

мится к 0. Это объясняется возрастанием поглощения такой пластинкой при увеличении $k_0 h$, поскольку в направлении оси z данная пластинка имеет свойства металла. В случае же слоя из ГММ – I (компонента диэлектрической проницаемости вдоль оси z – положительная) такого не происходит. В этом случае зависимости коэффициентов меняются во всем диапазоне от 0 до 1. Данная пластинка в направлении оси z ведет себя как диэлектрик.

Расчеты показывают, что пакет численных расчетов MathCad может быть эффективно использован для расчета коэффициентов отражения, пропускания и поглощения в различных случаях. При этом результаты численных расчетов хорошо согласуются с имеющимися в литературе данными.

В дальнейшем планируется, что данный пакет будет использоваться при подготовке магистерской диссертации для расчета более сложной задачи о прохождении света через пластинку, состоящую из 2-х слоев гиперболических материалов с различными свойствами.

Список литературы

1. Gaponenko, S. V. Introduction to nanophotonics / S. V. Gaponenko. – Cambridge : Cambridge University Press, 2010. – 465 p.
2. Quantum nanophotonics using hyperbolic metamaterials / C. L. Cortes [et al.] // Journal of Optics. – 2012. – Vol. 14. – P. 063001 (1–15).
3. Hyperbolic metamaterials / A. Poddubny [et al.] // Nature Photonics. – 2013. – Vol. 7. – P. 948 – 957.
4. Chew, W. C. Waves and fields in inhomogeneous media / W. C. Chew. – New York : IEEE Press, 1995. – 608 p.

A theoretical study of electromagnetic wave transmission by a plate with properties of a highly anisotropic substance – a hyperbolic metamaterial, in which the components of the permittivity tensor differ in signs for the transverse and longitudinal directions in the plate, was conducted. A program was developed in the MathCAD numerical system and the reflection, transmission and absorption coefficients for plates with properties of hyperbolic metamaterial types 1 and 2 were studied. The obtained results can be used in studying the optical properties of highly anisotropic media.

Обрядова Анжела Александровна, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, obrydova_aa@grsu.by.

Научный руководитель – *Гузатов Дмитрий Викторович*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры общей физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, guzатов@grsu.by.

УДК 53.072

В. С. ОСКИРКО, М. Ю. ВОЛКОВИЧ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДИСКРЕТНО РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ЗАРЯДОВ

Разработаны модели, обеспечивающие построение потенциальных поверхностей, силовых линий дискретно распределённых зарядов. Показано, как аналогичные задачи решаются методом Монте-Карло. Программа может быть использована для демонстрации на лекционных занятиях, для самостоятельной работы при изучении параметров электрического поля систем с произвольной конфигурацией электрических зарядов.

Потенциал поля, используя принцип суперпозиции, при известном распределении зарядов можно вычислить в произвольной точке с координатами (x, y, z) по формулам [1; 2]:

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_k \frac{q_k}{r_k},$$

$$r_k = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2}$$

в этих формулах q_k – величина k -го точечного заряда, находящегося в точке с координатами (x_k, y_k, z_k) . Таким образом, формулы (1) определяют скалярную функцию трех переменных $\phi(x, y, z)$.

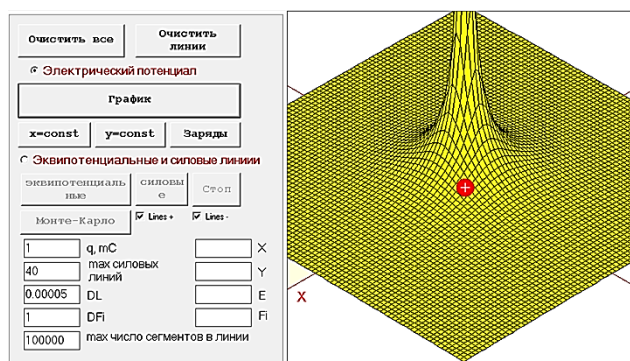


Рисунок 1 – Распределение потенциала в плоскости $z = 0$ для поля, созданного точечным зарядом

Для наглядного представления потенциала часто используют два способа. Первый – зафиксировать одну координату (например, положить $z = z_0 = \text{const}$) и построить трехмерную поверхность, изображающую зависимость потенциала $\varphi(x, y, z_0)$ от двух оставшихся координат. В дальнейшем эту поверхность будем называть потенциальной.

На рисунке 1 показано распределение потенциала в плоскости $z = 0$ для поля, созданного точечным зарядом, находящимся в начале координат. Согласно формуле (1), потенциал в начале координат стремится к бесконечности, поэтому мы искусственно обрезаем поверхность сверху.

Второй способ графического представления распределения потенциала – изобразить семейство эквипотенциальных поверхностей, таких на которых потенциал постоянен. Уравнение такой поверхности имеет вид $\varphi(x, y, z) = \varphi_0 = \text{const}$. Построение поверхности, определенной неявно представляет довольно сложную задачу. Поэтому мы ограничимся построением сечений этих поверхностей плоскостями.

Рассмотрим, для примера, поле, созданное двумя одинаковыми точечными зарядами (рисунок 2). Такая система обладает осевой симметрией, поэтому эквипотенциальные поверхности будут являться телами вращения. Следовательно, имеет смысл изобразить сечения эквипотенциальных поверхностей плоскостями, проходящими через линию, соединяющую заряды. Тогда полные эквипотенциальные поверхности будут являться телами, которые получаются при вращении сечений вокруг оси симметрии – оси O_x .

Построим потенциальную поверхность распределения потенциала в плоскости xO_y (рисунок 2). Теперь сечения потенциальной поверхности, соответствующие постоянному значению потенциала, будут являться эквипотенциальными – линиями, они показаны ниже. Эти линии являются линиями уровня, подобными изолиниям на географической карте. Если теперь мысленно вращать изолинии вокруг оси O_y , то поверхности тел вращения будут эквипотенциальными в трехмерном пространстве.

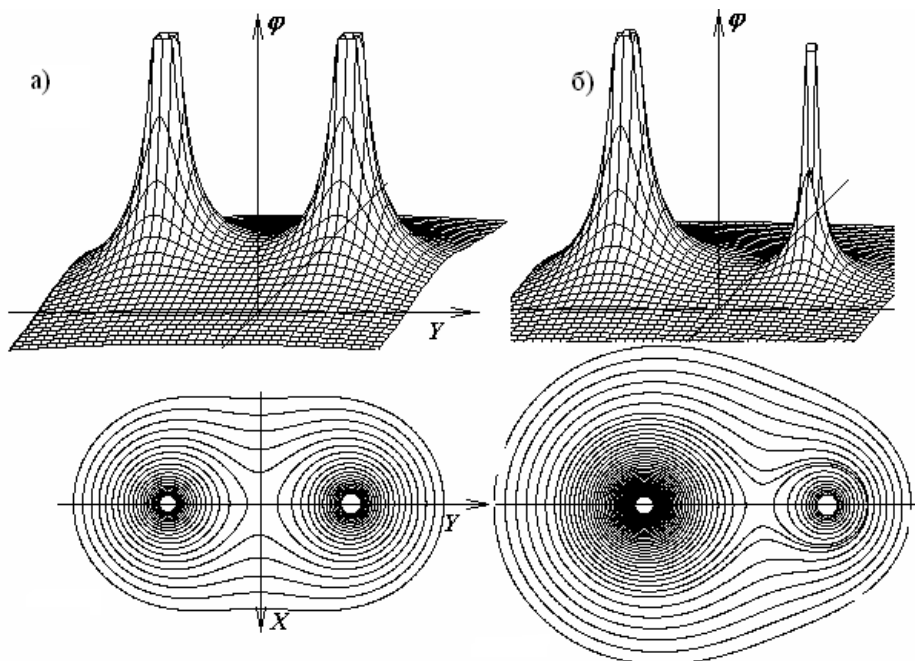


Рисунок 2 – Потенциальные поверхности и линии постоянного потенциала системы двух зарядов

Алгоритм решения:

1. Задаем исходные данные:

базу отображения поля xBase, yBase; условный диаметр заряда D_z ; число потенциальных линий N ; величину малого отрезка ΔL ; значения зарядов q_1, q_2 ; координаты зарядов $x_{q1}, y_{q1} = 0, x_{q2}, y_{q2} = 0$; начальное значение индекса потенциальной линии $i = 1$; разность потенциалов между двумя смежными потенциальными линиями $\Delta\phi$; определяем стартовую точку потенциальной линии на линии, соединяющей заряды $x_{0i} = x_{q1} - D_z/2, y_{0i} = 0$.

2. Начальная точка потенциальной линии $x = x_{0i}, y = y_{0i}$.

3. Вычисляем значение E_x в начальной точке потенциальной линии:

4. $r_1 = |x - x_{q1}|, r_2 = |x - x_{q2}|, E_x = q_1 \frac{x - x_{q1}}{4\pi\epsilon_0 r_1^3} + q_2 \frac{x - x_{q2}}{4\pi\epsilon_0 r_2^3}; E = E_x$

5. Вычисляем дистанцию между потенциальными линиями: $l_\phi = \frac{\Delta\phi}{E_x}$;

6. Вычисляем значения E, E_x, E_y в текущей точке x, y :

$$r_1 = \sqrt{(x - x_{q1})^2 + (y - y_{q1})^2}, r_2 = \sqrt{(x - x_{q2})^2 + (y - y_{q2})^2}; E_x = q_1 \frac{x - x_{q1}}{4\pi\epsilon_0 r_1^3} + q_2 \frac{x - x_{q2}}{4\pi\epsilon_0 r_2^3};$$

$$E_y = q_1 \frac{y - y_{q1}}{4\pi\epsilon_0 r_1^3} + q_2 \frac{y - y_{q2}}{4\pi\epsilon_0 r_2^3}; E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}.$$

7. Вычисляем компоненты вектора $\vec{l}$:

$$l_x = -\Delta l \frac{E_y}{E}; \quad l_y = \Delta l \frac{E_x}{E}.$$

8. Отображаем отрезок $(x, y) - (x + l_x, y + l_y)$.

9. Переопределяем параметры: $x = x + l_x, y = y + l_y$

10. Если $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 > \Delta l^2$, то переходим к пункту 3.

11. Вычисляем текущий индекс потенциальной линии: $i = i + 1$.

12. Если $i > N$, то переходим к пункту 16.

13. Вычисляем дистанцию между потенциальными линиями:

$$l_\phi = \left| \frac{\Delta\phi}{E_x} \right|.$$

14. Определяем стартовую точку потенциальной линии на линии, соединяющей заряды:

$$x_{0i} = x_{0i-1} - l_\phi, y_{0i} = 0.$$

15. Переходим к пункту 3.

16. Заканчиваем расчет.

Можно разместить заряды произвольным образом и посмотреть характер поля распределенных на поверхности зарядов рисунок 3. С помощью этой простой модели можно получить так называемую «зарядовую мозаику» ювенальных поверхностей (поверхность свежесколотого кристалла).

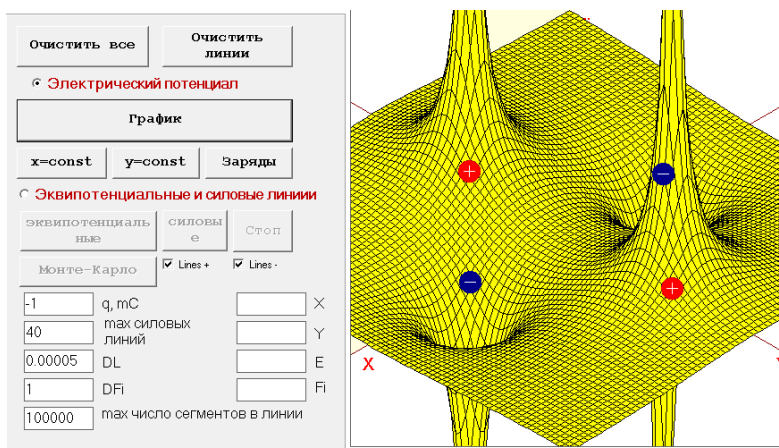


Рисунок 3 – Потенциальная поверхность системы из четырёх зарядов

Список литературы

1. Никитин, А. В. Компьютерное моделирование физических процессов / А. В. Никитин, А. И. Слободянюк, М. Л. Шишаков. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2011. – 679 с.
2. Гулд, Я. Тобочник. Компьютерное моделирование в физике : в 2 т. / Я. Гулд. – М. : Мир, 1990. – 350 с.

Models have been developed that provide the construction of potential surfaces, lines of force of discretely distributed charges. It is shown how analog problems are solved by the Monte Carlo method. The program can be used for demonstration at lectures, for independent work in the study of the parameters of the electric field of systems with an arbitrary configuration of electric charges.

Оскирко Вадим Сергеевич, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, vadingrsu@gmail.com.

Волкович Максим Юрьевич, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, maksgrsu@gmail.com.

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, nik@grsu.by.

УДК 539.1

Н. А. ПАШКОВИЧ, Р. А. ПОЛКОВНИКОВ, М. И. МОЙСЕЙЧИК

РАСЧЁТ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СПЕКТРОВ ФУЛЛЕРЕНОВ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ КВАНТОВОЙ ХИМИИ

В работе квантово-химическими методами моделирования PM3 и AM1 проведена оптимизация структуры фуллеренов C₃₀, C₄₀, C₅₀, C₇₀ и рассчитаны их колебательные спектры. Расчет оптимизации структуры фуллеренов C₃₀, C₄₀, C₅₀, C₇₀ выполнен методом Полака – Рибьера. Для оптимизированной структуры фуллеренов проведен расчет частот нормальных колебаний для оптимизированных структур. Проведено сравнение времени расчета методами PM3 и AM1.

Фуллерены – это молекулы углерода, которые имеют форму сферы, эллипсоида или трубки. Они состоят из 20 или более атомов углерода, расположенных в шестиугольных и пятиугольных кольцах. Фуллерены получили свое название в честь архитектора Ричарда Бакминстера Фуллера, который спроектировал геодезический купол, похожий по форме на эти молекулы [1].

Фуллерены обладают рядом уникальных свойств. Они очень прочны и устойчивы к химическим реакциям, а также являются хорошими проводниками электричества и тепла. Эти свойства делают фуллерены перспективными материалами для различных применений [1].

Сферы потенциального применения:

- Медицина: Фуллерены могут обладать противоопухолевыми, антиоксидантными и противовирусными свойствами. Исследования продолжаются, чтобы изучить их потенциал для лечения различных заболеваний.
- Электроника: Фуллерены являются перспективными материалами для создания новых типов электронных устройств, таких как солнечные элементы и транзисторы.
- Катализ: Фуллерены могут использоваться в качестве катализаторов для различных химических реакций. Это может привести к разработке новых и более эффективных процессов для производства различных материалов.
- Экология: Исследование фуллеренов в морском воздухе может помочь нам лучше понять их влияние на морские экосистемы и глобальный углеродный цикл.

Для исследования фуллеренов требуется информация о колебательных частотах и формах молекулы, а также идентификация функциональных групп, определение структуры молекулы и изучение ее динамического поведения.

Для изучения фуллеренов больших размеров или сложной структуры, для которых экспериментальные данные могут быть недоступны или ограничены, расчета геометрической структуры, электронной структуры и других свойств таких фуллеренов могут быть использованы полуэмпирические квантово-химические методы. Эти расчеты могут помочь понять фундаментальные свойства фуллеренов и спроектировать новые фуллерены с желаемыми свойствами для различных практических применений.

Полуэмпирические методы – это квантово-химические методы расчета, которые сочетают в себе принципы теории Хартри – Фока и экспериментальные данные. Они используют эмпирические параметры, полученные из экспериментальных данных, для параметризации квантово-механических уравнений. Полуэмпирические методы менее точны, чем методы теории Хартри – Фока с полным конфигурационным взаимодействием (HF – SCF), но они намного быстрее и могут использоваться для расчета более крупных молекул.

Методы PM3 и AM1 были разработаны в конце 1980-х годов как улучшения метода MNDO (Modified Neglecto fDiatomic Overlap). Основным отличием между PM3 и AM1 является набор параметров, используемых для расчета энергии молекулы.

PM3 более точен для расчета энергий активации и термодимических свойств, в то время как AM1 быстрее и может использоваться для расчета более крупных молекул. PM3 использует более обширный набор самих параметров, в то время как AM1 использует другой набор более малого числа параметров, но полученных из более широкого диапазона экспериментальных данных. AM1 также включает в себя некоторые улучшения алгоритма, что делает его более быстрым, чем PM3 [2].

Методы PM3 и AM1 являются ценными инструментами для того, чтобы понять молекулярную структуру, свойства и реакционную способность. PM3 может быть более точным для расчета энергий активации и термодимических свойств, в то время как AM1 быстрее и может использоваться для расчета более крупных молекул.

Прежде чем приступить к расчету колебательного спектра фуллеренов, необходимо выполнить оптимизацию их геометрии, после которой будет произведен расчет частот нормальных колебаний для оптимизированных структур. Вычисление частот нормальных колебаний, как правило, не имеет смысла для неоптимизированной геометрии, поскольку частоты сильно зависят от отклонения от точки минимума энергии [2].

Расчет оптимизации структуры фуллеренов C_{30} , C_{40} , C_{50} , C_{70} выполнен методом Полака – Рибьера. Метод Полака – Рибьера (Polak – Ribiere) – это один из вариантов метода сопряженных градиентов, который используется для нахождения локального экстремума функции. В контексте геометрической оптимизации расчёта фуллеренов, этот метод позволяет эффективно находить оптимальную конфигурацию молекулы, минимизируя её потенциальную энергию.

Для оптимизированных структур фуллеренов C_{30} , C_{40} , C_{50} , C_{70} проведен расчет частот нормальных колебаний.

В целом, максимальные частоты колебаний для всех фуллеренов находятся в диапазоне от 1644,59 Гц до 1852,33 Гц. Интенсивность колебаний варьируется в зависимости от метода и размера фуллерена. Например, для C_{30} метод PM3 показывает значительно более высокую максимальную интенсивность (40,122) по сравнению с AM1 (15,754). Это может указывать на различия в распределении электронных плотностей и взаимодействиях между атомами углерода в зависимости от метода расчета.

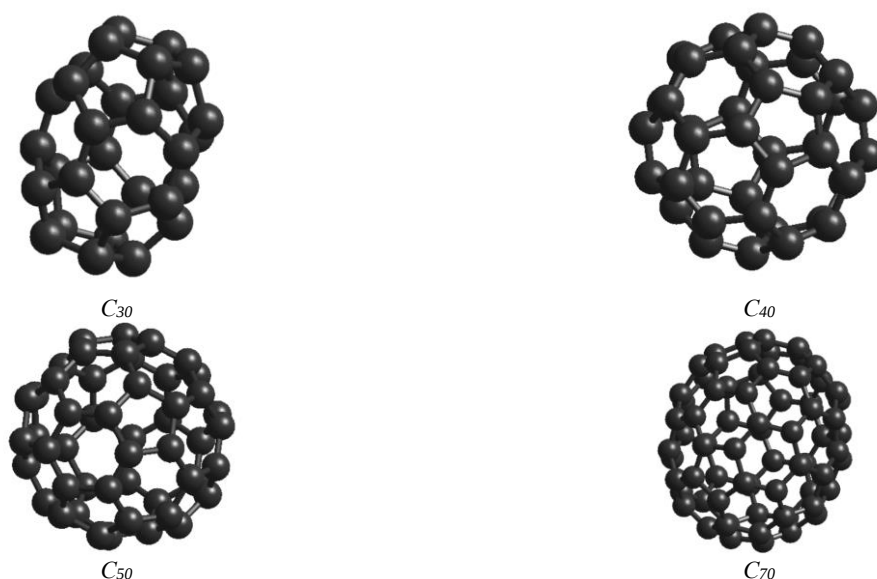


Рисунок 1 – Фуллерены

Таблица 1 – Результаты расчёта спектров фуллеренов

Фуллерен	C_{30}		C_{40}		C_{50}		C_{70}	
Метод	AM1	PM3	AM1	PM3	AM1	PM3	AM1	PM3
Время (с)	12,61	12,99	29,97	32,59	74,82	78,95	276,24	286,45
Макс. частота (Гц) / Интенсивность	1644,59 3,979	1670,51 1,506	1776,92 7,101	1792,41 6,709	1792,56 11,022	1754,47 11,695	1852,33 0,684	1812,77 5,672
Частота (Гц) / Макс. интенсивность	906,34 15,754	879,69 40,122	866,02 15,797	849,54 22,631	1792,56 11,022	1754,47 11,695	1661,51 26,953	1662,02 44,872

Время, затраченное на расчет, увеличивается с размером фуллерена. Большие молекулы требуют больше вычислительных ресурсов. Метод AM1 в среднем показывает немного меньшее время расчета по сравнению с PM3, что делает его более предпочтительным для больших молекул.

Квантово-химические методы моделирования PM3 и AM1 проведена оптимизация структуры фуллеренов C_{30} , C_{40} , C_{50} и C_{70} и рассчитаны их колебательные спектры. Проведенный расчет частот для оптимизированных структур методами PM3 и AM1 показал, что все колебательные частоты оптимизированной структуры фуллеренов C_{30} , C_{40} , C_{50} и C_{70} действительны.

Методы AM1 и PM3 оба являются ценными инструментами для исследования фуллеренов. Метод AM1 более эффективен с точки зрения времени расчета, что делает его предпочтительным для больших молекул. Метод PM3, с другой стороны, может предоставлять более точные данные о взаимодействиях между атомами углерода, что важно для детального анализа структуры и свойств фуллеренов. Выбор метода зависит от конкретных задач и требований исследования.

Рассчитанные квантово-химическими методами колебательные спектры позволяют рассчитать зависимость теплоемкости фуллеренов C_{30} , C_{40} , C_{50} и C_{70} от температуры [3; 4]. Это позволяет прогнозировать термодинамические свойства таких систем.

Список литературы

1. Наноматериалы и нанотехнологии / В. М. Анищик [и др.]. – Минск : Изд. центр БГУ, 2008. – 375 с.
2. Блатов, В. А. Полуэмпирические расчетные методы квантовой химии : учеб. пособие / В. А. Блатов, А. П. Шевченко, Е. В. Пересыпкина. – 2-е изд. – Самара : Универс-групп, 2005. – 32 с.
3. Белко, А. В. Расчет 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, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2024. – Т. 14, № 3. – С. 57–63.
4. Белко, А. В. Расчет термодинамических свойств фуллеренов группы симметрии I_h / А. В. Белко, А. В. Никитин // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах : сб. науч. ст. / Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси ; редкол.: О. Г. Пенязьков [и др.]. – Минск, 2024. – С. 16–20.

In this work, the structure of fullerenes C_{30} , C_{40} , C_{50} , C_{70} has been optimised and their vibrational spectra have been calculated using PM3 and AM1 quantum – chemical modeling methods. The structure optimisation of C_{30} , C_{40} , C_{50} , C_{70} fullerenes was calculated using the Polak – Ribier method. For the optimised structure of fullerenes, the calculation of normal vibrational frequencies of the optimised structures was carried out. The calculation time of PM3 and AM1 methods was compared.

Пашкович Николай Андреевич, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, nikolajpaskovic@gmail.com.

Полковников Руслан Александрович, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, ruslanpolkovnikov694@gmail.com.

Мойсейчик Максим Игоревич, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, gofmeckler@gmail.com.

Научный руководитель – Белко Александр Витальевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, belko_av@grsu.by.

УДК 53.072

Н. А. ПАШКОВИЧ, Р. А. ПОЛКОВНИКОВ, М. И. МОЙСЕЙЧИК

МЕТОД НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ДЛЯ РАСЧЁТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ

На основе метода нестационарного теплового потока разработано компьютерное приложение для расчета эффективной теплопроводности композиционных систем. Метод учитывает температурные зависимости коэффициентов теплопроводности матрицы и модификатора. Программа обеспечивает возможность анализа выпрямления теплового потока.

При расчете эффективной теплопроводности композита следует учитывать неоднородность распределения значений коэффициента теплопроводности. Этот фактор, а также температурные зависимости коэффициентов теплопроводности компонентов делают возможными только численные расчеты. В работах [1; 2] эта задача решалась как стационарная методом релаксаций без учета температурных зависимостей. Дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t},$$

$T = T_b, x = 0, L \geq y \geq 0, L \geq z \geq 0$; граничные условия первого рода

$T = T_e, x = L, L \geq y \geq 0, L \geq z \geq 0$; граничные условия первого рода

На других плоскостях принимаются адиабатические граничные условия. Конечноразностное представление уравнения (1) дает возможность температуру узла в последующий момент времени вычислить по предыдущему моменту через температуры узла и соседних узлов – явная схема:

$$T_{ijk,l} = \frac{\Delta t}{\rho_{ijk} c_{ijk}} (A_1 + A_2 + A_3) + T_{ijk},$$

$$A_1 = \frac{\lambda_{ijk}^{(x)} - \lambda_{i(i-1)jk}^{(x)}}{\Delta x} \times \frac{T_{ijk} - T_{i(i-1)jk}}{\Delta x} + \lambda_{ijk}^{(x)} \frac{T_{i(i-1)jk} - 2T_{ijk} + T_{i(i+1)jk}}{\Delta x^2},$$

$$A_2 = \frac{\lambda_{ijk}^{(y)} - \lambda_{ij(j-1)k}^{(y)}}{\Delta y} \times \frac{T_{ijk} - T_{ij(j-1)k}}{\Delta y} + \lambda_{ijk}^{(y)} \frac{T_{ij(j-1)k} - 2T_{ijk} + T_{ij(j+1)k}}{\Delta y^2},$$

$$A_3 = \frac{\lambda_{ijk}^{(z)} - \lambda_{ij(k-1)}^{(z)}}{\Delta z} \times \frac{T_{ijk} - T_{ij(k-1)}}{\Delta z} + \lambda_{ijk}^{(z)} \frac{T_{ij(k-1)} - 2T_{ijk} + T_{ij(k+1)}}{\Delta z^2}$$

все параметры без индекса l соответствуют моменту времени $l-1$

T_{ijk} – температура в узлах решетки

$\lambda_{ijk}^{(x,y,z)}$ – коэффициент теплопроводности

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – периоды решетки

Δt временной шаг;

$\rho_{ijk} c_{ijk}$ – плотность и теплоемкость материала.

Для устойчивости численного решения должно выполняться условие

$$Fo = \frac{\Delta t \lambda_{ijk}^{(x)}}{\rho_{ijk} c_{ijk} \Delta x^2} < 0,5$$

После расчета температуры в узлах решетки рассчитывается среднее значение потока в каждом узле и далее эффективный коэффициент теплопроводности.

$$\lambda_{eff} = L \frac{\sum_1^N \lambda^{(i)} \frac{\partial T}{\partial y}}{T_b - T_e}$$

Ниже представлены результаты расчетов эффективной теплопроводности, полученные методом нестационарного теплового потока. Тестовые расчеты, допускающие точное решение показаны на рисунке 1.

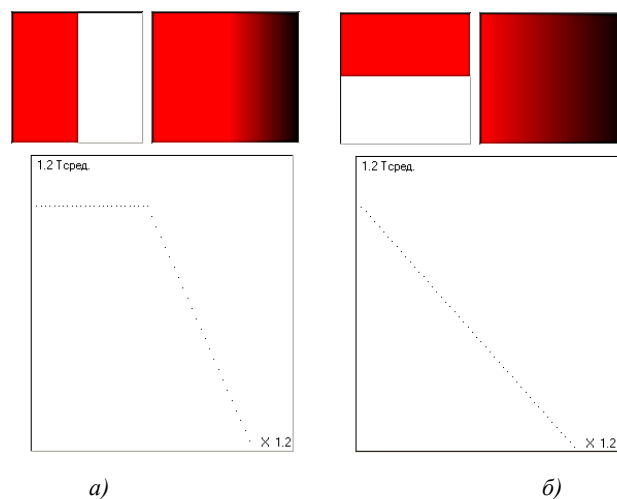


Рисунок 1 – а) распределение температуры по оси X, решётка 100×100 $\rho = 0,5$; $\lambda_2 = 1000$, блочное поперечное наполнителя, $\lambda_{эф.} = 1,99$; б) распределение температуры по оси X. Решётка 100×100 , $\rho = 0,5$; $\lambda_2 = 1000$, блочное продольное распределение наполнителя, $\lambda_{эф.} = 500,99$

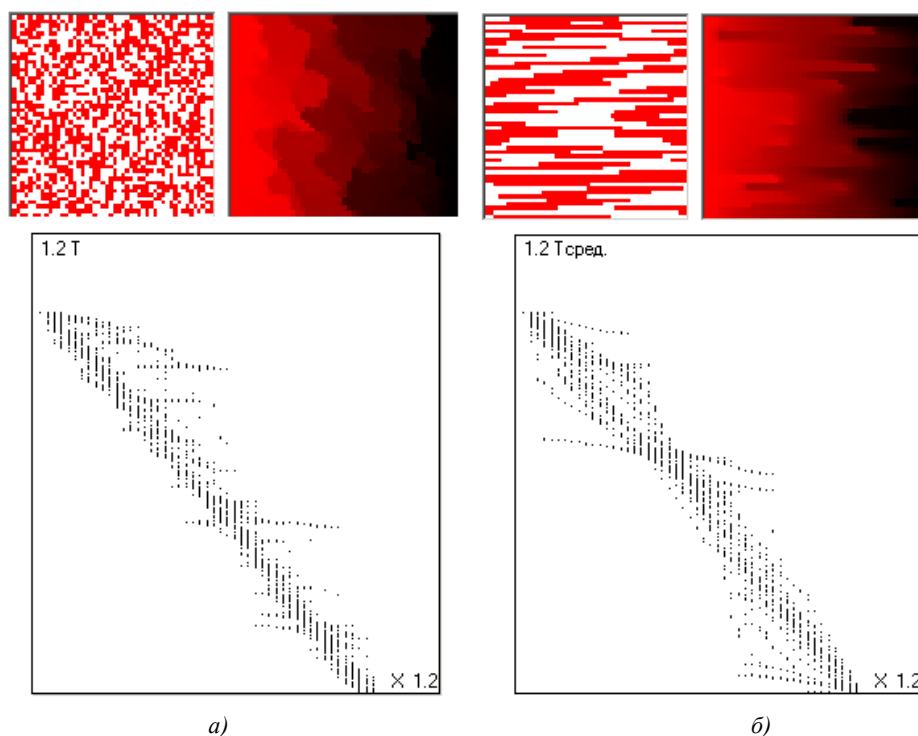


Рисунок 2 – а) распределение температуры по оси X, решётка 50×50 , $\rho = 0,5$; $\lambda_2 = 1000$, случайное распределение наполнителя, $\lambda_{эфф.} = 292$; б) распределение температуры по оси X. Решётка 100×100 , $\rho = 0,5$; $\lambda_2 = 1000$, продольное распределение наполнителя, $\lambda_{эфф.} = 371$

Представленные расчеты иллюстрируют применение метода нестационарного потока. В детальных расчетах можно учесть межфазное тепловое сопротивление, контактное тепловое сопротивление между частицами наполнителя, структуру частиц наполнителя, выпрямление теплового потока. На рисунке 3 представлен интерфейс программы.

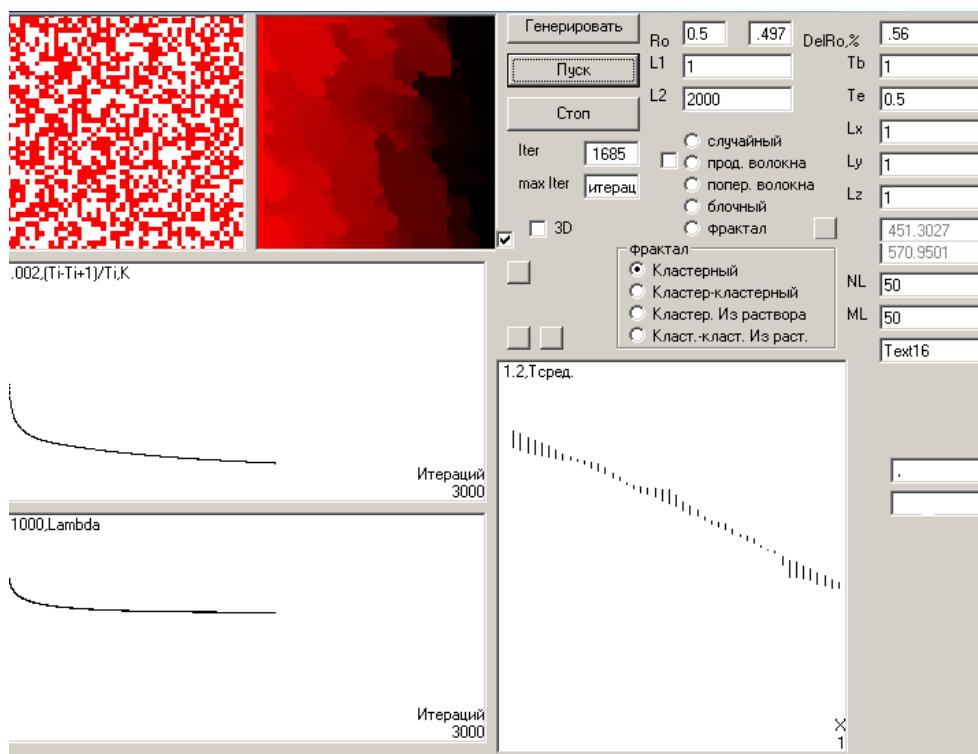


Рисунок 3 – Интерфейс программы

Список литературы

1. Experiment and simulation of the effective thermal conductivity of composite systems based on polymers / A. V. Nikitin [et al.] // Вестн. Гродн. гос. ун-та. Сер. 2, Математика. Физика. Информатика, Вычислительная техника и управление. – 2019. – Т. 9, № 3. – С. 94–103.
2. Котко, А. Н. Численные методы определения теплопроводности композиционных систем / А. Н. Котко, Е. С. Романовский ; науч. рук. А. В. Никитин // Физика конденсированного состояния : материалы XXXII Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 4–5 апр. 2024 г.) / Гроднен. гос. ун-т им. Янки Купалы ; гл. ред. Г. А. Гачко ; редкол.: О. А. Жарнова [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2024. – С. 123–126.

Based on the method of non-stationary heat flux, a computer application has been developed for calculating the effective thermal conductivity of composite systems. The method takes into account the temperature dependencies of the thermal conductivity coefficients of the matrix and the modifier. The program provides the ability to analyze the rectification of the heat flow.

Полковников Руслан Александрович, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, ruslanpolkovnikov694@gmail.com.

Пащкович Николай Андреевич, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, nikolajpaskovic@gmail.com.

Мойсейчик Максим Игоревич, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, gofmechler@gmail.com.

Научный руководитель – Никитин Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, nik@grsu.by.

УДК 53.535.015

Я. В. ПОЛЯКОВА, П. В. ЕРЁМЕНКО, Д. С. ГАЛИНСКАЯ, В. Д. КОСОБУЦКИЙ, Г. А. ПИЦЕВИЧ

**КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИК СПЕКТРОВ
КРУГОВОГО ДИХРОИЗМА И КВАДРАТИЧНОГО ЭФФЕКТА КЕРРА
ДЛЯ ЖК МОЛЕКУЛЫ $C_{32}H_{59}NO$ ¹**

В работе представлены результаты квантово-химического моделирования нелинейных оптических эффектов для хиральной жидкокристаллической молекулы $C_{32}H_{59}NO$. Рассчитаны компоненты тензоров первой и второй гиперполяризуемости, связанных с линейным (эффект Поггеля) и квадратичным (эффект Керра) электрооптическими эффектами, на уровне теории B3LYP/3 – 21G. Исследованы мономер, димер и тример молекулы. Показано, что эффективность электрооптических эффектов возрастает с увеличением числа молекул в кластере и уменьшением длины волны падающего света. Также рассчитаны ИК спектры кругового дихроизма, которые демонстрируют высокую чувствительность к количеству молекул в кластере в диапазоне 2800–3600 cm^{-1} . Результаты подтверждают потенциальную применимость молекулы $C_{32}H_{59}NO$ в системах с улучшенными электрооптическими характеристиками.

Жидкокристаллические устройства с улучшенными электрооптическими свойствами сегодня активно разрабатываются. Одно из перспективных направлений – сегнетоэлектрические жидкие кристаллы. Распространение интенсивных световых пучков в таких средах может сопровождаться их взаимодействием, и такое взаимодействие может управляться или переключаться только оптическими способами. Целый ряд нелинейных оптических эффектов в конечном итоге обусловлен такими характеристиками как первая и вторая гиперполяризуемость молекул. Электрооптическим эффектом называют изменение показателя преломления вещества под действием электрического поля. Различают линейный электрооптический эффект (эффект Поггеля), когда изменение показателя преломления вещества пропорционально первой степени напряженности внешнего электрического поля, и квадратичный электрооптический эффект (эффект Керра), так как в этом случае изменение показателя преломления пропорционально квадрату напряженности электрического поля. Линейный электрооптический эффект (эффект Поггеля) широко используется в модуляторах и переключателях света, а также в устройствах управления поляризацией света. Квадратичный электрооптический эффект (эффект Керра) применяется для синхронизации мод лазеров, в электрооптических модуляторах и при изготовлении световых затворов. Теоретические оценки эффективности электрооптических эффектов до недавнего времени были недоступны. Совсем недавно некоторых квантово-химических пакетах появилась возможность расчета молекулярных характеристик $\beta(-\omega, \omega, 0)$ и $\gamma(-\omega, \omega, 0, 0)$, связанных с возникновением этих эффектов в веществе. Экспериментальные и теоретические работы последних лет показывают, что молекулярные среды из органических и ЖК молекул способны эффективно проявлять описанные выше нелинейные оптические эффекты [1]. Все это

¹Работа выполнена при поддержке Белорусской государственной программы научных исследований на 2021–2025 годы «ГПНИ Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорхимия» (2.1.01.04).

побудило синтезировать и исследовать спектральными и теоретическими методами новую оптически активную молекулу [2], содержащую четверичную аммонийную группу, перспективную в том числе для жидкокристаллических систем.

Нелинейные оптические характеристики молекулы N4OYBDHA рассчитывались с помощью квантово-химических пакетов. Геометрические параметры молекулы N4OYBDHA оптимизировались на уровне теории B3LYP/3 – 21G. Оптимизированная конфигурация молекулы приведена на рисунке 1.

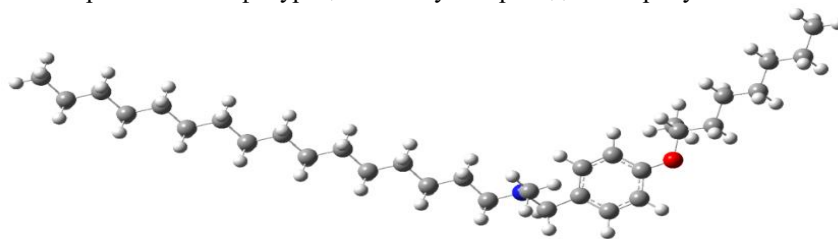


Рисунок 1 – Оптимизированная на уровне теории B3LYP/3 – 21G конфигурация хиральной молекулы N4OYBDHA

Также были оптимизированы конфигурации димера и тримера этой молекулы на уровне теории B3LYP/3-21G. Следует отметить, что димер молекулы ЖК содержит 186, а тример – 279 атомов, а число варьируемых параметров составило 552 и 831, соответственно. Расчет для мономера и некоторых ассоциатов молекулы N4OYBDHA компонентов тензора первой кубической и второй четверичной гиперполяризуемости вида $\beta(-\omega; \omega, 0)$ и $\gamma(-\omega; \omega, 0, 0)$, определяющих эффективность линейного и квадратичного электрооптических эффектов, осуществлялся с использованием квантово-химического пакета Gaussian 16 на уровне теории B3LYP/3 – 21G для следующих длин волн 1139,1, 759,4, 569,5 и 455,6 нм. В Табл. 1 приведены рассчитанные значения инвариантов и некоторых компонент этих тензоров для мономера, димера и тримера молекулы $C_{32}H_{59}NO$ для длины волны 455,6 нм.

Таблица 1 – Рассчитанные на уровне теории B3LYP/3 – 21G значения компонент и инвариантов кубического тензора первой гиперполяризуемости $\beta(-\omega; \omega, 0)$ для линейного электрооптического эффекта и четверичного тензора второй гиперполяризуемости для квадратичного электрооптического эффекта Керра $\gamma(-\omega; \omega, 0, 0)$ мономера, димера и тримера молекулы ЖК. Результаты представлены в атомных единицах

$\beta(-\omega; \omega, 0)$									
Мономер	$\beta_{ }(z)$	$\beta_{\perp}(z)$	β_x	β_y	β_z	$\beta_{ }$	β_{xxx}	β_{yxx}	β_{yux}
	-129,1	-41,1	-2214,6	-707,8	-645,3	482,6	-711,5	-193,6	-53,6
Димер	$\beta_{ }(z)$	$\beta_{\perp}(z)$	β_x	β_y	β_z	$\beta_{ }$	β_{xxx}	β_{yxx}	β_{yux}
	-146,6	-48,2	3091,4	-843,3	-733,1	657,4	1013,5	-296,3	134,9
Тример	$\beta_{ }(z)$	$\beta_{\perp}(z)$	β_x	β_y	β_z	$\beta_{ }$	β_{xxx}	β_{yxx}	β_{yux}
	-344,3	-113,3	4331,1	-1282,8	-1721,3	966,7	1410,9	-423,9	219,2
$\gamma(-\omega; \omega, 0, 0)$									
Мономер	$\gamma_{ }$	$\gamma_{\perp}$	γ_{xxxx}	γ_{yxxx}	γ_{yyxx}	γ_{zxxx}	γ_{zyxx}	γ_{yyyy}	γ_{zzzz}
	62076	20463	167051	44145	21008	-8511	-3119	11650	19608
Димер	$\gamma_{ }$	$\gamma_{\perp}$	γ_{xxxx}	γ_{yxxx}	γ_{yyxx}	γ_{zxxx}	γ_{zyxx}	γ_{yyyy}	γ_{zzzz}
	149667	49357	329756	-87251	44919	20475	-14431	24546	121376
Тример	$\gamma_{ }$	$\gamma_{\perp}$	γ_{xxxx}	γ_{yxxx}	γ_{yyxx}	γ_{zxxx}	γ_{zyxx}	γ_{yyyy}	γ_{zzzz}
	279959	90121	537537	-136352	74123	29634	-20654	39495	307449

Анализ данных таблица 1 показывает, что эффективность электрооптических эффектов должна расти нелинейно с увеличением числа молекул в кластере и с уменьшением длины волны падающего света, причем наибольший эффект достигается при направлении падающего светового потока перпендикулярно направлению дипольного момента молекулы ЖК (вдоль оси X), который, в свою очередь, направлен вдоль оси Y.

ИК спектры кругового дихроизма мономера, димера и тримера хиральной молекулы $C_{32}H_{59}NO$ рассчитывались на уровне теории: B3LYP/3 – 21G. Рассчитанные ИК спектры кругового дихроизма представлены на рисунке 2.

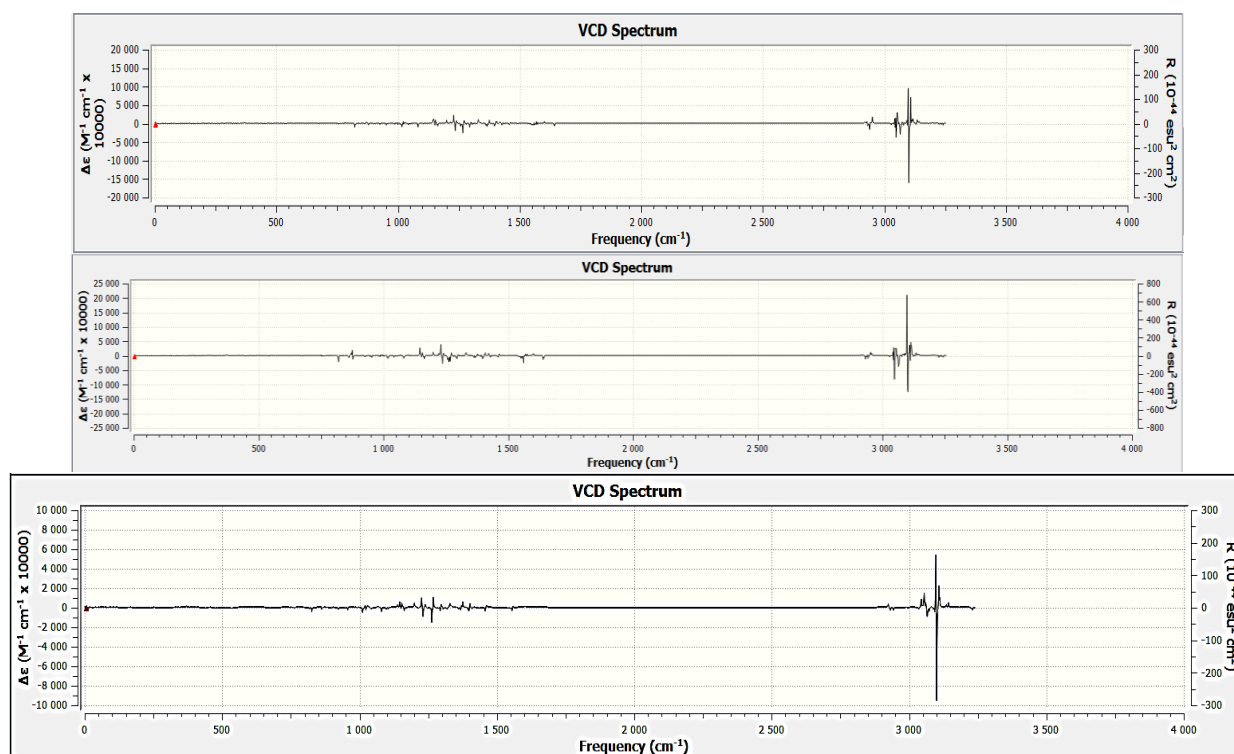


Рисунок 2 – Рассчитанные на уровне теории B3LYP/3 – 21G ИК спектры кругового дихроизма мономера хиральной молекулы N4OYBDNA (верхний рисунок), димера хиральной молекулы N4OYBDNA (средний рисунок) и тримера хиральной молекулы N4OYBDNA (нижний рисунок)

Как следует из анализа рассчитанных ИК спектров кругового дихроизма мономера, димера и тримера хиральной молекулы $C_{32}H_{59}NO$, их вид наиболее информативен и наиболее чувствителен к количеству молекул в кластере в спектральном диапазоне ($2800\text{--}3600\text{ см}^{-1}$). Расчеты предсказывают, что интенсивность сигнала кругового дихроизма в этом спектральном интервале растет с ростом числа молекул в кластере, в то время как интенсивность сигнала кругового дихроизма в среднечастотном интервале – остается практически неизменной.

Список литературы

1. Koenis, M. J. Vibrational circular dichroism spectroscopy for probing the expression of chirality in mechanically planar chiral rotaxanes / M. J. Koenis // Chem. Sci. – 2020. – Vol. 11. – P. 8469–8475.
2. Pitsevich, G. Structure, IR and Raman spectra of the optically active quaternized ammonium salt – promising object for liquid crystal systems / G. Pitsevich, I. Doroshenko // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2022. – Vol. 748. – P. 73–85.

The paper presents the results of quantum – chemical modeling of nonlinear optical effects for the chiral liquid crystal molecule $C_{32}H_{59}NO$. The components of the first and second hyperpolarizability tensors associated with the linear (Pockels effect) and quadratic (Kerr effect) electro-optical effects are calculated at the B3LYP/3 – 21G theory level. The monomer, dimer, and trimer of the molecule are studied. It is shown that the efficiency of electro-optical effects increases with the increase in the number of molecules in the cluster and decrease in the wavelength of the incident light. The IR spectra of circular dichroism are also calculated, which demonstrate high sensitivity to the number of molecules in the cluster in the range of $2800\text{--}3600\text{ см}^{-1}$. The results confirm the potential applicability of the $C_{32}H_{59}NO$ molecule in systems with improved electro-optical characteristics.

Полякова Яна Владимировна, физический факультет, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, уапа.paliakkova@gmail.com.

Еременко Полина Владимировна, физический факультет, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, eremenkopolina250@gmail.com.

Галинская Дарья Сергеевна, физический факультет, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, dgalinskaya9717@gmail.com.

Кособуцкий Вадим Дмитриевич, физический факультет, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, vadim.kasabutski@gmail.com.

Научный руководитель – Питевич Георгий Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра физической оптики и прикладной информатики, физический факультет, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, pitsevich@bsu.by.

Д. Р. РАДЖАПОВ, М. М. ХАЛИЛЛАЕВ, Ш. РАХМАНОВА, Н. Д. АМИНБОЕВА

ВЛИЯНИЕ КОМПОЗИЦИИ ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА НА ДЕГРАДАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПЛАСТИНЧАТОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА, ПОЛНОСТЬЮ ОКРУЖЁННОГО ЗАТВОРОМ

Моделируется зависимость таких деградационных эффектов, как уменьшение барьера, вызванного стоком, увеличение наклона подпороговой передаточной характеристики и эффекта саморазогрева от композиции подзатворного диэлектрического слоя пластинчатого полевого транзистора, полностью окруженного затвором. В качестве показателя композиции диэлектрического слоя выбрано отношение толщин диоксида кремния и диоксида гафния, последовательный слой которых представляет собой подзатворный диэлектрический слой.

Согласно международному плану по развитию полупроводниковой технологии (ITR) с каждым годом совершенствуются технологии полупроводниковых приборов, в частности полевых транзисторов с изолированным затвором. Этот план нацелен на непрерывное уменьшение размеров транзисторов для достижения существенной экономии энергии и увеличения степени интеграции без ухудшения характеристик транзисторов. Для уменьшения размеров с учетом масштабирования предлагаются различные структуры указанных транзисторов. Одним из сравнительно новых предложенных структур полевых транзисторов с изолированным затвором являются полевые транзисторы на основе горизонтально упорядоченных нанопластинок, полностью окруженных затвором (stacked nan sheet field effect transistor, SNSHFET) [1]. Такие структуры позволяют получать транзисторы с длиной затвора менее 7 нм.

Однако уменьшение размеров транзисторов вызывает увеличение различных деградационных эффектов, в частности таких короткоканальных эффектов как уменьшение барьера, индуцированного стоком (DIBL) [2; 3; 4] и увеличение наклона подпороговой переходной характеристики (SS) [2; 3; 4]. Кроме этого, полное окружение канала диэлектрическим слоем, обусловленное структурой транзистора SNSHFET, приводит к уменьшению скорости отвода тепла из канала и вызывает эффект саморазогрева [5; 6]. Существенную роль в указанных деградационных эффектах играет как материал диэлектрического слоя, так и его геометрические параметры. Поэтому в данной работе рассматривается влияние материала и геометрических размеров диэлектрического слоя на короткоканальные эффекты и эффект саморазогрева (self – heating effect, SHE).

Исследование проводится посредством 3D-моделирования с использованием TCAD Sentaurus. Структура SNSHFET получена с использованием пакета Sprocess в котором технологические параметры выбраны в соответствии с данными работы [1]. Структура транзистора, полученная в Sprocess показан на рисунке 1. Значения геометрических параметров транзистора указанных на рисунке 1 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения геометрических параметров транзистора, указанных на рисунке 1

L_g	L_{SiO_2}	$L_{Si_3N_4}$	L_{HfO_2}	$L_S = L_D$	T_{CH}	T_{SiO_2}	T_{HfO_2}	T_{subSiO_2}	T_M	T_{MUP}	W_{CH}	W_M
12 nm	0,5 nm	4,25 nm	1,28 nm	10 nm	5 nm	0,55 nm – 0,25 nm	0,846 nm – 2,538 nm	50 nm	4,5 nm	16 nm	50 nm	10 nm

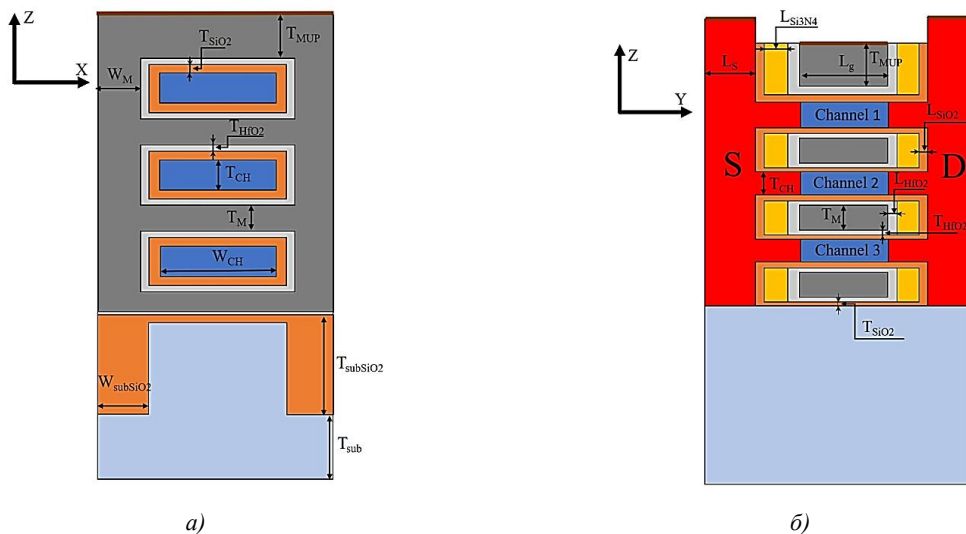


Рисунок 1 – Изображение поперечных сечений поперёк (а) и вдоль (б) канала, моделируемого SNSHFET

Стоковая и истоковая области легированы атомами мышьяка гауссовским профилем с максимальным уровнем $3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, а канал равномерно легирован бором до уровня 10^{17} см^{-3} .

При моделировании характеристики SNSHFET использована термодинамическая транспортная модель, в которой учитываются как диффузионно-дрейфовый транспорт, так и термоэлектрические эффекты.

Для учета рекомбинационных процессов использовалась свойственная для кремния модель Шокли – Рида – Холла. В модели подвижности были учтены зависимость от уровня легирования и насыщение скорости носителей при высоких полях. Так как линейные размеры канала составляют порядка десяти нанометров для учета квантовых эффектов была использована квантовая корректировка eQuantumPotential.

Параметры моделирования были калиброваны сравнением полученной при моделировании переходной вольтамперной характеристики с экспериментальной характеристикой, полученной для транзистора с такими же параметрами в работе [7] (рисунок 2).

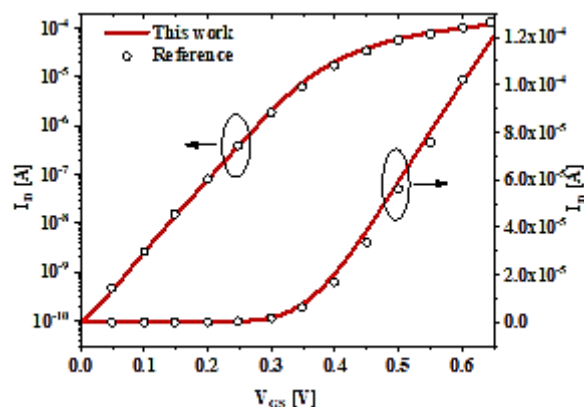


Рисунок 2 – Сравнение переходных BAX моделируемого и экспериментального SNSHFET

В данной работе рассматривалось влияние состава подзатворного диэлектрического слоя на DIBLeffect, SS и SHE. Диэлектрический слой рассматриваемого транзистора состоит из двух слоев: диоксида кремния SiO_2 с толщиной T_{SiO_2} и диоксида гафния HfO_2 с толщиной T_{HfO_2} . Моделировалась зависимость DIBLeffect, SS и SHE от соотношения $R = T_{\text{SiO}_2}/T_{\text{HfO}_2}$.

В качестве показателя эффекта саморазогрева рассматривалась максимальная температура в верхнем 1 – канале транзистора T_{ch} . Результаты моделирования приведены на рисунках 3 и 4. На рисунках видно, что с увеличением величины DIBL и SS монотонно увеличиваются, в то время как температура уменьшается, то есть зависимость короткоканальных эффектов и эффекта саморазогрева от соотношения толщин слоев имеет противоположный характер. Уменьшение температуры обусловлено тем фактом, что при росте R , доля HfO_2 в толщине подзатворного оксидного слоя, у которого теплопроводность почти в два раза больше, чем у SiO_2 увеличивается, что приводит к увеличению скорости теплоотвода и соответственно к уменьшению температуры. А увеличение DIBL эффекта и SS обусловлено увеличением эффективной диэлектрической проницаемости подзатворного оксидного слоя, что связано с высокой диэлектрической проницаемостью HfO_2 . Наблюдаемое поведение деградационных эффектов указывает на необходимость, при разработке SNSHFET, подбора оптимального соотношения толщин подзатворных диэлектрических слоев для достижения минимальных деградационных эффектов. В частности, при рассматриваемых параметрах транзистора наиболее оптимальным является соотношение $R = 5$ при котором проявляются средние значения короткоканальных эффектов и эффекта саморазогрева.

Список литературы

1. Balasubbareddy, M. Optimization of vertically stacked nanosheet FET immune to self-heating / M. Balasubbareddy, K. Sivasankaran, A. E. Atamuratov, M. M. Khalilloev // Micro and Nanostructures. – 2023. – Vol. 182. – P. 207633.
2. Veeraraghavan, S. Short-channel effects in SOI MOSFETs / S. Veeraraghavan, J. G. Fossum // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1989. – Vol. 36. – P. 522-529.
3. Ferain, I. Multi-gate transistors as the future of classical metal-oxide-semiconductor field-effect transistors / I. Ferain, C. A. Colinge, J. P. Colinge // Nature. – 2011. – Vol. 479 (7373). – P. 310–316.
4. Quantum transport in nanoscale semiconductor structures / A. E. Atamuratov [et al.] // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2017. – Vol. 8. – P. 71–80.
5. Design optimization of nanoscale electrothermal transport in 10 nm SOI FinFET technology node / H. Rezgui [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2020. – Vol. 53. – P. 495103. – DOI: 10.1088/1361-6463/abaf7c.
6. Interfacial heat transport across multilayer nanofilms in ballistic-diffusive regime / H. Belmabrouk [et al.] // European Physical Journal Plus. – 2020. – Vol. 135. – P. 109.

7. Stacked nanosheet gate-all-around transistor to enable scaling beyond FinFET / N. Loubet [et al.] // 2017 Symposium on VLSI Technology. – IEEE, 2017. – P. T230–T231.

In this work it is considered the impact of composition of the gate oxide on short channel effects such as DIBL and SS, and on self – heating effect in nanosheet field effect transistor. Gate oxide consist of two layers: SiO₂ and HfO₂. The dependence of indicated above degradation effects on ratio of thicknesses of SiO₂ and HfO₂ were investigated by simulation.

Раджапов Дилиод Равшанбек оглы, магистрант Ургенчского государственного университета, г. Ургенч, Узбекистан.

Халиллаев Махкам Мухаммадшарифович, доцент кафедры физики Ургенчского государственного университета, г. Ургенч, Узбекистан, x-mahkam@urdu.uz.

Рахманова Ширин, старший преподаватель кафедры физики Ургенчского государственного университета, г. Ургенч, Узбекистан.

Аминбоева Нилуфар Даврон кизи, магистрант Ургенчского государственного университета, г. Ургенч, Узбекистан.

Научный руководитель – *Атамуратов Атабек Эгамбердиевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Ургенчский государственный университет, г. Ургенч, Узбекистан, atabek.atamuratov@urdu.uz.

УДК 537.533

М. А. СКОВОРОДКО

К РАСЧЁТУ ФОРМИРОВАНИЯ ЭМИССИОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ИСТОЧНИКАХ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ

Представлена математическая модель, описывающая взаимозависимость высоты формируемого столба плазмы в эмиссионном канале от геометрических размеров канала.

Формирование плазменной поверхности в эмиссионных каналах является важным аспектом в области плазменных технологий. Эмиссионный канал в плазменных источниках заряженных частиц представляет собой пространство, где происходит формирование эмитирующей плазменной поверхности.

При этом различают «длинные» и «короткие» каналы. В «длинном» канале возможно получение плазменной поверхности с более равномерным распределением температуры и плотности плазмы. В «коротком» – плазма, формируемая на меньшем расстоянии, приводит к более высокой плотности энергии, но меньшей стабильности, что может быть полезно для точечной обработки материалов.

От геометрических параметров канала зависит характер проникновения плазменной поверхности в эмиссионный канал. Увеличивая высоту канала, можно увеличить объем, но при этом снизить плотность плазмы. Расширяя канал, можно улучшить распределению потока, однако увеличить потери частиц из-за расширения потока. В «длинном» канале на формирование эмитирующей плазменной поверхности определяющее влияние оказывает влияние поле пристеночного слоя, в «коротком» – поле ускоряющего электрода.

Эмиссионная способность плазмы, формируемой в области эмиссионного канала, зависит от формы эмитирующей поверхности, параметров пристеночного слоя, напряженности ускоряющего поля в канале.

Главным параметром, определяющим эффективность плазменных источников заряженных частиц, является эффективность извлечения, характеризуемая коэффициентом извлечения α [1]:

$$\alpha = \frac{I_e}{I_d},$$

который определяется, как отношение тока эмиссии I_e к току разряда I_d .

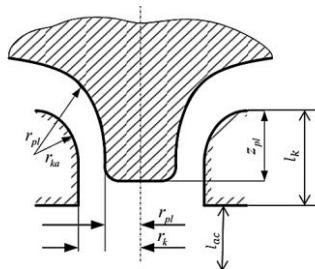


Рисунок 1 – Геометрия эмиссионного «короткого» канала при формировании столба плазмы Z_{pl}

Основной задачей при создании математической модели является установление зависимости коэффициента извлечения от геометрических размеров и формы эмиссионного канала. Ток эмиссии зависит от плотности тока j_e и площадь плазменной поверхности S_e [2; 3]:

$$I_e = j_e S_e,$$

$$j_e = \frac{1}{4} e n_e \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}},$$

($e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл, – заряд электрона, n_e – концентрация плазмы на границе, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T_e – электронная температура плазмы, $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона).

$$S_e = f S_{em},$$

где S_{em} – площадь эмиттерного электрода, с которого электроны уходят из плазмы ($S_{em} = \pi r_k^2$, r_k – радиус эмиссионного канала).

f – функция относительной площади эмитирующей поверхности, которая получается при совместном решении системы, состоящей из:

- уравнения зависимости площади эмитирующей поверхности от тока разряда и ускоряющего напряжения [2; 4]:

$$\frac{1}{4} e n_i \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} S_e = \frac{4\sqrt{2}}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{e}{m_e}} \frac{\varphi_0^{3/2}}{d^2} S_0$$

- и формулы расстояния между эмитирующей плазменной поверхностью и поверхностью эмиттерного электрода (для полусферической поверхности)

$$d = \sqrt{\frac{S_e}{2\pi}} - \sqrt{\frac{S_0}{2\pi}}.$$

Таким образом, функция f выглядит следующим образом:

$$f = f_0 \left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + A \frac{\varphi_0^{3/4}}{\sqrt{n_i}}} \right)^2,$$

где $A = \sqrt{\frac{16\pi\varepsilon_0}{9S_{em}f_0\sqrt{ekT_e}}}$, $f_0 = \frac{S_0}{S_{em}}$, $S_0 = \pi r_{pl}^2$ – площадь сечения канала (r_{pl} – радиус плазменной поверхности).

Для модели «короткого» канала радиус плазменной поверхности рассчитывается $r_{pl} = \sqrt{0.25C^2 - r_k(r_k + r_{ka})} - 0.5C$ (r_{ka} – радиус электрода, собирающего ионы) [5; 6].

$$C = r_{ka} + 2r_k + \frac{10}{9} \sqrt{\frac{e}{kT_e}} \frac{\varepsilon_0 \varphi_{em}^{3/2}}{0.14 r_{ka} e n_i},$$

$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м² – электрическая постоянная,

φ_{em} – потенциал плазмы относительно потенциала стенок канала (эмиттерного электрода).

$\varphi_0 = DU_{ac} - \varphi_{em}$ – падение потенциала в слое объемного заряда, равного радиусу сферы, с помощью которой аппроксимируется плазменная поверхность,

U_{ac} – ускоряющее напряжение,

D – коэффициент электрической проницаемости эмиссионного канала [5; 6]:

$$D = 0.267 \frac{r_k}{l_{ac}} \exp\left(-2.36 \frac{l_k - z_{pl}}{r_k}\right),$$

l_{ac} – длина ускоряющего промежутка,

l_k – длина эмиссионного канала.

Положение плазменной поверхности задается выражением [4; 5]:

$$z_{pl} = l_k - \frac{r_k}{2.36} \ln\left(\frac{r_k}{l_{ac}} \frac{0.267 U_{ac}}{\varphi_{em}}\right).$$

Данные расчеты могут использоваться при создании компьютерной модели, визуализирующей картину зависимости проникновения плазмы в эмиссионный канал от геометрических данных самого канала.

Список литературы

1. Источники электронов с плазменным эмиттером / Ю. Е. Крейнделъ [и др.] ; под общ. ред. Ю. Е. Крейнделя. – Новосибирск : Наука, 1983. – 120 с.
2. Чен, Ф. Введение в физику плазмы / Ф. Чен. – М. : Мир, 1987. – 398 с.
3. Окс, Е. М. Источники электронов с плазменным катодом / Е. М. Окс. – Томск : Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.
4. Франк-Каменецкий, Д. А. Лекции по физике плазмы / Д. А. Франк-Каменецкий. – М. : Атомиздат, 1964. – 283 с.
5. Груздев, В. А. Формирование эмиссионного тока в плазменных эмиттерах электронов / В. А. Груздев, В. Г. Залесский // Прикладная физика. – 2009. – № 5. – С. 87–92.
6. Залесский, В. Г. Эмиссионные и электронно – оптические системы плазменных источников электронов : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.04 / В. Г. Залесский. – Минск, 2015. – 316 л.

This paper presents a mathematical model describing the relationship between the plasma column height and the geometric dimensions of the emission channel.

Сковородко Марина Александровна, аспирант Витебского государственного университета имени П. М. Машерова, г. Витебск, Республика Беларусь, volal26@ya.ru.

Научный руководитель – *Антонович Дмитрий Анатольевич*, кандидат технических наук, доцент, заведующий сектором лучевых методов сварки отдела электронно-лучевых технологий и физики плазмы ГНУ ФТИ Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь.

УДК 004.5

Р. О. СИДОРЧУК, Н. А. БОГДАН

TELEGRAM-БОТ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ РАЗВИТИЯ ПЛОСКОСТОПИЯ

Современные технологии, включая мессенджеры и Telegram-боты, делают полезные инструменты доступными для людей, меняя подход к решению различных задач. В работе представлена разработка бота, которая открывает новые возможности для диагностики плоскостопия и поддержки здоровья, что является важным шагом к улучшению качества жизни и профилактике заболеваний. Созданный бот имеет несколько ключевых преимуществ: эффективность и точность, бот обеспечивает автоматические расчеты, что позволяет пользователям быстро получать результат и сокращает вероятность ошибок; удобство использования, интерфейс в мессенджере Telegram делает процесс диагностики простым и доступным для широкой аудитории, включая людей, не имеющих специализированных знаний; бот способствует повышению осведомленности пользователей о состоянии их стоп и предлагает рекомендации по профилактике заболевания, что может улучшить качество жизни.

На современном этапе плоскостопие становится частой проблемой в жизни человека. Эта патология может стать причиной ухудшения качества жизни в любом возрасте. Столкнувшись с этой болезнью, человек отмечает тяжесть и боли в ногах, он не способен подолгу находиться в стоячем положении, ходить на длительные дистанции. Из-за деформации стопы трудно подобрать удобную и красивую обувь.

Деформации стопы запускают развитие многих болезней, связанных с опорно-двигательным аппаратом. Существующие методы диагностики позволяют выявить развитие плоскостопия на ранних стадиях, однако их доступность для широких масс населения ограничена. Таким образом, предложенная тема исследования является актуальной.

Целью работы является разработка telegram-бота, позволяющего провести экспресс анализ данных замеров стопы по методикам В. А. Штритера и И. М. Чижина для раннего выявления деформаций стопы.

Используя современные устройства, такие как смартфоны, ноутбуки, персональные компьютеры и другие устройства с выходом в интернет, большую популярность получили мессенджеры. На сегодняшний день существует мессенджер, набравший большую популярность в СНГ странах и во всем мире благодаря своей кроссплатформенности, конфиденциальности и удобству использования стал Telegram. Благодаря ему люди могут взаимодействовать друг с другом на расстоянии, так же это дало возможность новым инструментам, которые упрощают взаимодействие между людьми и цифровыми системами. Одним из таких инструментов стали чат-боты-программы, выполняющие определенный скрипт и помогающие людям в различных задачах. Они могут автоматизировать процессы, вести беседу, взаимодействовать с клиентами и отвечать на вопросы. Все это набирает большую популярность – люди общаются друг с другом, узнают новости и экономят время через использование telegram ботов.

По сравнению с собственным сайтом у Telegram ботов есть возможность беспрепятственного бесплатного размещения в открытый доступ мессенджера и простота правки кода, что на начальном этапе проще для реализации, поэтому был сделан выбор в пользу чат-бота. Для разработки чат-бота был выбран редактор кода PyCharm. PyCharm – это мощная интегрированная среда разработки (IDE), созданная компанией JetBrains, спе-

циально ориентированная на язык Python. Она предлагает разработчикам множество инструментов для написания, отладки и тестирования приложений [1; 2].

Большим преимуществом можно назвать обширное количество библиотек и фреймворков, которые позволяют больше свободного выбора в разработке. Среди них – Flask, Django и FastAPI, которые позволяют создавать как простые, так и сложные приложения.

В качестве языка программирования для нашего Telegram бота был выбран Python. Python – один из самых популярных и удобных языков программирования в мире. Он был разработан в начале 1990-х годов и стал любимым инструментом многих разработчиков благодаря своей простоте и гибкости. Python позволяет быстро и эффективно создавать приложения, что особенно важно при разработке ботов. Одной из ключевых особенностей Python является его обширная стандартная библиотека и поддержка сторонних библиотек. Это позволяет разработчикам использовать готовые решения и сосредоточиться на реализации функциональности своих приложений. Можно писать очень широкий спектр приложений, например, веб-приложения, скрипты для автоматических задач, приложения для анализа данных и машинного обучения и другие, что делает. Важно отметить, что Python активно развивается, и сообщество разработчиков постоянно вносит улучшения и новые возможности в язык, что делает его еще более мощным инструментом. Для создания бота была использована библиотека `python – telegram – bot`. Эта библиотека предоставляет удобный интерфейс для взаимодействия с API Telegram, что значительно упрощает процесс разработки. Она позволяет отправлять и получать сообщения, управлять чатами, работать с медиа – файлами и обрабатывать команды, что делает создание ботов более интуитивным. Одним из главных преимуществ `python – telegram – bot` является его простота в использовании. Библиотека предлагает четкий и понятный API, благодаря которому разработка ботов становится быстрой и эффективной. Python – telegram – bot обеспечивает высокий уровень безопасности и защиты данных. Библиотека использует современные методы шифрования, что делает ее надежным выбором для разработки ботов, работающих с личной информацией пользователей. Это особенно важно для нашего проекта, где бот собирает данные о здоровье пользователей.

В целом, библиотека `python – telegram – bot` является хорошим инструментом для создания ботов в Telegram, сочетая простоту, универсальность и высокий уровень безопасности. Она открывает множество возможностей для разработки инновационных приложений, которые могут эффективно взаимодействовать с пользователями [1].

Основные этапы разработки бота:

1. Установка и настройка окружения.

– Установка IDE: Для разработки был выбран PyCharm, так как она предоставляет мощные инструменты для работы с Python.

– Создание нового проекта: Создав новый проект первым делом следовало настроить необходимые зависимости для работы с библиотекой `python – telegram – bot`.

2. Подключение библиотеки `python – telegram – bot`.

– Установка библиотеки: Библиотека `python – telegram – bot` была установлена с помощью пакетного менеджера `pip`.

– Получение токена бота: Токен бота был получен от BotFather в Telegram. Этот уникальный идентификатор позволяет боту взаимодействовать с серверами Telegram API, обеспечивая авторизацию, настройку и идентификацию бота (рисунок 1).



Рисунок 1 – BotFather для работы с Telegram ботами

3. Реализация основной логики бота.

– Создание классов и методов: Разработка классов и методов для обработки команд от пользователей, включая ввод измерений и получение рекомендаций.

– Функции для диагностики: Бот включает функции для ввода данных о стопах, а также реализует методы Штритера и Чижина для определения плоскостопия. Эти методы используют расчеты для анализа введенных пользователем данных.

Пример кода для обработки команды «/start»:

```
@bot.message_handler(commands = ['/start'])
def start(message):
    markup = types.ReplyKeyboardMarkup(resize_keyboard = True)
    buttons = ['Диагностика', 'Рекомендации', 'Сохраненные результаты']
    markup.add(*buttons)
    bot.send_message(message.chat.id, «Выберите действие: », reply_markup = markup)
    @bot.message_handler(func = lambda message: True)
    defhandle_measurements(message):
    bot.send_message(message.chat.id, «Введите длину стопы в сантиметрах: »)
```

4. Обработка входящих сообщений.

– Настройка обработчиков: Настройка обработчиков для различных типов сообщений, включая текстовые сообщения и команды.

– Логика распознавания: Реализована логика для анализа текстовых сообщений от пользователя, чтобы определить необходимые параметры для диагностики.

5. Тестирование.

– Проведение тестирования: Мы тестировали функциональность бота на разных этапах разработки, проверяя корректность обработки данных, функционирования всех кнопок и выдачи рекомендаций.

Разработка Telegram-бота с использованием библиотеки `python – telegram – bot` обеспечивает эффективное взаимодействие с пользователями и позволяет гибко настраивать функционал для диагностики плоскостопия. Бот предоставляет удобный инструмент для получения информации о состоянии здоровья стоп, делая его полезным для широкой аудитории [2]. Для наглядной демонстрации работы Telegram-бота для диагностики плоскостопия рассмотрим следующий сценарий использования (рисунок 2):

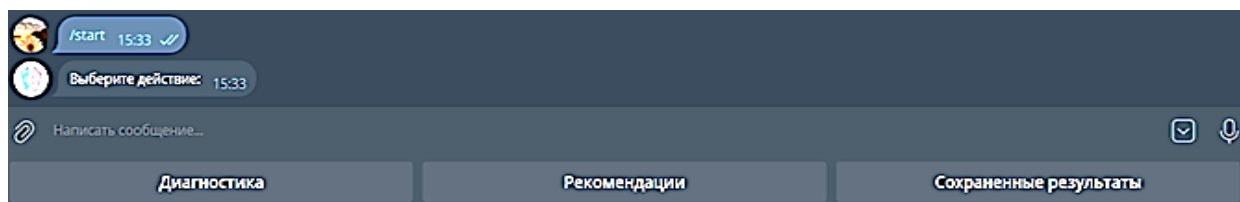


Рисунок 2 – Начальное меню Telegram-бота

Пользователь запускает бота и выбирает опцию диагностики. Бот запрашивает у пользователя метод обработки. После выбора метода диагностики пользователь следует инструкции измерений. В случае случайного нажатия у пользователя будет возможность вернуться обратно, нажав кнопку «Назад».

Пользователь по инструкции вводит данные в Telegram-бот. После выполнения двух методов бот обрабатывает введенные данные, выполняет необходимые расчеты и возвращает результаты, предоставляя пользователю информацию о состоянии его стоп и рекомендации по уходу. Так же после вывода общего результата пользователь может увидеть результаты предыдущих измерений (рисунок 3).

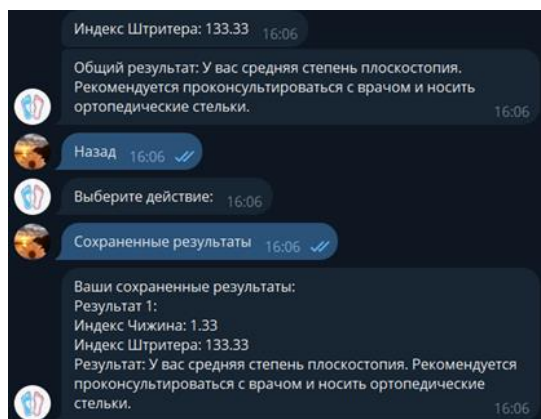


Рисунок 3 – Демонстрация сохранения результатов

В современном мире множество людей, включая детей, взрослых и пожилых, сталкиваются с заболеваниями стоп, которые могут вызывать дискомфорт и боль. Если не принимать меры, это может привести к серьезным проблемам с опорно-двигательным аппаратом. Учитывая эту проблему, компьютерная диагностика стопы становится важной задачей.

В результате нашего исследования был разработан Telegram-бот, который позволяет пользователям быстро вводить данные о своих стопах и получать расчеты по методам В. А. Штритера и И. М. Чижина.

Список литературы

1. Аносов, В. С. Компьютерно-фотоплантографическая методика диагностики патологии стоп / В. С. Аносов // Рецепт. – 2006. – № 6. – С. 153–158.
2. Марков, С. В. Программирование на Python: создание веб-сервисов и ботов / С. В. Марков. – СПб. : Питер, 2022. – 368 с.

Modern technologies, including instant messengers and Telegram bots, make useful tools available to people, changing the approach to solving various problems. The paper presents the development of a bot that opens up new opportunities for diagnosing flat feet and maintaining health, which is an important step towards improving the quality of life and preventing diseases. The created bot has several key advantages: efficiency and accuracy, the bot provides automatic calculations, which allows users to quickly get results and reduces the likelihood of errors; ease of use, the interface in the Telegram messenger makes the diagnostic process simple and accessible to a wide audience, including people without specialized knowledge; the bot helps to increase user awareness of the condition of their feet and offers recommendations for disease prevention, which can improve the quality of life.

Сидорчук Роман Олегович, кафедра теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, romasidorchuk04@gmail.com.

Богдан Никита Анатольевич, кафедра теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, nikichpuat@gmail.com.

Научный руководитель – *Крупская Татьяна Константиновна*, магистр педагогических наук, кафедра теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, krupskay_tk@grsu.by.

УДК 537.874

М. М. ХАРТОН, А. В. НОВИЦКИЙ

МНОГОКРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА СИСТЕМЕ ЦИЛИНДРОВ ИЗ ПОЛУМЕТАЛЛА ВЕЙЛЯ

Рассмотрен процесс многократного рассеяния плоских электромагнитных волн на системе параллельных цилиндров с оптическим откликом полуметалла Вейля. С использованием точных решений для рассеяния на одиночном цилиндре получен метод полуаналитического расчета парциальных коэффициентов, демонстрирующий высокую скорость и точность. Рассчитано дифференциальное сечение рассеяния и показано влияние хиральности полуметаллов Вейля на получаемую диаграмму излучения.

Полуметаллы Вейля – класс топологических материалов, чьи низкоэнергетические квазичастичные возбуждения описываются уравнением Вейля, что обусловлено наличием так называемых узлов Вейля в зонной структуре [1]. Их уникальные топологические свойства открывают перспективы для разработки невзаимных оптических устройств нового поколения с повышенной эффективностью и компактностью. Благодаря уникальным топологическим свойствам они перспективны для создания более эффективных и компактных невзаимных оптических элементов. На практике они позволяют реализовать компактные топологические изоляторы, широкополосные циркуляторы и устройства нелинейной генерации, устойчивые к диссипации [1]. Материалы, взаимодействие электромагнитного поля с которыми подобно полуметаллам Вейля, могут быть описаны тензором диэлектрической проницаемости [2]:

$$\hat{\epsilon} = \epsilon_D(1 - \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z) + \epsilon'_D \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z + i\epsilon_a \mathbf{e}_z^\times.$$

Здесь $\mathbf{e}_z^\times$ – тензор, дуальный вектору $\mathbf{e}_z$, направленному вдоль оси кристалла. Параметры ϵ_D и ϵ'_D – комплексные компоненты диэлектрической проницаемости анизотропного полуметалла, следующие из формализма Кубо – Гринвуда; недиагональные элементы ϵ_a пропорциональны расстоянию между узлами Вейля в импульсном пространстве, связаны с аномальным эффектом Холла и обусловлены структурой полуметалла [1; 2]. В данной работе ось анизотропии предполагается направленной вдоль оси симметрии цилиндров.

Одиночные рассеиватели простой формы и состава не столь перспективны с точки зрения достижения различных свойств. Однако произвольные многокомпонентные системы слишком разнообразны и редко предо-

ставляют возможность для точного предсказания их свойств. Именно поэтому периодические структуры на основе диэлектриков, металлов или их гибридных композиций остаются ключевым объектом исследований в контексте проектирования устройств с частотной и поляризационной селективностью [3; 4]. В данной работе рассматривается периодическая система параллельных бесконечно длинных цилиндров.

Основой для построения метода расчета характеристик рассеяния на системе параллельных цилиндров является общее выражение для расходящейся цилиндрической волны [5]:

$$TM: \begin{pmatrix} \mathbf{H}(\mathbf{r}) \\ \mathbf{E}(\mathbf{r}) \end{pmatrix}_{sc} = H_0^{TM} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} b_m^{TM} e^{im\varphi} \begin{pmatrix} \mathbf{e}_z H_m^{(1)}(k\rho) \\ -\frac{1}{2} [\mathbf{e}_+ H_{m-1}^{(1)}(k\rho) + \mathbf{e}_- H_{m+1}^{(1)}(k\rho)] \end{pmatrix},$$

$$TE: \begin{pmatrix} \mathbf{H}(\mathbf{r}) \\ \mathbf{E}(\mathbf{r}) \end{pmatrix}_{sc} = H_0^{TE} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} b_m^{TE} e^{im\varphi} \begin{pmatrix} \frac{1}{2} [\mathbf{e}_+ H_{m-1}^{(1)}(k\rho) + \mathbf{e}_- H_{m+1}^{(1)}(k\rho)] \\ \mathbf{e}_z H_m^{(1)}(k\rho) \end{pmatrix}.$$

Здесь приведены выражения для ТМ и ТЕ поляризаций, соответствующих параллельности векторов $\mathbf{H}, \mathbf{E}$ оси цилиндра; комплексные векторы $\mathbf{e}_{\pm} = \mathbf{e}_{\rho} \pm i\mathbf{e}_{\varphi}$ определены на основании базиса $\{\mathbf{e}_{\rho}, \mathbf{e}_{\varphi}, \mathbf{e}_z\}$ цилиндрической системы координат, связанной с цилиндром; H_0 – амплитуда падающей волны, k – её волновой вектор. Кроме того, для изучения рассеяния падающие волны предполагаются распространяющимися в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра, поскольку этого достаточно для выявления значимых особенностей.

Если из цилиндров построить двумерную упорядоченную решётку, то возникает необходимость учитывать многократные взаимные рассеяния. При плотном расположении цилиндров это становится абсолютно необходимым. С целью описания решётки следует пронумеровать цилиндры. В двумерном случае это удобно выполнить с использованием двух индексов, пару которых мы будем обозначать v . Тогда запишем закон преобразования функций Ханкеля 1-го рода, для перехода от одной цилиндрической системы координат к другой, с параллельными осями z , опираясь на преобразование Графа [6]:

$$H_m^{(1)}(k\rho_{v'}) e^{im'\varphi_{v'}} = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} G_{m,m'}(\rho_{v,v'}, \theta_{v,v'}) J_m(k\rho_v) e^{im\varphi_v},$$

с обозначением $G_{m,m'}(\rho, \theta) = e^{i(m'-m)\pi} H_{m'-m}^{(1)}(k\rho) e^{i(m'-m)\theta}$. Геометрический смысл прочих входящих величин, характеризующих взаимное расположение цилиндров, пояснен на рисунке 1. Там же отмечены углы α и χ , используемые для преобразования Графа.

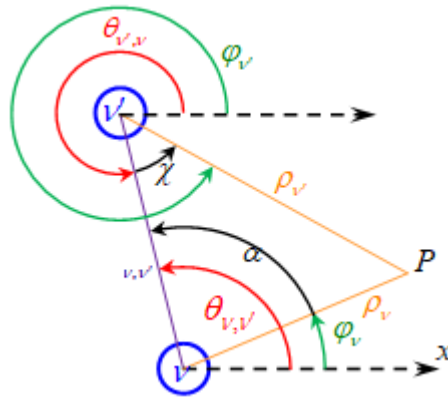


Рисунок 1 – Величины, характеризующие взаимное расположение цилиндров

Ось x на рисунке 1 соответствует направлению распространения падающей плоской волны.

Свойства введённой функции $G_{m,m'}(\rho, \theta)$. СЛАУ относительно парциальных коэффициентов рассеяния:

$$\sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{v'} \left[\delta_{m,m'} \delta_{v,v'} (1 + i\Omega_v) + (1 - \delta_{v,v'}) G_{m,m'}(\rho_{v,v'}, \theta_{v,v'}) \right] b_{m',v'} = -i^m e^{ikx_{v'}} H_0,$$

Здесь подразумевается суммирование по всем цилиндрам решётки в сумме по ν' ; $x_{\nu'}$ представляет расстояние до ν' -го цилиндра от некоторого «нулевого» уровня вдоль направления падения плоской волны. Коэффициент Ω_{ν} зависит от поляризации и структуры цилиндра. Для многослойного цилиндра он может быть определен с помощью операторного метода [5]. В случае однородной структуры можно его получить также и прямым решением уравнений Максвелла. Итак, он имеет вид:

$$\Omega_{\mu} = \frac{\beta J_m(k_{\nu} R_{\mu}) \Delta_m Y_m(k R_{\mu}) - Y_m(k R_{\mu}) \Delta_m^{\chi} J_m(k_{\nu} R_{\mu})}{\beta J_m(k_{\nu} R_{\mu}) \Delta_m J_m(k R_{\mu}) - J_m(k R_{\mu}) \Delta_m^{\chi} J_m(k_{\nu} R_{\mu})},$$

где $\beta = \sqrt{\varepsilon_{\nu}} \varepsilon_{\nu} = \varepsilon_D - \varepsilon_a^2 / \varepsilon_D$ и $\beta = (\sqrt{\varepsilon_D}')^{-1}$ для ТМ и ТЕ поляризаций соответственно. Также использовано обозначение $\Delta_m^{\chi} F_m = (1 - \chi) F_{m-1} - (1 + \chi) F_{m+1}$ для любых функций F_m с одинаковыми аргументами и разными порядками; волновое число $k_{\nu} = k \sqrt{\varepsilon_D'}$ (ТЕ) или $k_{\nu} = k \sqrt{\varepsilon_{\nu}}$ (ТМ). С целью нахождения решения следует ограничить систему каким-то порядком m_{max} который зависит от требуемой точности, а также соотношения длины волны и характерных размеров системы.

Представленный подход позволяет получить решение для рассеянных полей, которое можно вычислить с высокой точностью в любой точке – как вблизи собственно системы, так и на значительном расстоянии. В частности, для дифференциального сечения рассеяния на единицу длины цилиндра:

$$\frac{d\sigma_{sc}}{Ld\varphi} = \lim_{r \rightarrow \infty} \left(r \frac{|E_{sc}|^2}{|E_{inc}|^2} \right) = \frac{2}{\pi k} \left| \sum_{\nu} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} b_{m,\nu} i^{-m} e^{im\varphi} e^{-ik(x_{\nu} \cos \varphi + y_{\nu} \sin \varphi)} \right|,$$

где L – длина цилиндра, $(\cdot)_{sc}, (\cdot)_{inc}$ – амплитуды рассеянной и падающей волн, (x_{ν}, y_{ν}) – координаты ν -го цилиндра.

Результаты расчетов рассеяния плоской ТМ – волны для системы из 19 полуметаллических цилиндров, расположенных на расстояниях d друг от друга с гексагональной симметрией, приведены на рисунке 2.

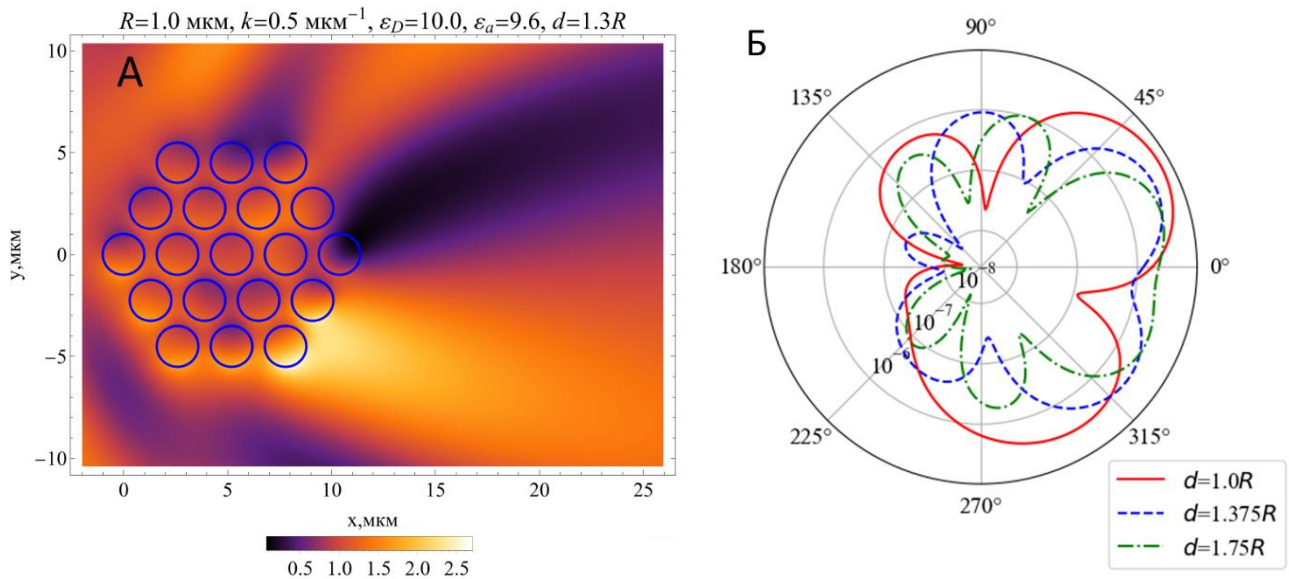


Рисунок 2 – Распределение квадрата напряжённости магнитного поля при рассеянии плоской электромагнитной волны ТМ-поляризации на гексагональной системе цилиндров $|H|^2$ (А), расположенных на расстоянии d друг от друга, и удельное дифференциальное сечение рассеяния $d\sigma_{sc}/Ld\varphi$ [м] для различных расстояний между цилиндрами в данной системе (Б). Параметры расчётов указаны на рисунке

Для выбранных параметров наблюдается ярко выраженная асимметрия рассеяния и в близкой и в дальней зоне. Угол отклонения рассеянного излучения наиболее управляем в диапазоне $kR \sim 1$, когда основной вклад в излучение обусловлен дипольными и квадрупольными моментами. Рисунок 2а демонстрирует перераспределение энергии с формированием резкой глубокой тени в определенной угловой области размерами порядка длины волны. Как следует из рисунка 2б, дифференциальное сечение чувствительно к изменениям расстояния между

цилиндрами. Так, уменьшая расстояние между ними, можно добиться разделения основного пучка на два. При увеличении же его более выраженными становятся побочные максимумы – возрастает их наблюдаемое число.

Асимметричность рассеяния, наблюдаемая в проведенных расчетах, связана с высокими значениями недиагональных компонент тензора диэлектрической проницаемости полуметаллов Вейля. Отметим также, что в предположении направленности оси кристалла вдоль оси цилиндра для ТЕ поляризации эффекты асимметрии рассеяния не проявляются, то есть система ведёт себя как диэлектрик, что может быть использовано при создании поляризационных селекторов. Хорошая настраиваемость получаемого потока излучения не только в ближней, но и в дальней зоне позволяет легко регулировать картину рассеяния с целью отклонения и расщепления пучка. Разработанный метод обладает выдающимися характеристиками точности и эффективности при расчётах относительно малочисленных систем цилиндров, в том числе имеющих более сложную внутреннюю структуру.

Список литературы

1. Light control with Weyl semimetals / C. Guo [et al.] // eLight. – 2023. – Vol. 3, № 1. – P. 2.
2. Tunable magnetless optical isolation with twisted Weyl semimetals / V. A. Chistyakov [et al.] // Nanophotonics. – 2023. – Vol. 12, № 16. – P. 3333–3340.
3. Yasumoto, K. Modeling of Photonic Crystals by Multilayered Periodic Arrays of Circular Cylinders / K. Yasumoto, H. Jia // Electromagnetic Theory and Applications for Photonic Crystals / K. Yasumoto. – CRC Press, 2006.
4. Yuan, L. Strong resonances on periodic arrays of cylinders and optical bistability with weak incident waves / L. Yuan, Y. Lu. // Physical Review A. – 2017. – Т. 95. – С. 023834.
5. Хартон, М. М. Влияние хиральности полуметаллов Вейля на рассеивающие свойства цилиндров / М. М. Хартон, А. В. Новицкий // Современные проблемы физики – 2024. XI Международная школа-конференция молодых учёных и специалистов : сб. науч. тр. (Минск, 24–26 апр. 2024 г.) / под ред. Д. С. Василевской, Е. С. Жарниковой. – Минск : Ковчег, 2024. – с. 95–98.
6. Abramowitz, M. Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs and mathematical tables: Dover books on advanced mathematics. Handbook of mathematical functions / M. Abramowitz, I. A. Stegun. – New York : Dover publ, 1972.

The process of multiple scattering of plane electromagnetic waves on a system of parallel cylinders with the optical response of a Weyl semimetal is considered. Using exact solutions for scattering on a single cylinder, a method for semi – analytical calculation of partial coefficients, demonstrating high speed and accuracy, is developed. The differential scattering cross – section is calculated and the effect of the chirality of Weyl semimetals on the resulting radiation diagram is shown.

Хартон Михаил Максимович, студент 4 курса физического факультета Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, michelkharton@gmail.com.

Научный руководитель – *Новицкий Андрей Викторович*, доктор физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, andreyvnovitsky@gmail.com.

УДК 004.056.53

П. И. СОЛОВЕЙ, В. А. ЧЕРНЯК

СИСТЕМА ПЕРСОНАЛЬНОГО ДОСТУПА НА ОСНОВЕ ГОЛОСОВОЙ БИОМЕТРИИ

Представлена система голосовой аутентификации, разработанная на платформе MATLAB, которая использует уникальные физические особенности голосового сигнала пользователя для обеспечения персонального доступа и демонстрирует высокую точность идентификации.

В последнее время быстрыми темпами развиваются биометрические технологии для задач идентификации и аутентификации.

Биометрическая аутентификация – это процесс подтверждения личности человека с использованием уникальных физиологических или поведенческих характеристик. Голосовая биометрия представляет собой один из самых удобных и высокоэффективных методов аутентификации, поскольку голос является уникальным для каждого человека.

В работе предлагается система персонального доступа на основе голосовой аутентификации, которая использует физические особенности голосового сигнала пользователя и исключает возможность подделки голоса без применения сложных технологий. Рассмотрим использование ее модели для контроля доступа на основе аудиодомофонной системы. Модель системы реализует следующие шаги.

1. Активация системы и включение микрофона.

На этом этапе система должна распознать, что пользователь хочет воспользоваться домофоном. Это может происходить несколькими способами:

- Нажатие кнопки вызова на домофоне (обычный сценарий для гостей).
- Голосовая активация – пользователь произносит ключевую фразу.

2. Получение дискретного голосового сигнала.

После активации включается микрофон и выполняется фильтрация фонового шума, нормализация громкости и аналого-цифровое преобразование. При этом аудиосигнал разбивается на короткие временные сегменты (обычно по 25 мс с перекрытием 10 мс), что необходимо, так как голос – динамический сигнал, и его характеристики меняются во времени. После чего выделяются спектральные характеристики голоса на основе преобразования Фурье (FFT) и оконной функции Хэмминга [1]. В итоге получаем цифровое представление голоса, которое передается в блок биометрической идентификации.

3. Извлечение биометрических признаков.

На данном шаге анализируются уникальные особенности голоса путем:

- Преобразования сигнала в мел-шкалу (Mel-Scale) [2] и его логарифмическое представление, что приближает обработку к тому, как
- Дискретное косинусное преобразование (DCT), которое позволяет выделить MFCC-коэффициенты (Mel – Frequency Cepstral Coefficients), которые и являются «отпечатком голоса» и широко используются в голосовой биометрии.

4. Аутентификация пользователя.

На этом шаге выполняется классификация сигнала на основе полученных признаков и цифровой отпечаток голоса сравнивается с образцами в имеющейся базе данных до совпадения выше заданного порога.

Получение MFCC коэффициентов цифрового отпечатка голоса включает следующие преобразования:

4.1. Чтение аудиосигнала.

Аудиосигнал представляется как дискретная последовательность отсчетов: $x[n]$, $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, где N – общее количество отсчетов в аудиофайле, а сам сигнал записан с частотой дискретизации f_s (Гц).

4.2. Предварительная обработка.

Чтобы компенсировать затухание высоких частот, применяют фильтр: $y[n] = x[n] - \alpha x[n-1]$.

Обычно берут $\alpha = 0.97$.

4.3. Разбиение на кадры (окна).

Аудиосигнал разбивается на небольшие окна длительностью T_w секунд с шагом T_s :

Длина кадра (в отсчетах): $L = T_w \cdot f_s$.

Шаг кадра (в отсчетах): $S = T_s \cdot f_s$.

Количество кадров: $M = \left\lceil \frac{N-L}{S} \right\rceil + 1$.

4.4. Применение оконной функции.

Каждый кадр умножается на оконную функцию Хэмминга: $w[n] = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{L-1}\right)$,

$$y_m[n] = x_m[n] \cdot w[n], \quad 0 \leq n < L$$

4.5. Преобразование Фурье (FFT)

Для каждого кадра вычисляем:

Быстрое преобразование Фурье (FFT):

$$X_m[k] = \sum_{n=0}^{L-1} y_m[n] e^{-j \frac{2\pi}{L} kn}, \quad k = 0, 1, \dots, L-1.$$

4.6. Применение Mel-фильтров (создаёт эффект рисования мелом на активном слое).

Используем Mel-шкалу (внесистемная единица высоты звука): $\text{mel}(f) = 2595 \log_{10} \left(1 + \frac{f}{700}\right)$.

4.7. Дискретное косинусное преобразование.

Берём логарифм энергии: $L_j = \log(E_j)$.

Затем вычисляем DCT (дискретное косинусное преобразование):

$$C_n = \sum_{j=1}^M L_j \cos\left(\frac{\pi n}{M} \left(j - \frac{1}{2}\right)\right), \quad n = 0, 1, \dots, N_{mfcc} - 1.$$

5. Принятие решения об открытии двери.

В зависимости от результатов проверки система может:

Разрешить доступ, если пользователь успешно идентифицирован. ✓

Отклонить доступ, если голос не совпал с зарегистрированным профилем. Система может предложить повторную попытку или альтернативный метод входа (например, ввод PIN-кода или вызов охраны). ✕

Запросить дополнительную проверку, если голос не распознан. □

После открытия двери система может:

- Отправить уведомление владельцу квартиры о входе (например, через мобильное приложение).
- Записать данные о входе в журнал логов (кто и когда заходил).



Рисунок 1 – Блок-схема «Система управления доступом»

В процессе исследования была создана программа на MATLAB, которая позволяет записывать голосовые данные и сохранять их в формате .wav. В рамках программы реализована возможность изменять частоту дискретизации, что позволяет пользователю выбрать оптимальные параметры для записи аудио в зависимости от целей проекта. При этом, программа позволяет не только записывать и сохранять аудиофайлы, но и преобразовывать их в текстовые файлы, содержащие вещественные данные амплитудного спектра. Это позволяет оценить точность записи, а также провести анализ и сравнение между оригинальным аудиофайлом и его текстовым представлением.

Пользователь имеет возможность задавать различные параметры записи, включая частоту дискретизации. Это позволяет учитывать особенности оборудования и сценариев использования.

В результате экспериментов был выбран ряд значений частоты дискретизации f_s и произведено масштабирование длительности слабого сигнала $\text{time} = (1:\text{length}(\text{audioData}))/f_s$. Вычисление среднеквадратичной ошибки (MSE) между оригинальным сигналом и восстановленным показало их совпадение с высокой точностью, не более $1e^{-6}$.

Для оценки возможности биометрической идентификации с использованием модели в среде Matlab аудио-сигнал разбивается на короткие временные окна (обычно 25 мс с перекрытием 10 мс). Это необходимо для анализа временных и спектральных характеристик сигнала. Далее производятся следующие процедуры; для первых 12-ти коэффициентов MFCC диаграмма зависимости их от времени показана на рисунке 2.

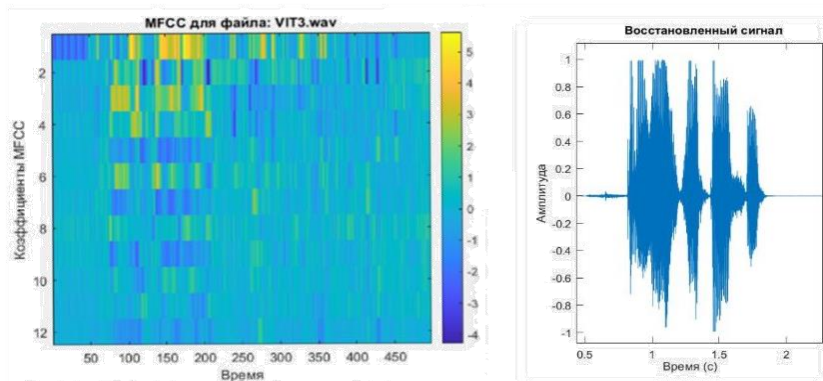


Рисунок 2 – Коэффициенты MFCC и восстановленный сигнал

Результаты экспериментов показали, что правильный выбор параметров записи и анализа влияет на качество распознавания, обеспечивая высокую точность идентификации. Методы, такие как MFCC и преобразование Фурье, продемонстрировали свою значимость для извлечения уникальных признаков голоса. В эксперименте файлы проходили по совпадению 70 %.

Список литературы

1. Улучшение биометрического распознавания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/> Улучшение биометрического распознавания. – Дата доступа: 30.05.2015.
2. Мел-кепстральные коэффициенты (MFCC) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/140828/> Мел-кепстральные коэффициенты (MFCC). – Дата доступа: 28.03.2012.
3. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие / А. Б. Сергиенко. – 3-е изд. – СПб., 2011. – 768 с.

This paper presents a voice authentication system developed on the MATLAB platform that utilizes the unique physical properties of a user's voice signal to provide personal access and demonstrates high identification accuracy.

Соловей Павел, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, pahkaholmailcom@gmail.com.

Черняк Виталий, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, cherniak.vitalik7@gmail.com.

Научный руководитель – *Ассанович Борис Алиевич*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, Bas@grsu.by.

УДК 535

М. А. ЦИДИК, А. Л. СИТКЕВИЧ

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНТЕРФЕРОГРАММ И МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ИХ ОСНОВЕ ПОЛЕЙ ПЛОТНОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Описана автоматическая обработка и моделирование интерферограмм, полученных методом скоростной фотосъёмки, а также построение 3D-модели поверхности исследуемого объекта с помощью полученной информации. Для достижения результата в ходе работы использована платформа MATLAB и её пакеты.

Объектом работы являются интерферограммы кратера кавитации парогазового пузырька на поверхности свинцовой пластины, зарегистрированные через малые промежутки времени методом скоростной голографической съёмки. Цель работы – с помощью математического ПО осуществить автоматическое сканирование и обработку изображения интерферограммы, убрать шум измерительных приборов, аппроксимировать значения интерференционных полос до узких линий, найти их смещение относительно невозмущённого состояния и, исходя из этого, рассчитать распределение лазерной плазмы и, как следствие, полей распределения электронной плотности. Поля строятся как функции от пространства и времени, что позволяет построить полную 3D-модель объекта в виде непрерывной поверхности.

На рисунке 1 [1] представлена исследуемая интерферограмма. Для автоматизации процесса обработки изображений была написана программа на языке программирования MATLAB, выполняющая все задачи, поставленные целью работы. Её метод выполнения описан далее.

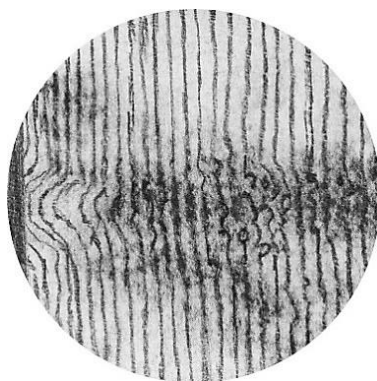


Рисунок 1 – Исследуемая интерферограмма, зафиксированная после окончания лазерного воздействия

Предобработка изображений работает по следующему алгоритму:

При запуске программы первым действием является инициализация новой переменной, значением которой служит считанное оригинальное изображение интерферограммы

```
(originalImage = imread('temp/interferogram.png'));
```

Далее, с помощью пакета ImageProcessingToolbox, последовательно выполняются следующие действия:

а. картинка переводится из цветовой модели RGB в оттенки серого (рисунок 2–1)

```
grayImage = rgb2gray(originalImage);
```

б. регулируется уровень интенсивности для оптимальной считываемости интерференционных полос (рисунок 2 – 2),

```
%I2 = imadjust(grayImage);
```

с. ко всей картинке применяется размытие Гаусса для минимизации шума (рисунок 2–3),

```
gaussImage = imgaussfilt(grayImage, 2);
```

д. изображение переводится в бинарный формат, оставляя только чёрные и белые пиксели (рисунок 2–4),

```
level = graythresh(gaussImage);
```

```
binareImage = im2bw(gaussImage, level);
```

е. с помощью встроенной функции убираются тёмные «дыры» в изображении полос (рисунок 2–5).

```
workImage = imfill(binareImage, 'holes');
```

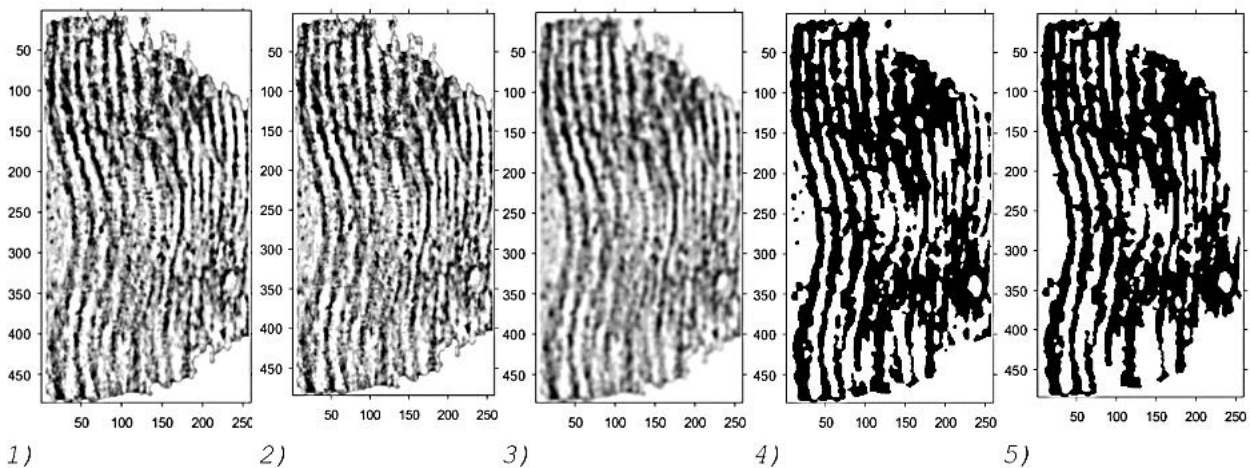


Рисунок 2 – Промежуточные обрабатываемые изображения интерферограммы в ходе выполнения программного кода

Чтобы получить поле распределения электронной плотности в лазерной плазме требуется рассчитать отклонение каждой требуемой интерференционной полосы от её невозмущённого состояния. Для этого нужно построить две кривые: одну действительную, искажённую, полученную из обработанного изображения, и одну спрогнозированную, отображающую невозмущённое состояние. Построение обеих линий обуславливает использование расширения Curve Fitting Toolbox.

Для построения искажённой линии программа запрашивает у пользователя ввод (указание) курсором какой-либо линии, находит высоту изображения, и для каждой пиксельной строчки изображения находит центр тёмной полосы в данной строчке, заносит её координаты в массивы:

Этот процесс повторяется для каждой строчки изображения, после чего по полученным точкам строится векторная кривая, вписанная в центр интерференционной полосы, с помощью функции `createFit()`:

```
[X, Y] = createFit(Ycenter, Xcenter);
```

```
Y(Y > imageHeight) = [] ;
```

```
X(length(Y)+ 1: end) = [] ;
```

```
plot(X, Y, 'LineWidth', 2);
```

```
plot([mean(X(1: 10)) mean(X(end -10: end))], [Y(1) Y(end)], 'LineWidth', 2);
```

Чтобы построить невозмущённую кривую, программа соединяет центры десяти первых и последних строк, полученные при построении искажённой кривой (рисунок 3 – красная кривая).

Затем, для нахождения отклонения, от каждой точки текущей кривой опускается перпендикуляр на невозмущённую кривую, фиксируется его длина в пикселях. Далее значение отклонения в пикселях делится на среднюю ширину полосы, определяемую как среднее расстояние между двумя соседними полосами. Полученное

значение будет равно отклонению текущей кривой, представленному в количестве полос, на которое сместилась интерференционная картина.

Смещение $\Delta k(x, y)$ и изменение показателя преломления связаны между собой интегральным уравнением Абеля [1–3]:

$$\Delta k(x, y) = \frac{2}{\lambda} \int_{r-y}^R [n(x, r) - n_0] \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - y^2}},$$

где $r = \sqrt{z^2 - y^2}$. Решая это уравнение:

$$n(x, r) - n_0 = -\frac{\lambda_i}{\pi} \int_r^R \frac{dk(x, y)/dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy.$$

Отсюда можно узнать поле концентрации электронов N_e , если определить показатель преломления плазмы $n(z, r)$:

$$\begin{aligned} N_e(z, \rho) &= -2\pi m_e c^2 (n(z, \rho) - 1/e^2 \lambda^2) = \\ &= -0,233 \times 10^{14} \frac{n(z, \rho) - 1}{\lambda^2} \text{ см}^{-1} \end{aligned}$$

Чтобы решить это уравнение численно, применяется метод ступенчатой аппроксимации (метод Пирса). С помощью полученных данных о смещении конкретной полосы, сформируем массив данных с концентрациями электронов N_e на протяжении данной полосы, затем построим по этим данным график (рисунок 4–1). Повторим все те же действия ещё для нескольких полос, построим их графики концентрации, из совокупности графиков построим 3D-модель кратера кавитации (рисунок 4–2, 3).

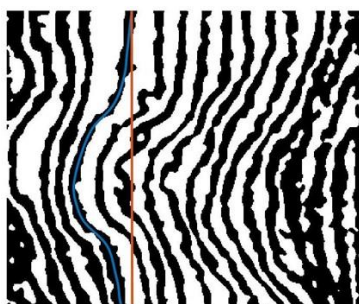


Рисунок 3 – Две кривые, построенные в процессе обработки изображения расширением Curve Fitting Toolbox

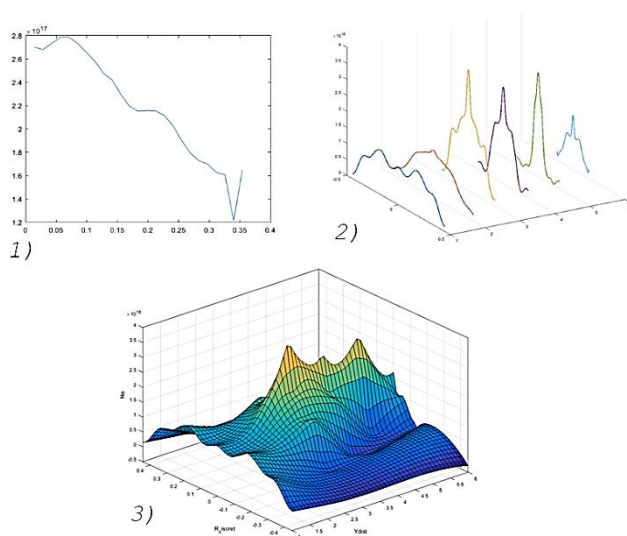


Рисунок 4 – График концентрации электронов в одной интерференционной полосе (1), полное построение объекта по нескольким полосам (2), 3D-модель в виде непрерывной поверхности (3)

Список литературы

1. Ivanov, A. Y. Droplets generation conducting during laser-plasma treating of metals in electric field / A. Y. Ivanov, A. L. Sitkevich, S. V. Vasil'ev // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Т. 2064, № 1. – С. 1–6.
2. Формирование светодетонационного комплекса в результате электрического пробоя при лазерной обработке металлического образца, находящегося во внешнем электрическом поле / С. В. Васильев [и др.] // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 92–103.
3. Формирование светодетонационного комплекса при лазерной обработке металлического образца, находящегося во внешнем электрическом поле / С. В. Васильев [и др.] // VII конгресс физиков Беларуси : сб. науч. тр., Минск, 26–28 апр. 2023 г. – Минск : Ковчег, 2023. – С. 285–286.

The paper describes automatic processing and modeling of interferograms obtained by high – speed photography, as well as the construction of a 3D model of the surface of the object under study using the information obtained. To achieve the result, the MATLAB platform and its packages were used in the course of the work.

Ситкевич Анастасия Леонидовна, аспирант (соискатель) кафедры общей физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, girl-physicist@mail.ru.

Цидик Матвей Артурович, студент 2 курса физико-технического факультета (специальность «Компьютерная физика») Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, 07matvej@gmail.com.

Научный руководитель – *Васильев Сергей Валерьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и электроники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, s.vasilijev@grsu.by.

УДК 535

А. И. БОЙКОВ

МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ РОСТА И СХЛОПЫВАНИЯ ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ

Работа посвящена обзору динамики роста и схлопывания паровых пузырей. Рассматривается процесс формирования парогазового образования на поверхность металла при воздействии излучения импульсного лазера ГОР-100 М с плотностью потока $\sim 10^6$ Вт/см² и длительностью импульса 1,2 мс в режиме свободной генерации. Изучено образование парогазового пузыря, изменение его формы и размеров на разных стадиях процесса.

Численное моделирование динамики роста и схлопывания парового пузыря является важной областью исследований в гидродинамике и теплообмене. Паровые пузыри играют ключевую роль в различных физических и инженерных процессах, таких как кипение, конденсация и кавитация. Понимание их поведения имеет критическое значение для оптимизации теплообменных систем, повышения эффективности энергетических установок и разработки новых технологий. В последние годы значительное внимание уделяется изучению динамики паровых пузырей с использованием современных численных методов. Эти методы позволяют моделировать сложные процессы, происходящие на границе раздела фаз, и учитывать влияние различных факторов, таких как температура, давление и свойства жидкости. Численное моделирование предоставляет возможность детально анализировать процессы роста и схлопывания пузырей.

Цель данного обзора – представить современные подходы и методы численного моделирования динамики паровых пузырей. В частности, будет рассмотрен процесс, протекающих вблизи мишени при воздействии излучения импульсного лазера с плотностью потока $\sim 10^6$ Вт/см² на металлический образец, расположенный в воде для описания роста пузырей под воздействием лазера и их последующего схлопывания.

Подробная схема экспериментальной установки и описание методики проведения эксперимента изложены в работе [1].

Процесс роста и схлопывания пузырей в жидкости является сложным и многогранным явлением, которое включает в себя взаимодействие различных физических факторов. Рассмотрим основные этапы и механизмы, лежащие в основе роста и схлопывания пузырей.

Для описания динамики пузырей используются различные математические модели, такие как уравнение Рэлея-Плессе, которое учитывает изменение радиуса пузыря под действием давления, поверхностного натяжения и вязкости жидкости. Более сложные модели также учитывают теплообмен и массообмен между жидкостью и паром внутри пузыря.

Пузыри в жидкости могут образовываться по различным причинам, включая кипение, кавитацию и введение газа. В случае кипения пузыри образуются при достижении температуры кипения жидкости, когда давление пара внутри пузыря становится достаточным для преодоления внешнего давления. Кавитационные пузыри возникают в зонах низкого давления, создаваемых, например, быстро движущимися лопастями пропеллера или ультразвуковыми волнами.

После образования пузырь начинает расти под действием разницы давлений между внутренней и внешней средой. Схлопывание пузыря происходит, когда внешнее давление превышает давление пара внутри пузыря. Это может произойти при изменении внешних условий, таких как изменении давления жидкости или температуры. Процесс схлопывания сопровождается резким уменьшением объема пузыря и может приводить к образованию ударных волн.

Экспериментальные исследования показали, что топография кратера, полученного при воздействии лазерного излучения на свинцовый образец, погруженный в воду (рисунок 1), существенно отличается от формы поверхности кратера, сформировавшегося в результате воздействия лазерного импульса с теми же параметрами на аналогичный образец, окруженный воздухом при нормальном давлении (10^5 Па).

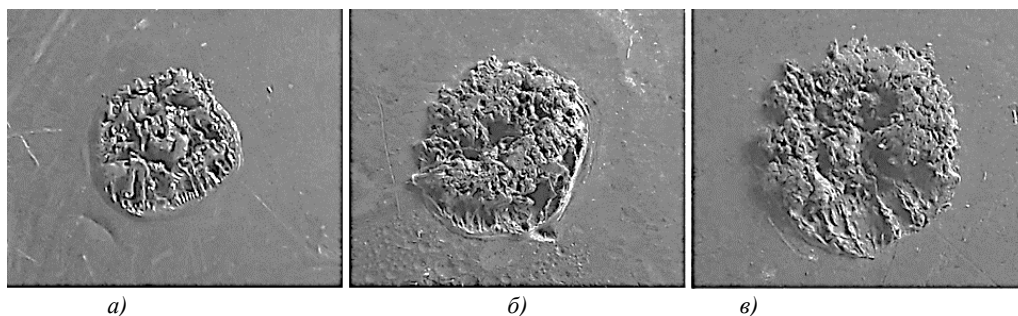


Рисунок 1 – Фотографии кратеров, полученных при воздействии на свинцовый образец, расположенный в воде, лазерных импульсов с энергией 10 Дж (а), 20 Дж (б), 40 Дж (в)

В первом случае поверхность кратера пемзообразная, вспененная, макроскопическая лунка практически отсутствует. Во втором случае внутренняя зона кратера (лунка) имеет ровную поверхность. При этом топография кратера определяется распределением энергии по пятну фокусировки лазерного излучения. На рисунке 2 представлены теневые картины, восстановленные с голограмм, зарегистрированных в различные моменты времени после начала воздействия излучения на вещество.

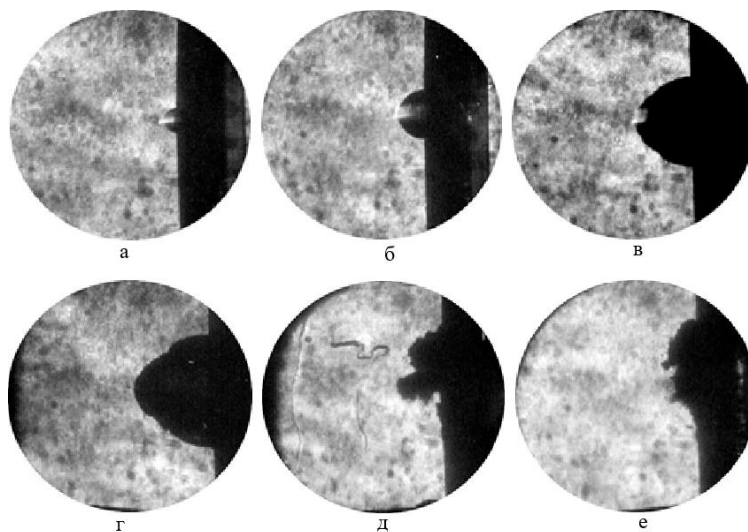
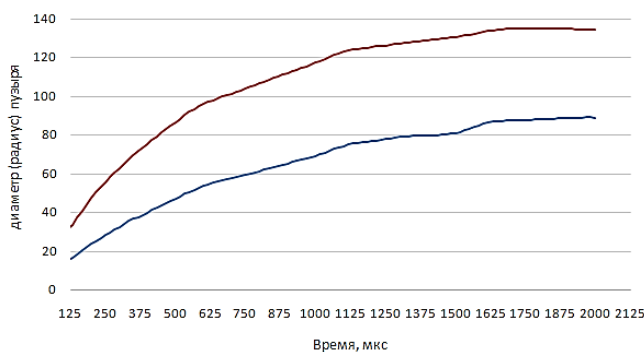


Рисунок 2 – Теневые картины парогазового образования, зарегистрированные через 10 (а), 50 (б), 500 (в), 1200 (г), 2000 (д), 3000 (е) микросекунд после начала лазерного воздействия на свинцовый образец. Диаметр поля зрения 4 сантиметра

Видно, что у поверхности облучаемого образца формируется парогазовое образование (пузырь), форма которого первоначально близка к сферической. Образование быстро увеличивается в размерах, особенно на ранних стадиях процесса. Приблизительно через 1 мс после начала воздействия форма пузыря начинает изменяться, на оси лазерного пучка формируется выпуклость. После прекращения воздействия ($\sim 1,2$ мс) размеры парогазового образования стабилизируются, и только через $\sim 1,5$ мс начинается его медленный распад. Существенно, что при этом не только уменьшаются размеры пузыря, но и случайным (не повторяющимся от одного эксперимента к другому) образом изменяется его форма. Но даже через 3 мс после начала воздействия лазерного излучения на поверхность металла (то есть через $\sim 1,8$ мс после прекращения воздействия) пароплазменное образование не исчезает.

На основе этих картин были построены графики зависимости размера пузыря от времени (рисунок 3), что позволяет детально изучить динамику его поведения. График показывает, что в начальной стадии пузырь демонстрирует интенсивный рост, что связано с увеличением температуры и давления в системе. В этот период наблюдается резкое увеличение диаметра пузыря, что может быть обусловлено активным нагревом рабочей среды под воздействием лазерного излучения. По мере приближения к максимальному размеру пузыря, темпы роста начинают замедляться, указывая на стабилизацию условий. Спустя время порядка 1,3 мс рост пузыря прекращается, что свидетельствует о его стабилизации. Это время соответствует времени прекращения воздействия лазерного луча.

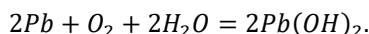
Анализ полученных данных позволяет выделить ключевые характеристики, такие как время достижения максимального размера и скорость схлопывания. Эти параметры имеют важное значение для понимания динамики парогазовых пузырей в различных условиях. Также стоит отметить, что форма графиков может варьироваться в зависимости от внешних условий, что открывает новые перспективы для дальнейших исследований. Возможно, изучение различных сред и условий поможет глубже понять механизмы роста и схлопывания пузырей, а также их влияние на процессы, происходящие в жидкостях.



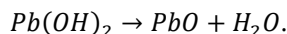
Верхний график – диаметр пузыря вдоль поверхности образца,
нижний график – радиус пузыря вдоль направления лазерного воздействия.

Рисунок 3 – Графики зависимости изменения размера парогазового образования от времени процесса

Так же установлено, что после извлечения облученного свинцового образца на его поверхности вблизи кратера (в зоне распространения основания парогазового образования) виден белый налет (порошок), который на воздухе быстро меняет цвет – становится желтовато – бурым. При облучении свинца в воздушном окружении формирования подобных порошков не наблюдается. Очевидно, белый порошок – гидроксид свинца, образовавшаяся в ходе контакта разогретого металла с кислородом и водяным паром:



В дальнейшем $Pb(OH)_2$ разлагается с образованием оксида свинца:



В заключение полученные результаты подчеркивают важность экспериментального подхода в изучении парогазовых пузырей и могут служить основой для будущих исследований в этой области.

Список литературы

1. Васильев, С. В. Развитие пароплазменного облака при лазерном воздействии на образец, находящийся в жидкости / С. В. Васильев, А. Ю. Иванов, А. Л. Ситкевич // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 202–211.

The work is devoted to reviewing the dynamics of the growth and collapse of vapor bubbles. It examines the process of forming a vapor-gas structure on the surface of a metal under the influence of radiation from a pulsed laser GOR-100M with a flux density of approximately $\sim 10^6$ W/cm² and a pulse duration of 1,2 ms in free-running mode. The formation of the vapor-gas bubble, changes in its shape, and dimensions at different stages of the process are studied.

Бойков Артур Игоревич, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, keksik.work@gmail.com.

Научный руководитель – *Ситкевич Анастасия Леонидовна*, магистр физико-математических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, gird-physicist@mail.ru.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Рассматривается машинное обучение, основные типы обучения, а также типы задач в машинном обучении и алгоритмы их решения. Используя популярный дистрибутив Anaconda, предназначенный для работы с машинным обучением, и науку о данных, получилось обучить модель методом «Случайный лес (RandomForest)». Основной целью модели являлось предсказание положения $x(t)$ и траектории гармонического осциллятора на основе набора данных. Программный код позволяет провести сравнение между полученной моделью и классическим методом. По результатам исследования можно сказать, что обученная модель получилась точной (правильность на тестовом наборе 93 %).

В современном мире объем данных стремительно увеличивается, открывая возможности для извлечения полезной информации и принятия обоснованных решений. Однако эффективное использование этих данных требует мощных инструментов, способных выявлять скрытые закономерности и предсказывать будущие события. Именно здесь ключевую роль играет машинное обучение. Машинное обучение (МО) – это направление искусственного интеллекта, которое занимается созданием алгоритмов и моделей, позволяющих компьютерам анализировать данные, извлекать из них полезную информацию и принимать обоснованные решения [1]. На рисунке 1 представлена классификация видов МО. Ключевая концепция машинного обучения заключается в построении модели на основе имеющихся данных, которая способна выявлять закономерности и применять их к новым, ранее неизвестным данным.

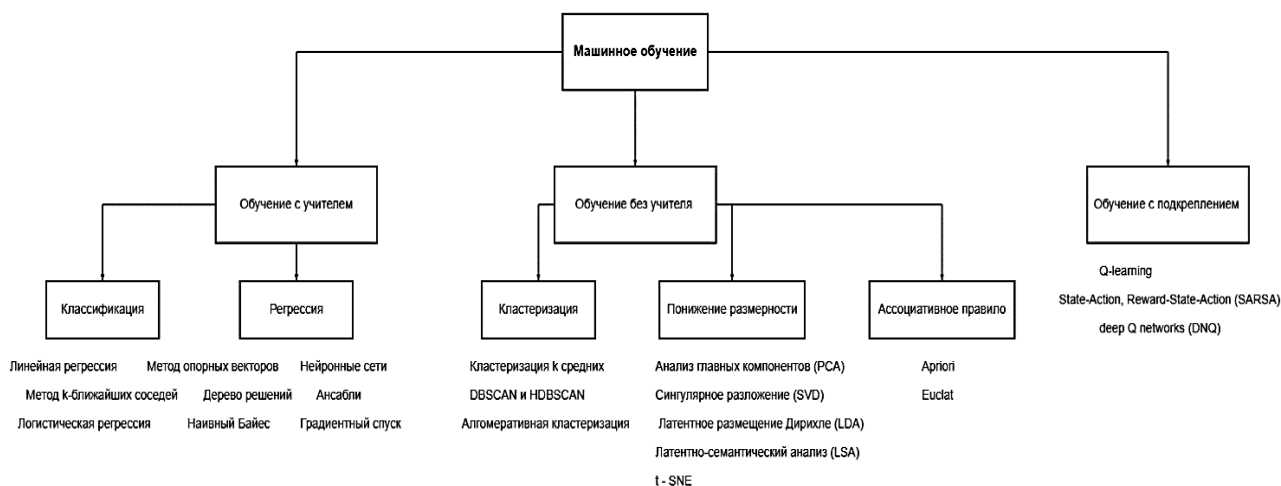


Рисунок 1 – Схема классификации типов обучения, задач и алгоритмы их решения

Рассмотрим задачу моделирования колебательных систем с использованием алгоритмов машинного обучения, а именно моделирование гармонического осциллятора с затуханием. Задачей будет являться предсказание положения $x(t)$ и траектории. В данной программе был использован дистрибутив Python – Anaconda, в который входят: NumPy, SciPy, matplotlib, pandas, IPython, JupyterNotebook, scikit – learn и многие другие библиотеки. Особенно нужно упомянуть про scikit – learn – один из самых известных инструмент и самая популярная питоновская библиотека для машинного обучения.

В общем виде уравнение движения имеет вид:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0,$$

где $m = 1.0$ – масса, $c = 0.1$ – коэффициент затухания, $k = 2.0$ – жёсткость пружины, x – координата.

Для решения поставленной задачи используется метод «Случайный лес (RandomForest)» (обучение с учителем) [2]. С помощью другой программы сгенерируем набор данных, где будут храниться: входные признаки – это время (t) и начальные условия (начальное положение(x_0) и начальная скорость(v_0)) и целевая переменная – положение $x(t)$. В свою очередь данные будут ограничены, начальное положение от -3 до 3 , начальная скорость от 0 до 2 и время от 0 до 10 . Теперь имея базу данных, приступим к обучению модели.

```

# Загрузка данных из файла
data = pd.read_csv('oscillator.csv')
# Разделение данных на признаки (X) и целевую переменную (y)
X = data[['time', 'x0', 'v0']] # Признаки: время, начальное положение, начальная скорость
y = data['x'] # Целевая переменная: положение x(t)

# Разделение данных на обучающую и тестовую выборки
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# Обучение модели
model = RandomForestRegressor(n_estimators=100, random_state=42)
model.fit(X_train, y_train)

# Оценка модели на тестовых данных
y_pred = model.predict(X_test)
mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)
print(f'\nСреднеквадратичная ошибка (MSE) на тестовых данных: {mse: .4f} »)
print('Правильность на тестовом наборе: { : .2f} ». format(model.score(X_test, y_test)))

# Ввод данных с клавиатуры
try:
    time = float(input('\nВведите время (t): «))
    x0 = float(input('Введите начальное положение (x0): «))
    v0 = float(input('Введите начальную скорость (v0): «))
except ValueError: # Обработчик ошибок
    print('Ошибка: введите числовые значения. «)
    exit()
y0 = [x0, v0]
# Решение системы
sol = solve_ivp(harmonic_oscillator, t_span, y0, t_eval=t_eval)

# Создание DataFrame для предсказания
new_data = pd.DataFrame({'time': [time], 'x0': [x0], 'v0': [v0] })

# Предсказание положения x(t)
predicted_x = model.predict(new_data)
print(f'\nПредсказанное положение x(t) для t = {time}, x0 = {x0}, v0 = {v0}: {predicted_x[0]: .4f} »)

# Предсказание траектории
predict_traектории = []
for t in t_eval:
    new_data1 = pd.DataFrame({'time': [t], 'x0': [x0], 'v0': [v0] })
    predicted_x1 = model.predict(new_data1)
    predict_traектории.append(predicted_x1[0])
Теперь напишем код для гармонического осциллятора, а также визуализацию траектории обученной мо-
дели и гармонического осциллятора.
m = 1.0 # масса
c = 0.1 # коэффициент затухания
k = 2.0 # жёсткость пружины

# Уравнение движения
def harmonic_oscillator(t, y):
    x, v = y
    dxdt = v
    dvdt = (-c * v - k * x) / m
    return [dxdt, dvdt]

# Временной интервал
t_span = (0, 10)
t_eval = np.linspace(0, 10, 1000)

```

```

# Решение системы
sol = solve_ivp(harmonic_oscillator, t_span, y0, t_eval = t_eval)
# Визуализация предсказания и гармонического
plt.plot(sol.t, sol.y [0], label = «x(t)»)
plt.plot(t_eval, predict_traектории, label = «Предсказанная траектория», color = «red», linestyle = «- -»)
plt.scatter(time, predicted_x, color = «red», label = «Предсказание»)
plt.xlabel(«Время (t)»)
plt.ylabel(«Положение (x)»)
plt.title(«Предсказание траектории гармонического осциллятора»)
plt.legend()
plt.grid()
plt.show()

```

На рисунке 2 представлен вывод в терминал при запуске программы: будет запрашиваться ввод времени (t), начального положения (x_0) и начальной скорости (v_0). И выведет среднеквадратичную ошибку (MSE) на тестовых данных, правильность на тестовом наборе и предсказанное положение $x(t)$. Приведем примеры: а) $t = 3$, $x_0 = 2$, $v_0 = 0$; б) $t = 7$, $x_0 = -2$, $v_0 = 1$. А также предоставит графическое изображение (рисунок 3).

```

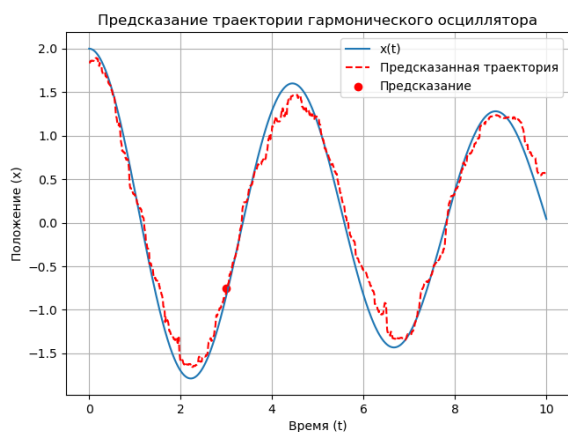
Среднеквадратичная ошибка (MSE) на тестовых данных: 0.0739
Правильность на тестовом наборе: 0.93

Введите время (t): 3
Введите начальное положение (x0): 2
Введите начальную скорость (v0): 0

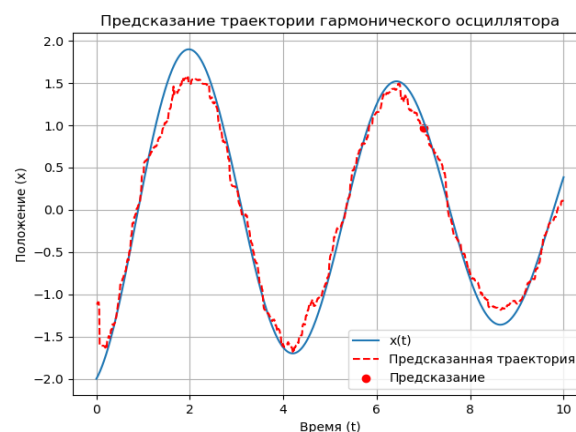
Предсказанное положение x(t) для t = 3.0, x0 = 2.0, v0 = 0.0: -0.7540

```

Рисунок 2 – Вывод в терминал примера



а)



б)

а) $t = 3$, $x_0 = 2$, $v_0 = 0$; б) $t = 7$; $x_0 = -2$, $v_0 = 1$.

Рисунок 3 – Сравнение предсказанной траектории и траектории, полученной классическим методом

Исходя из значений среднеквадратичной ошибки (MSE) = 0,0739 и правильности на тестовом наборе равной 0,93, то есть 93 %, значит обученная модель достаточно точная и пригодная для практического применения. В заключение следует отметить, что полученная модель позволяет адаптироваться к сложным и нелинейным зависимостям в данных (например, нелинейности, шумы и неопределенности), которые будет трудно описать аналитически. Другим преимуществом данной модели является способность делать предсказания новых данных без явного решения уравнений, то есть может быстро предсказывать положение осциллятора для новых входных данных (время, начальное положение и скорость), например, возможно использовать реальные данные, в то время как в классическом методе нужно решать дифференциальное уравнение при каждом новом значении начальных условий.

Список литературы

1. Мюллер, А. Введение в машинное обучение с помощью Python : руководство для специалистов по работе с данными / А. Мюллер, С. Гвидо. – М., 2018. – 393 с.
2. Бурков, А. Машинное обучение без лишних слов / А. Бурков. – СПб. : Питер, 2020. – 192 с.

Using the popular Anaconda distribution, designed for working with machine learning and data science, a model was successfully trained using the «Random Forest» method. The main goal of the model was to predict the position $x(t)$ and the trajectory of a harmonic oscillator based on a dataset. The provided code allows for a comparison between the trained model and a classical method. Based on the research results, it can be concluded that the trained model is accurate (with a test set accuracy of 93 %).

Головач Олег Сергеевич, студент 3 курса физико-технического факультета (специальность «Компьютерная физика») Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, crazidan98@mail.ru.

Научный руководитель – *Ситкевич Анастасия Леонидовна*, магистр физико-математических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, girl-physicist@mail.ru.

УДК 608.2;65.011.56;51-74

А. В. БАУМ

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СБОРА БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В ГОРОДЕ ГРОДНО

Рассмотрены теоретические основы разработки программного обеспечения по оптимизации процесса сбора муниципальных бытовых отходов на примере города Гродно.

В условиях стремительного роста городского населения и увеличения объёмов бытовых отходов проблема эффективного сбора и утилизации мусора становится одной из ключевых задач для современных городов. Город Гродно, как и многие другие города, сталкивается с рядом серьёзных проблем, связанных с утилизацией отходов. Неоптимальные маршруты сбора мусора, высокие затраты на топливо и обслуживание техники, а также негативное влияние на экологическую ситуацию требуют внедрения современных технологий для оптимизации процессов.

Целью данной работы является разработка программного обеспечения для оптимизации процесса сбора бытовых отходов в городе Гродно. Программа должна учитывать особенности городской инфраструктуры, объёмы отходов и ограничения на движение мусоровозов, чтобы минимизировать время сбора и пройденное расстояние. Основные задачи исследования включают анализ существующих систем сбора мусора, разработку математической модели, программную реализацию алгоритмов оптимизации и тестирование их эффективности.

Современные города сталкиваются с растущими объёмами бытовых отходов, что создаёт значительную нагрузку на системы сбора и утилизации мусора. Основные проблемы включают экологические, экономические и организационные аспекты. Неправильная утилизация отходов приводит к загрязнению окружающей среды, включая почву, воду и воздух. Например, несвоевременный вывоз мусора может привести к образованию стихийных свалок, которые становятся источниками токсичных веществ и парниковых газов. Это негативно влияет на здоровье населения и ухудшает качество жизни в городе.

Экономические аспекты проблемы связаны с высокими затратами на сбор и транспортировку мусора. В среднем на сбор и утилизацию отходов в городах тратится до 20% бюджета коммунальных служб. Эти затраты включают расходы на топливо, обслуживание мусоровозов, заработную плату сотрудников и содержание полигонов. Неоптимальные маршруты сбора мусора приводят к увеличению времени работы мусоровозов и расходу топлива, что также способствует перегруженности дорог и увеличению выбросов CO_2 .

Организационные аспекты проблемы включают неэффективное планирование маршрутов, недостаточную координацию между службами и отсутствие реального мониторинга заполнения контейнеров. Например, мусоровозы часто ездят по заранее заданным маршрутам, не учитывая текущее состояние контейнеров. Это приводит к тому, что некоторые контейнеры переполняются, а другие остаются полупустыми, что снижает общую эффективность системы. Для решения этих проблем используются современные технологии, такие как GPS-, ГИС-технологии, алгоритмы маршрутизации и интернет вещей (IoT). Эти технологии позволяют повысить эффективность сбора мусора и снизить затраты. Например, GPS- и ГИС-технологии позволяют отслеживать местоположение мусоровозов и контейнеров, а также строить оптимальные маршруты. Алгоритмы маршрутизации используются для минимизации времени и расстояния при сборе мусора, а интернет вещей (IoT) позволяет использовать датчики на контейнерах для передачи информации об их заполнении в реальном времени.

Для разработки математической модели процесса сбора бытовых отходов в городе Гродно учитываются следующие исходные данные:

- Количество контейнеров: 6500 евроконтейнеров объёмом $1,1 \text{ м}^3$.
- Количество мусоровозов: 33 мусоровоза с вместимостью 15 м^3 .
- Объёмы отходов: 7150 м^3 смешанных отходов ежедневно.
- Ограничения: время работы мусоровозов – 8 часов в день, дорожная сеть – 640 узлов и 1200 рёбер.

Целью математической модели является минимизация времени и расстояния, затрачиваемых на сбор мусора. Для этого необходимо решить задачу оптимизации с учётом следующих параметров:

1. **Целевая функция:** минимизация времени и расстояния.
2. **Ограничения:**
 - Каждый контейнер должен быть опорожнён не более одного раза в день.
 - Вместимость мусоровоза не должна превышать 15 м³.
 - Время работы каждого мусоровоза не должно превышать 8 часов.
 - Мусоровозы могут двигаться только по разрешённым дорогам.

Для решения задачи оптимизации используются следующие алгоритмы:

1. **Фиксированные маршруты:** маршруты заранее определены и не изменяются в процессе работы.
2. **Онлайн-маршрутизация:** маршруты строятся в реальном времени на основе данных о заполнении контейнеров и текущей дорожной ситуации.
3. **Ограниченное движение:** мусоровозы могут двигаться только прямо или поворачивать направо.

Для оценки эффективности алгоритмов были проведены тестовые расчёты на основе данных города Гродно. В рамках исследования сравнивались три основных алгоритма: онлайн-маршрутизация, фиксированные маршруты и ограниченное движение.

1. **Онлайн-маршрутизация** показала наилучшие результаты по пройденному расстоянию и времени сбора. Среднее пройденное расстояние составило 1115 км, время сбора – 457,5 минут, а экономия топлива – 12 %.
2. **Фиксированные маршруты** оказались наименее эффективными, но их простота реализации делает их привлекательными для небольших городов. Среднее пройденное расстояние составило 1220 км, время сбора – 487,5 минут.
3. **Ограниченное движение** увеличивает пройденное расстояние и время сбора, но упрощает навигацию для водителей. Среднее пройденное расстояние составило 1165 км, время сбора – 477,5 минут.

Разработанное программное обеспечение позволяет оптимизировать процесс сбора бытовых отходов в городе Гродно. Онлайн-маршрутизация показала наилучшие результаты по пройденному расстоянию и времени сбора. Внедрение системы позволит снизить затраты на сбор мусора и улучшить экологическую ситуацию в городе.

Рекомендации:

1. Внедрение онлайн-маршрутизации с использованием мобильного приложения для водителей и системы мониторинга в реальном времени.
2. Постепенный переход на ограниченное движение в наиболее загруженных районах города.
3. Оптимизация расположения контейнеров в районах с высокой плотностью населения.

Список литературы

1. Переработка и утилизация отходов производства и потребления : указатель лит. / В. М. Черепко [и др.]. – Липецк : ЛОУНБ, 2017. – 156 с.
2. Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : IV междунар. форум (СПб., 6 нояб. 2024) : сб. тез. докл. : в 2 ч. Ч. 2. – СПб.: ГУАП, 2024. – 340 с.
3. Сидорова, Н. П. Информационное обеспечение и базы данных : учеб. пособие / Н. П. Сидорова, Г. Н. Исаева, Ю. Ю. Сидоров. – М. : Технологический университет ; Berlin: Direkt-Media, 2019. – 85 с.

The article examines the theoretical foundations of developing software to optimize municipal waste collection process using the Grodno city as an example.

Баум Александр Владимирович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, albaumv@gmail.com.

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

М. В. БЕРНАЦКИЙ, Н. А. БОГДАН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА КРОВЬЮ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА КАК СПОСОБНОСТЬ ОРГАНИЗМА ПОДДЕРЖИВАТЬ ПОСТОЯННУЮ ВНУТРЕННЮЮ СРЕДУ

Представлена модель отдачи тепла кровью при ее движении по сосудам кожи для нижних конечностей тела человека. Из литературных источников известно, что на артериальном конце сосудов кровь входит с одной и той же температурой, равной приблизительно 37 °C [1]. При своем движении кровь через стенку сосуда отдает тепло в окружающую ткань, температура которой меняется в зависимости от наличия патологий, что приводит к изменениям теплоотдачи.

Процесс переноса тепла по кровеносной системе в организме человека является очень сложным, имеет место и тепловое излучение, и теплопроводность, и конвективный теплообмен. В физике теплоперенос, обусловленный разницей температур между двумя точками, осуществляется в соответствии с законом Фурье. Описать процесс теплопереноса крови в сосудах довольно сложно хотя бы потому, что сосуды имеют различные диаметры, а также перенос тепла кровью обусловлен множеством факторов, к которым относятся и архитектура кровеносной сети, и геометрическая форма сосудов, и многое другое.

Все измерения температуры поверхности нижних конечностей ткани тела человека были проведены дистанционным измерителем температуры (пирометр) UnionTEST IR1150, который позволяет бесконтактно, быстро и безопасно измерять температуру поверхности труднодоступных объектов [2]. Этот измеритель температуры состоит из оптической системы, датчика температуры, усилителя сигнала, схемы обработки сигнала и ЖК-дисплея. Оптическая система собирает ИК излучение, испускаемое объектом измерения, и фокусирует его на датчик температуры, который затем преобразует его в электрический сигнал. Пройдя через усилитель и схему его обработки, сигнал преобразуется в цифровую форму, а результат измерения отображается на ЖК-дисплее.

Целью настоящей работы является исследование и моделирование эффективности поступления тепла из венозной крови тела человека в мягкие ткани.

При моделировании процесса теплопереноса в организме человека трудности заключаются в определении коэффициента теплопроводности λ и теплоотдачи α , они зависят от параметров окружающей сосуда ткани, геометрии сосудистого русла, скорости движения крови. Коэффициент теплопроводности связан с диаметром кровеносного сосуда и коэффициентом теплоотдачи крови соотношением $\lambda = d \cdot \alpha / 3,66$.

Получены значения температурных полей задней проекции тела в нижней части тела при отсутствии дистрофических изменений в поясничном отделе позвоночника и представлена модель отдачи тепла кровью при ее движении по сосудам кожи. Исследования проводились на физико-техническом факультете Гродненского государственного университета имени Янки Купалы среди студентов возрастной категории от 17 до 18 лет, их можно отнести к пациентам здоровой группы.

Проведены измерения нижней части тела во фронтальной плоскости (икры ног). Испытуемые располагались так, как положено по инструкции на расстоянии 1,5 м. Коэффициент излучения кожи принимался на уровне 0,98. Термограммы снимались в помещении с влажностью 50 % и температурой 25 ± 1 °C. Все оценки проводились одним и тем же экспертом. Расчет размера выборки проводился для сравнения двух групп с помощью t-критерия для независимых выборок с использованием STATISTICA (система программного обеспечения для анализа данных) StatSoft, Inc. (США, 2014 г.); версия 12. Нормальность распределения данных проверялась с помощью теста Шапиро-Уилка. Параметрический критерий Стьюдента использовался для сравнения средних значений температур на анализируемых участках тела вследствие нормального распределения. Корреляцию между значениями температуры поверхности выбранных участков тела оценивали путем расчета коэффициента корреляции Пирсона. Принятый уровень статистической значимости составлял $p < 0,05$.

Процесс отдачи тепла кровью в первом приближении можно описать следующим образом:

$$\alpha \cdot S \cdot (T_{\text{крови}} - T_{\text{ткани}}) \cdot \Delta t = -c \cdot m \cdot (T_{\text{крови1}} - T_{\text{крови}}) \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, S – площади сосуда, Δt – время движения крови по выбранному участку сосуда, c – теплоемкость крови, $T_{\text{крови}}$ – температура крови, которая считалась неизменной, m – масса крови, $T_{\text{ткани}}$ – температура ткани, полученная экспериментальным способом. Как упоминалось выше, сложно определить коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности, поэтому использовалось понятие эффективного коэффициента теплообмена крови в сосудах, состоящий из $\alpha_{\text{внут.}}$ – коэффициент теплоотдачи, связанный с конвекцией крови по сосуду и $\alpha_{\text{внеш.}}$ – коэффициент теплоотдачи, связанный с теплоотдачей от сосуда в окружающую ткань [3].

Считая постоянными механические и тепловые параметры сосуда, и подставляя измеренную пирометром температуру ткани, можно оценить температуру ткани в норме, которая составила $35,5 \pm 0,5$ °С. Решая уравнение (1) можно оценить изменение температуры в норме, что и было выполнено, оно составило $1,3 \pm 0,1$ °С.

Эффективность поступления тепла в ткань из крови, двигающейся в различных сосудах, можно представить в виде отношения количества тепла, отданного кровью, к площади поверхности (S) самого сосуда:

$$\frac{\Delta q}{S} = \frac{c \cdot \rho \cdot R \cdot V}{2 \cdot L} \cdot \Delta T, \quad (2)$$

где R – радиус сосуда, V – скорость движения крови в сосуде, ρ – плотность крови, где L – длина сосуда, c – теплоемкость крови, ΔT – разность температур. Зависимость эффективности поступления тепла в ткань из крови от изменения температуры, является линейной функцией согласно (3), поэтому можно сделать вывод, что с ростом изменения температуры растёт и эффективность поступления тепла. В соответствии с полученными значениями температур было определено значения поступления тепла в ткань из крови.

Представлена модель отдачи тепла кровью при ее движении по сосудам кожи для здоровых пациентов, определены изменения температур, установлена зависимость теплоотдачи крови от изменения температуры. Можно сделать вывод о том, что с ростом скорости движения крови в сосуде, увеличением радиуса сосуда, и разницы температур эффективность тепла в ткань из крови возрастает, соответственно с увеличением L – длины сосуда, падает.

Список литературы

1. Лучаков, Ю. И. Математическая модель теплообмена между кровью / Ю. И. Лучаков, Г. Б. Морозов, Г. В. Румянцев // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. – 2001. – Т. 87, № 7. – С. 1003–1007.
2. Жарнова, О. А. Исследование температурных полей тела человека при дистрофических изменениях поясничного отдела позвоночника с акцентом на остеохондроз / О. А. Жарнова, Т. К. Крупская, А. И. Гаманович // Межвузовский научный симпозиум с международным участием, посвященный 110-летию со дня рождения члена-корреспондента НАН Беларуси Н. И. Аринчина : сб. материалов, Гродно, 28 февр. 2024 г. / ГрГМУ. – Гродно : ГрГМУ, 2024. – С. 91–94.
3. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергоиздат, 1981. – 417 с.

A model of heat transfer from blood as it moves through the vessels of the skin for the lower extremities of the human body is presented. From literary sources it is known that at the arterial end of the vessels the blood enters at the same temperature, equal to 37 °C. As blood moves through the wall of the vessel, it gives off heat to the surrounding tissue, the temperature of which changes depending on the presence of pathologies, which leads to changes in heat transfer values.

Бернацкий Максим Викторович, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, maks.bern05@mail.ru.

Богдан Никита Анатольевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, nikichuat@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, г. Гродно, Республика Беларусь, zharnova_oa@grsu.by.

УДК 537.528+33.9.07

А. А. БЛИЗНЯК

СОВРЕМЕННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ UI В C# И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИНТЕЗА НАНОЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА

Рассмотрены процессы и устройства синтеза наночастиц, использующие плазменное состояние вещества. Проведен анализ актуальных инструментов и библиотек (Windows Forms, WPF, UWP, Avalonia, Unity, MAUI) с целью выбора подходящих для использования при моделировании синтеза наночастиц в электровзрывной плазме.

Физическое моделирование формирования наночастиц играет важную роль в изучении наноструктур для их практического применения. В современном мире всё больше акцентируется внимание на миниатюризации, совершенствовании технологических процессов и их удешевлении, тем самым увеличивая интерес к получению металлических наночастиц и их свойствам. Обладая такими качествами, как весьма малый размер, хорошая электропроводность, наличие явления плазмонного резонанса и бисовместимости, наночастицы становятся незаменимыми в различных отраслях, включая электронику, медицину и экотехнологии [1].

Получению и применению наночастиц в настоящее время уделяется большое внимание, что обусловлено особенностью их свойств, которые сильно отличаются от свойств материалов, находящихся в макроскопическом состоянии. Снижение размерности частиц материалов до уровня в десятки нанометров приводит к проявлению у них квантово-размерных эффектов. Наноструктурирование материалов приводит к многократному увеличению суммарной площади их поверхности, по сравнению с площадью поверхности исходного материала. Это приводит к существенному росту числа поверхностных атомов, на которые действуют силы, направленные внутрь частиц. Наночастицы находятся в этом случае в напряженном состоянии, что приводит к изменению их свойств. Кроме этого, они обладают электрическим зарядом, благодаря которому они действуют на соседние атомы. Находясь в жидкости или расплаве, они формируют вокруг себя оболочку, в которой атомы или молекулы среды ориентированы определенным образом, что также приводит к изменению их свойств. Если концентрация наноструктур в модифицируемом материале достаточная (зависит от материала), то большая часть атомов или молекул в нем находится под их влиянием, что приводит к изменению свойств материала в целом [2].

Целью настоящей работы является определение наиболее подходящих инструментов и библиотек для моделирования формирования наночастиц в плазме электрического взрыва проводников.

Синтез наночастиц в плазме. Среди широкого разнообразия методов получения наноструктурированных материалов особо выделяются методы, использующие плазменное состояние вещества [3; 4]. Хорошим методом синтеза наночастиц использующим плазменное состояние вещества является их синтез в лазерной плазме, образующейся при воздействии сфокусированного лазерного излучения на вещество [5]. Под воздействием лазерного излучения на материале образуется эрозионный кратер. Вынесенное из кратера вещество формирует над ним высокотемпературный разлетающийся и излучающий плазменный факел [6]. Исследование спектрального состава его излучения дает возможность устанавливать химический состав вещества [7]. По мере расширения плазменного факела происходит его охлаждение и в нем начинается наноструктурная конденсация вещества и синтез наночастиц. Управляя параметрами лазерного излучения, можно управлять свойствами синтезированных наночастиц. Этот метод имеет ограничения по производительности и его затруднительно применять для синтеза наночастиц для промышленного применения.

Методом, имеющим значительно более высокую производительность, является синтез наночастиц в плазме электрического взрыва. 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 плотный 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. Под действием импульса электрического тока в нем происходит интенсивное выделение энергии. Проводник нагревается, плавится, испаряется. Происходит разлет продуктов диспергирования и расширение паро-микрокапельного канала. Превращение металлического проводника в паро-микрокапельное состояние приводит к резкому росту электрического сопротивления паро-микрокапельного канала, образованного на месте проводника, и, соответственно, росту, приложенного к нему напряжения. Под действием высокого напряжения происходит ионизация паров исходного металла и между электродами (на месте паро-микрокапельного канала) зажигается электровзрывной разряд. Таким образом, в жидкости, на месте тонкого металлического проводника, формируется плазменный канал, по которому протекает электрический ток. Высокое давление и температура в плазменном канале (температура может достигать 10^6 K, а давление 10^5 атмосфер) приводят к его расширению, испарению микрокапель и ионизации атомов [8].

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 нанокляпях исходного вещества. В процессах столкновений к ним присоединяются атомы, ионы, кластеры, другие нанокляпи и они превращаются в наночастицы. Таким и является механизм синтеза наноструктур в плазме электровзрывного разряда. Окружающая паро-плазменный канал вода, поддерживает в нем высокое давление, обжимает его и аккумулирует синтезированные наночастицы. Конечным продуктом являются наносuspензии. На периферии паро-плазменного канала происходит взаимодействие горячей плазмы с атомами и молекулами окружающей его среды (жидкости, плотного газа), в результате которого формируются наноструктуры сложного состава.

Установка для синтеза наночастиц в плазме электрического взрыва. 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. Подобные требования предъявляются к системам возбуждения эксимерных ламп и лазеров [9; 10]. Системы возбуждения эксимерных лазеров и ламп послужили образцом для систем электрического взрыва материалов [9–11]. Параметры установки для электрического взрыва материалов моделируются по методике, подобной методике модели-

рования эксимерных лазеров [12; 13] и ламп [14]. Электрические импульсы для взрыва материалов формируются посредством высоковольтного генератора с емкостным накоплением энергии и индукционными развязками после его коммутации на нагрузку, которой является взрывааемый материал. На рисунке 1 приведена схема установки для синтеза наночастиц в плотном газе. Установка работает следующим образом. От высоковольтного источника питания (1) заряжается емкостной накопитель энергии (2). Механизм подачи проволоки (3) обеспечивает автоматическую подачу взрываемого отрезка проволоки (4) в межэлектродный промежуток. При достижении проволокой высоковольтного электрода (5) срабатывает коммутатор (6), происходит разряд конденсаторов на этот отрезок проволоки, и он взрывается. Образовавшийся порошок собирается в накопителе (7). Очищенный от порошка газ с помощью вентилятора (8) подается обратно в камеру. Камера (9) перед работой вакуумируется, а затем заполняется требуемой газовой атмосферой. Эти функции выполняет система газоснабжения (10).

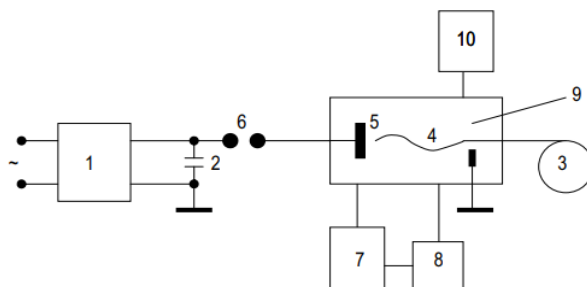


Рисунок 1 – Схема установки для получения наночастиц методом электрического взрыва

Постановка задачи для моделирования электрического взрыва проводников. При постановке задачи моделирования электрического взрыва проводников применяется квазистационарный подход. В рамках этого подхода предполагается, что энергия, поданная в проводник, зависит от его начального и текущего сопротивления. Для реализации данного метода необходимо:

1. Определить параметры системы: установить физические параметры проводника (материал, размер, начальное сопротивление и т.д.) и пропускаемого через проводник электрического тока (амплитуда, частота, длительность импульса).

2. Смоделировать изменение сопротивления: экспериментально определить изменение сопротивления проводника от параметров электрического тока при наличии внешних факторов (температура окружающей среды, давление, состав окружающей среды и т. д.).

3. Сделать анализ динамики взрыва: разработать модели динамики взрыва, включая механизмы разлета частиц и образование нанопорошков.

Таким образом, моделирование должно привести к получению информации о том, как различные параметры процесса влияют на эффективность формирования наночастиц, что поможет оптимизировать условия для их получения. Это также откроет новые горизонты для исследования влияния свойств материалов на результаты электрического взрыва проводников и создаст основу для дальнейших научных исследований в этой области.

Современные инструменты и технологии для создания UI в C#. User Interface (UI) – интерфейс, обеспечивающий передачу информации между пользователем и программно – аппаратными компонентами компьютерной системы. Пользовательский интерфейс играет весьма важную роль в процессе физического моделирования, особенно в областях, связанных с такими сложными системами как формирование наночастиц. Выбор UI необходимо основывать на следующих аспектах: интуитивность и доступность, способ визуализации данных, интерактивность и совместимость с множеством платформ. Приведенным аспектам соответствуют множество фреймворков (Windows Forms, WPF, UWP, Avalonia, Unity, MAUI и др.). Однако, для выбора наилучшего, необходимо сравнить их преимущества и недостатки.

1. WPF (Windows Presentation Foundation): Имеет достаточно хорошую гибкость в создании сложных интерфейсов, поддерживает векторную графику и анимацию. Однако весьма сложен для неподготовленных специалистов.

2. Windows Forms: Простой в использовании, подходит для разработки приложений с базовыми требованиями к UI. Ограничен в возможностях визуализации и не имеет кроссплатформенность.

3. UWP (Universal Windows Platform): Поддерживает кроссплатформенность и современные возможности UI. Имеет ограниченность в функционале по сравнению с вышеперечисленными фреймворками, высоко зависимый от системы Windows и сложен в интеграции с другими платформами

4. Avalonia: Высокая поддержка кроссплатформенности, возможность создания качественных интерфейсов. Малая поддержка и количество документации, наличие проблем с оптимизацией.

5. Unity: Применение мощных инструментов для графики и анимации, но не оптимальность для создания настольных приложений.

6. MAUI (Multi – platform App UI): Кроссплатформенная разработка приложений с использованием C#, простота в использовании, интеграция с современными инструментами и библиотеками, постоянное совершенствование и разработка новых библиотек и интеграция старых. Ограниченная поддержка на ранних этапах разработки, малое количество мануалов.

На основании выше сказанного можно сделать вывод, что наиболее подходящим инструментом создания пользовательского интерфейса в контексте физического моделирования наночастиц является MAUI. Он отвечает всем требованиям визуализации процесса, взаимодействия пользователя и кроссплатформенности. Его возможность интеграции с современными библиотеками и постоянное обновление позволяет разработчикам оставаться в курсе актуальных тенденций и технологий, что особенно важно в быстроразвивающихся областях, таких как нанотехнологии.

Список литературы

1. Витязь, А. П. Наноматериаловедение : учеб. пособие / П. А. Витязь, Н. А. Свидуневич, Д. В. Куис. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 511 с.
2. Еркович, О. С. Электронный вклад в избыточную энергию наночастиц металлов и сплавов / О. С. Еркович, С. В. Пырлин // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». – 2009. – № 2. – С. 38–47.
3. Майер, Г. Г. Объемные наноструктурные материалы: современные методы создания и исследования / Г. Г. Майер. – Томск : ИФПМ СО РАН, 2013. – 32 с.
4. 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.
5. Синтез и оптические характеристики наночастиц серебра, получаемых лазерной абляцией металла в жидкости / Г. А. Гусаков [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2022. – № 2. – С. 39–49.
6. Курьян, Н. Н. Временная динамика свечения лазерно-эмиссионного факела глины / Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, В. В. Григуть // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 101–110.
7. Исследование микроэлементного химического состава строительного песка методами спектрального анализа / С. С. Ануфрик [и др.] // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2016. – Т. 6, № 2. – С. 57–63.
8. Назаренко, О. Б. Электровзрывные нанопорошки: получение, свойства, применение / О. Б. Назаренко ; под ред. А. П. Ильина. – Томск : Изд-во ПТУ, 2005. – 148 с.
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. Anufrik, S. S. Influence of the preionization system on the lasing energy of a XeCl laser / S. S. Anufrik, A. P. Volodenkov, K. F. Znosko // Journal of Optical Technology. – 2000. – Vol. 67, № 11. – P. 961–967.
11. 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.
12. 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.
13. Anufrik, S. Simulation of active medium of XeCl lasers / S. Anufrik, A. Volodenkov, K. Znosko // Proceedings of SPIE 6731, International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2007: Advanced Lasers and Systems. – Minsk, 2007. – 673106.
14. 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.
15. 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.

The paper considers the processes and devices for synthesizing nanoparticles using the plasma state of matter. An analysis of current tools and libraries (Windows Forms, WPF, UWP, Avalonia, Unity, MAUI) was conducted in order to select those suitable for use in modeling the synthesis of nanoparticles in electroexplosive plasma.

Близняк Андрей Александрович, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, Andrey.bliznyak2004@gmail.com.

Научный руководитель – *Зноско Казимир Францевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, znosko@grsu.by.

Н. А. БОГДАН, Р. О. СИДОРЧУК

ОБЛАЧНЫЙ СЕРВИС ДЛЯ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

Применение портативных пирометров и тепловизоров в медицине для определения температуры отдельных частей тела человека является широкоизучаемым методом исследования при дегенеративно-дистрофических процессах в позвоночнике и заболеваниях внутренних органов. При диагностике с помощью пирометров используется следующий физический принцип: температурное поле на поверхности любого тела (в том числе и на поверхности биологического объекта) отражает его внутренние процессы. Таким образом, исследование температурного поля на поверхности биологического объекта может дать сведения о процессах, происходящих внутри организма. В работе представлена разработка бота, которая открывает новые возможности для оценки температурных полей тела человека. Созданный бот имеет несколько ключевых преимуществ: эффективность и точность, бот обеспечивает автоматические расчеты, что позволяет пользователям быстро получать результат и сокращает вероятность ошибок; удобство использования, интерфейс в мессенджере Telegram делает процесс анализа простым и доступным для широкой аудитории, включая людей, не имеющих специализированных знаний; бот способствует повышению осведомленности пользователей о состоянии их опорно-двигательного аппарата и предлагает рекомендации по профилактике заболеваний, что может улучшить качество жизни.

Одним из важных аспектов остеохондроза, который требует дальнейшего изучения, является его влияние на температурные поля тела человека. Исследование температурных полей в области пораженного поясничного отдела позвоночника при остеохондрозе может предоставить ценную информацию о физиологических процессах, происходящих в организме при этом заболевании. Помимо этого, такие исследования могут помочь выявить новые методы диагностики и мониторинга остеохондроза, а также разработать более эффективные методы лечения и реабилитации. Однако современные компьютерные методы диагностики не доступны для широких масс населения. Таким образом, предложенная тема исследования является актуальной [1].

Целью работы является разработка telegram-бота, позволяющего провести экспресс анализ данных замеров температурных полей для раннего выявления нарушений опорно-двигательного аппарата человека.

Для написания чат-бота была выбрана среда разработки PyCharm. PyCharm – это мощная интегрированная среда разработки (IDE), разработанная компанией JetBrains для работы с языком программирования Python. Она предоставляет разработчикам широкий спектр инструментов и функций, включая написание кода, отладку, тестирование и развертывание приложений.

PyCharm специально создан для работы с Python и предлагает многочисленные функции, которые делают процесс разработки удобным и эффективным. Среди ключевых особенностей можно выделить: подсветка синтаксиса и автозаполнение кода, интеграция с системами контроля версий (например, Git), поддержка тестирования и отладки, возможность работы с базами данных и фреймворками. Эти преимущества делают PyCharm идеальным выбором для разработки приложений на Python, включая создание чат-ботов.

В качестве языка программирования для создания телеграм-бота был выбран Python. Python – это универсальный язык программирования, который отличается простотой синтаксиса, широким сообществом разработчиков и богатым набором библиотек и фреймворков. Благодаря своей гибкости Python используется в различных областях – от веб-разработки до анализа данных и машинного обучения.

Ключевые особенности Python:

- Простота изучения и использования. Python обладает интуитивно понятным синтаксисом, что позволяет быстро начать разработку.

- Большая стандартная библиотека. Python предоставляет разработчикам мощные инструменты для работы с файлами, сетевыми запросами, данными и многим другим.

- Многообразие библиотек и фреймворков. Для работы с Telegram существует специализированная библиотека – `python-telegram-bot`, которая упрощает процесс взаимодействия с API мессенджера Telegram.

Библиотека `python-telegram-bot` является основным инструментом для создания телеграм-ботов на языке Python. Она обеспечивает простой и интуитивно понятный способ работы с API Telegram, предоставляя такие возможности, как отправка и получение сообщений, обработка команд, управление медиа-файлами и взаимодействие с пользователями.

Основные преимущества `python-telegram-bot`:

- Простота использования. Библиотека предоставляет удобные методы и классы для работы с Telegram API.

- Гибкость. Разработчики могут создавать как простые боты, так и сложные приложения с расширенной функциональностью.

- Активное сообщество. Библиотека регулярно обновляется и поддерживается, что делает её надёжным выбором для разработки.

С помощью PyCharm и `python-telegram-bot` был разработан продукт – телеграм-бот для анализа температуры тела человека на определённой зоне. Бот позволяет пользователям регистрировать измерения температу-

ры, анализировать полученные данные и предоставлять рекомендации на их основе. Такой функционал делает приложение полезным инструментом для контроля и мониторинга здоровья [2].

Архитектура и функциональные возможности Телеграм-бота.

Телеграм-бот для анализа температуры тела человека на определённой зоне был написан на языке Python с использованием библиотеки `python-telegram-bot`. Данный бот реализует клиент-серверную архитектуру. Серверная часть отвечает за обработку запросов пользователей, выполнение аналитических задач и предоставление соответствующих рекомендаций. Клиентская часть – это интерфейс в мессенджере Telegram, через который пользователи взаимодействуют с ботом.

Функциональные возможности:

- Регистрация температуры тела: пользователи могут вводить значения температуры тела для определённых зон, а бот сохраняет эти данные для дальнейшего анализа.
- Анализ температуры: бот проводит анализ зарегистрированных данных, определяя отклонения от нормы, средние значения и предоставляет рекомендации в случае выявления подозрительных данных.
- Интуитивный интерфейс: взаимодействие с ботом организовано через простые команды и кнопки, что обеспечивает удобство использования.

Интерфейс бота со стороны пользователя выглядит очень простым (рисунок 1).

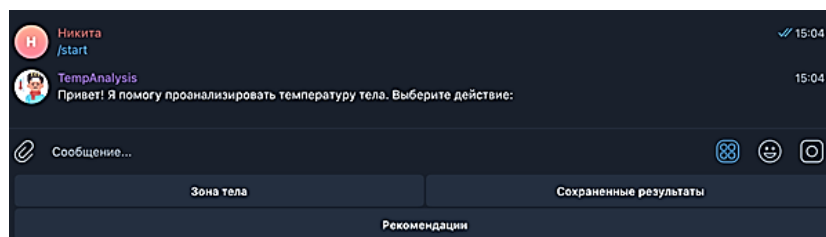


Рисунок 1 – Приветственный интерфейс работы бота

Принцип работы:

1. Пользователь отправляет запрос, например, добавляет данные о температуре через интерфейс Telegram.
2. Бот обрабатывает полученную информацию, проверяет её корректность и сохраняет в базе данных.
3. На основе анализа данных бот возвращает результаты пользователю в виде текстовых сообщений или рекомендаций.

Динамическое обновление функционала. Благодаря использованию библиотеки `python-telegram-bot` функционал бота может быть легко расширен. Например, можно добавить новые зоны измерений, настроить индивидуальные рекомендации. Данные возможности делают бота удобным и полезным инструментом для контроля состояния здоровья, минимизируя риски и повышая осведомлённость пользователей о состоянии их организма. Разработка и реализация бота

Основные этапы разработки Телеграм-бота для анализа температуры тела:

1. Установка и настройка окружения:
 - Установка IDE (PyCharm) для разработки на Python.
 - Создание нового проекта в PyCharm и настройка виртуального окружения.
2. Подключение библиотеки python-telegram-bot:
 - Установка библиотеки `python-telegram-bot` через менеджера пакетов pip.
 - Получение токена бота от BotFather в Telegram.

Токен бота от BotFather – это уникальный идентификатор, который используется для взаимодействия с Telegram API. Этот токен необходим для корректной работы бота и позволяет платформе Telegram идентифицировать и авторизовывать бота при отправке и получении сообщений. Токен выдаётся при регистрации бота через BotFather – официального бота Telegram для создания и настройки других ботов

- Настройка экземпляра бота с использованием полученного токена.

3. Реализация основной логики бота:

- Создание функций для обработки различных команд и взаимодействия с пользователем.
- Разработка функционала добавления, редактирования и анализа температурных данных.
- Написание алгоритмов анализа данных для выявления отклонений и предоставления рекомендаций пользователю.

Пример кода для обработки команды «/start»:

```
@dp.message(Command('start'))
async def start_handler(message: types.Message):
    await message.answer('Привет! Я помогу проанализировать температуру тела. Выберите действие:»,
    reply_markup=main_menu)
```

4. Обработка входящих сообщений:

- Настройка обработчиков для текстовых сообщений, команд и других взаимодействий.
- Разработка логики анализа введенных пользователем данных для определения команд и параметров.

5. Тестирование и отладка:

- Проведение тестирования функциональности бота на каждом этапе разработки.
- Отладка кода для устранения ошибок и улучшения производительности.

Реализация Телеграм-бота на Python с использованием библиотеки `'python-telegram-bot'` обеспечивает эффективное взаимодействие с платформой Telegram и предоставляет гибкий инструмент для анализа данных о температуре тела. Это решение легко расширяется и может быть дополнено иными функциями, такими как индивидуальные рекомендации на основе данных пользователя.

Для наглядной демонстрации работы телеграм-бота для анализа температуры тела человека на определенной зоне представим сценарий использования на примере анализа температуры подмышки. Пользователь отправляет запрос с выбором зоны измерения температуры (Зона тела), в данном случае выбор пал на зону с названием «Подмышка». Чат-бот запрашивает необходимые данные, такие как текущая температура тела пользователя. После ввода этих данных бот анализирует предоставленную информацию, сопоставляет с допустимыми медицинскими нормами, а также учитывает возможные отклонения. В результате бот выводит итоговый анализ, например:

- «Ваш результат сохранен! Температура в норме (35,5–37,0 °C)».

- «Ваш результат сохранен! Температура выше нормы (35,5–37,0 °C). Возможный диагноз: Лихорадка, гипертиреоз».

- «Ваш результат сохранен! Температура ниже нормы (35,5–37,0 °C). Возможный диагноз: Гипотермия, гипопункция щитовидной железы».

Помимо этого, можно посмотреть сохраненные результаты, которые нужны для наблюдения тенденции температуры, бот так же может огласить какие-либо рекомендации, исходя из последнего сохраненного результата.

Преимущества использования бота для пользователей: экономия времени: благодаря автоматизированному процессу анализа пользователи получают быстрые и точные рекомендации, не прибегая к сложным медицинским инструментам; точность и соответствие медицинским нормам: бот использует актуальные медицинские данные для анализа температуры тела, что помогает минимизировать вероятность ошибок и предоставляет пользователям надежную информацию; удобство и доступность: использование телеграм-бота обеспечивает удобный и простой интерфейс, доступный через мобильные устройства и компьютеры. Это делает сервис доступным для пользователей в любое время и в любом месте.

Таким образом, практическое применение телеграм-бота для анализа температуры тела представляет собой удобный инструмент, который помогает пользователям быстро оценить своё состояние здоровья и при необходимости получить рекомендации по дальнейшим действиям.

Для упрощения и автоматизации анализа температурных данных был разработан телеграм-бот, который позволяет пользователям быстро и удобно вносить, и анализировать данные о температуре тела. Бот предоставляет доступ к результатам анализа через интерфейс мессенджера Telegram, что делает его использование удобным и доступным для различных категорий пользователей.

Список литературы

1. Интеллектуальный анализ многомерных термометрических данных в медицинской диагностике / А. Г. Лосев [и др.] // Прикладная информатика. – 2016. – Т. 61, № 2. – С. 45–52.
2. Марков, С. В. Программирование на Python: создание веб-сервисов и ботов / С. В. Марков. – СПб. : Питер, 2022. – 368 с.

The use of portable pyrometers and thermal imagers in medicine to determine the temperature of individual parts of the human body is a widely studied research method for degenerative-dystrophic processes in the spine and diseases of internal organs. The following physical principle is used in diagnostics using pyrometers: the temperature field on the surface of any body (including the surface of a biological object) reflects its internal processes. Thus, the study of the temperature field on the surface of a biological object can provide information about the processes occurring inside the body. The paper presents the development of a bot that opens up new possibilities for assessing the temperature fields of the human body. The created bot has several key advantages: efficiency and accuracy, the bot provides automatic calculations, which allows users to quickly get results and reduces the likelihood of errors; ease of use, the interface in the Telegram messenger makes the analysis process simple and accessible to a wide audience, including people who do not have specialized knowledge; the bot helps to increase users' awareness of the state of their musculoskeletal system and offers recommendations for disease prevention, which can improve the quality of life.

Богдан Никита Анатольевич, кафедра теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Беларусь, nikichpuat@gmail.com.

Сидорчук Роман Олегович, кафедра теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Беларусь, romasidorchuk04@gmail.com.

Научный руководитель – *Крупская Татьяна Константиновна*, магистр педагогических наук, кафедра теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Беларусь, krupskay_tk@grsu.by.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРОГАЗОВОГО ОБРАЗОВАНИЯ ОТ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА

Описывается модель парогазового образования, образующегося при действии лазерного излучения 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 координатам. 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, происходящие 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 излучения 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 (свинец), находящейся в воде при воздействии лазерного излучения с плотностью мощности 10^6 Вт/см² и исследование зависимости скорости газа и пара, плотности, температуры и давления от массы испарённой жидкости в момент времени 10 нс 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 парогазового 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

$$\begin{aligned}\rho_1 \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho_1 (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} &= -\nabla p \\ \rho_2 \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \rho_2 (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} &= -\nabla p\end{aligned}$$

Уравнениями непрерывности для каждой из компонент

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 \vec{V}) = A(t) \delta(r - r_0)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_2 \vec{U}) = B(t) \delta(r - r_b)$$

Уравнениями тепломассопереноса для каждой из компонент

$$\rho_1 c_{p1} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_1 c_{p1} \vec{V} \cdot \nabla T = \operatorname{div}(\alpha_1 \nabla T)$$

$$\rho_2 c_{p2} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_2 c_{p2} \vec{U} \cdot \nabla T = \operatorname{div}(\alpha_2 \nabla T)$$

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.

Для примера, согласно данной модели, рассчитана зависимость давления водяного пара в приграничной зоне парогазового образования от массы испаренной воды при облучении образца свинца. Стоит отметить, что масса испаренной воды коррелирует с энергией импульса.

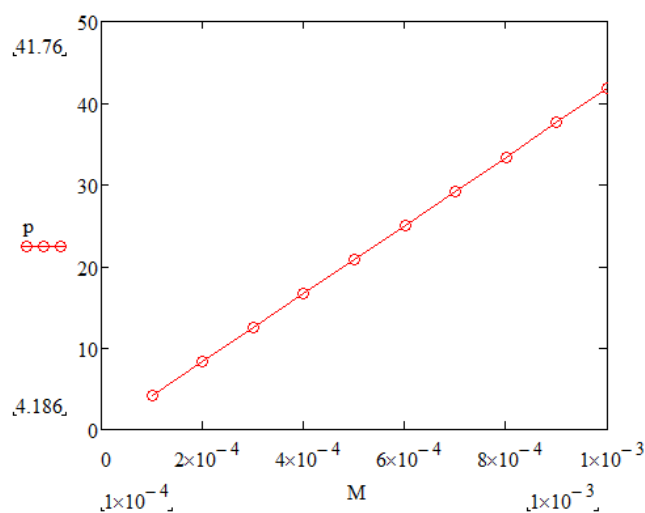


Рисунок 1 – График зависимости давления в приграничных зонах парогазового образования от массы испаренной жидкости

На рисунке 1 изображена зависимость давления в зоне парогазового пузыря, расположенной у его границы, от массы испаренной воды в момент времени 10 нс от начала воздействия. На данном графике прослеживается линейная зависимость давления от рассматриваемого параметра. Как было сказано ранее, масса испаренной жидкости прямо пропорциональна затраченной на процесс парообразования энергии. По данной причине можно утверждать, что давление зависит от энергии лазерного импульса, и данная зависимость является линейной (при массе испаренной воды 0,1 г давление достигает 4,2 атм., а при массе 1 г – ~42 атм.)

Таким образом, компьютерное моделирование позволяет более подробно изучить процессы, протекающие при лазерной абляции металлов, находящихся в воде. Также, меняя параметры, можно исследовать зависимости скорости течения газа и пара, плотности, температуры и давления от поглощенной энергии лазерного излучения. Следует отметить, что данная модель рассматривает лишь начальную фазу образования парогазового пузыря без учёта процессов испарения образца металла.

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. Баснев [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. аспирантов, магистрантов и студентов (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. Морфология и структура покрытий, полученных при лазерной абляции цветных металлов / С. С. Ануфрик [и др.] // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Фізика. – 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 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://spravochnik.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, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, alexanderboyko02@outlook.com.

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

**СЕКЦИЯ 3.
ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В СВЧ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Изучено влияние условий возбуждения СВЧ разряда непрерывного режима формирования на уровни его интегрального оптического свечения и оптический эмиссионный спектр. Показано, что кислородсодержащая плазма в данном режиме возбуждения разряда характеризуется большей стабильностью, но обладает меньшим амплитудным значением пиков интегрального свечения. Вкладываемая в разряд мощность равномерно растёт с увеличением мощности непрерывного источника питания. Уменьшение мощности в ~ 2 раза от 4 кВт до 1,8 кВт приводит к снижению амплитудного значения оптического сигнала и интенсивности спектральных линий атомарного кислорода в 6 раз.

Параметры плазмообразования и свойства используемого разряда оказывают влияние на качественные характеристики проводимых процессов полупроводникового производства. Повышение интенсивности воздействия активных частиц на обрабатываемый материал или изменение характера взаимодействия плазмы с поверхностью полупроводника, даёт возможность сократить длительность отдельных этапов обработки.

Формирование плазменного разряда с целью выполнения операций СВЧ плазмохимической обработки материалов в типовом оборудовании, использующем в качестве источника энергии СВЧ магнетроны, обычно осуществляется в импульсном режиме. Это обосновано, в первую очередь, особенностями конфигурации используемых СВЧ магнетронов и источников питания. Качественным методом повышения эффективности обработки является уменьшение эффекта деионизации в интервалах между плазменными импульсами, что достигается за счёт перехода к постоянной составляющей анодного тока.

Для обеспечения непрерывного режима плазмообразования был использован СВЧ генератор с трёхфазным источником питания СВЧ магнетрона. Непрерывная генерация СВЧ разряда достигалась за счёт использования трёхфазной сети питания переменного тока с углом сдвига фаз в 120 градусов, что обеспечивает наложение периодов формирования СВЧ-колебаний каждой из используемых в составе источника питания схемой однопериодного выпрямления с удвоением напряжения [1].

Экспериментальные исследования выполнялись в реакционно – разрядной камере СВЧ установки резонаторного типа [2]. Было изучено влияние условий возбуждения СВЧ разряда непрерывного режима формирования на уровни его интегрального оптического свечения и оптический эмиссионный спектр. Регистрируемые оптические сигналы в данном случае выступали в качестве индикаторов изменения величины энерговклада в плазму [3].

Установлено, что при использовании кислорода в качестве рабочего газа для формирования непрерывного СВЧ разряда наблюдается стабильное амплитудное значение пиков интегрального свечения разряда (рисунок 1). Плазма, сформированная с использованием воздуха, характеризуется более высоким уровнем постоянной составляющей сигнала при одинаковых условиях генерации разряда. Уменьшение мощности питания СВЧ магнетрона от 4 кВт до 1,8 кВт демонстрирует снижение амплитудных значений анализируемого оптического сигнала в более чем 6 раз (рисунок 2).

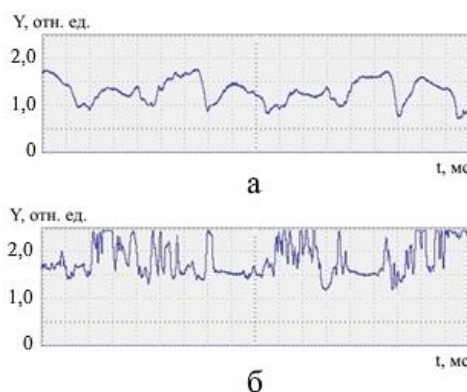


Рисунок 1 – Осциллограмма сигнала интегрального оптического свечения непрерывного СВЧ разряда при использовании кислорода (а) и воздуха (б) в качестве плазмообразующего газа

Оценка уровня вкладываемой мощности по площади под огибающей уровня сигнала оптического свечения показала его равномерный рост с повышением мощности непрерывного источника питания (рисунок 2). Различие показателя в зависимости от используемых плазмообразующих газов, составляющее не более 50 %, объясняется большей стабильностью свечения кислородной СВЧ плазмы.

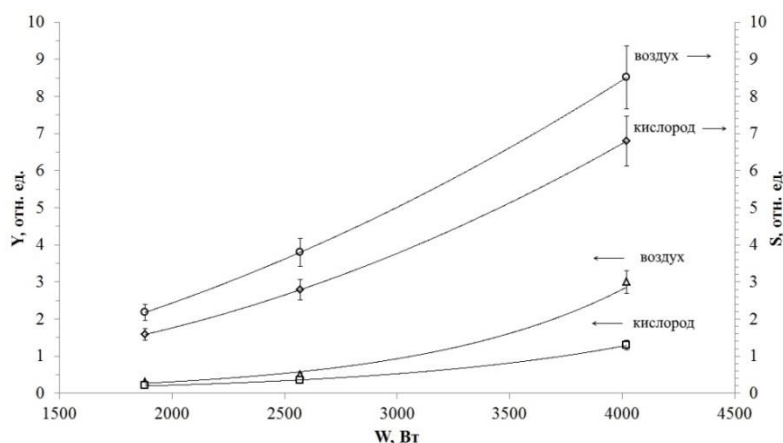


Рисунок 2 – Зависимости усреднённых амплитудных значений (Y) и значений площади под огибающей (S) сигнала интегрального оптического свечения непрерывно формируемого СВЧ разряда от значения потребляемой СВЧ генератором мощности при использовании различных рабочих газов

Изменение пикового зарегистрированного значения данных спектральных линий говорит о потенциальном влиянии условий плазмообразования на скорость проведения операции удаления фоторезистивных плёнок с поверхности полупроводниковых пластин в объёме СВЧ плазмы [4]. Изменение химической активности плазмы оценивалось по показателю интенсивности спектральных линий атомарного кислорода (ОI) 776 нм и 846 нм.

Режим непрерывного плазмообразования продемонстрировал снижение интенсивности рассматриваемых спектральных линий в 6 раз при снижении мощности питания СВЧ магнетрона в 2 раза. Это свидетельствует о закономерном уменьшении концентрации частиц в рассматриваемом рабочем объёме СВЧ плазменной установки резонаторного типа, способных воздействовать на материал в процессе плазмохимической обработки. Увеличение значения давления в рабочей камере для обоих значений подаваемой на СВЧ магнетрон мощности, от оптимальных 100 Па до 200 Па, показало снижение интенсивности линий атомарного кислорода в кислородсодержащей плазме на 30 %.

Полученные экспериментальные данные показывают, что эффективность непрерывного режима работы СВЧ магнетрона при возбуждении плазменного разряда имеет значительную зависимость от постоянной составляющей формируемого разряда. Уровень постоянной составляющей коррелирует в большей степени с площадью под огибающей оптического сигнала, указывающей на общий уровень вводимой в разряд мощности, а его зависимость от мощности питания СВЧ генератора имеет восходящий характер.

Список литературы

1. Регулируемый трехфазный источник питания работающего на плазменную нагрузку СВЧ магнетрона : полез. модель ВУ.13119 / О. И. Тихон, С. И. Мадвейко, С. В. Бордусов. – Опубл. 28.02.2023.
2. Исследование влияния кремниевых пластин на СВЧ разряд в плазмотроне резонаторного типа / С. И. Мадвейко [и др.] // Приборостроение – 2020 : материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–20 нояб. 2020 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 275–277.
3. Намитоков, К. К. Излучение газоразрядной плазмы / К. К. Намитоков, П. Л. Пахомов, С. Н. Харин. – Алма-Ата : Наука, 1984. – 302 с.
4. Effect of electron density and temperature in oxygen plasma treatment of polystyrene surface / Masruroh [et al.] // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2019. – P. 515.

The influence of excitation conditions for continuous – mode microwave discharge generation on the levels of its integral luminescence and optical emission spectrum has been studied. It is shown that oxygen plasma in this excitation mode is characterised by higher stability, but has a lower amplitude value of integral luminescence peaks. The power applied to the discharge grows uniformly with the increase of the output of the continuous power supply. A ~2 times decrease in power from 4 kW to 1.8 kW leads to a 6 times reduction of the amplitude value of the optical signal and the intensity of atomic oxygen spectral lines.

Тихон Олег Игоревич, Белорусский государственный университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, kritgar@bsuir.by.

Барковская Кира Николаевна, Белорусский государственный университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, k.barkovskaia@bsuir.by.

Научный руководитель – *Мадвейко Сергей Игоревич*, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой ЭТТ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, madveyko@bsuir.by.

К. Н. БАРКОВСКАЯ, О. И. ТИХОН, М. С. ЛУШАКОВА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ В РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЕ
НА ФОРМИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО РАЗРЯДА**

Исследовано влияние давления в разрядной камере на возбуждение самостоятельного комбинированного разряда за счет одновременного введения в единый плазменный объем СВЧ и НЧ полей. Установлен оптимальный диапазон рабочих давлений формирования устойчивого комбинированного разряда.

Одним из важных факторов, определяющих технологические характеристики плазменных процессов наряду с электрическими параметрами [1], является давление в разрядной камере. Давление, как и прикладываемая мощность, определяет энергию ионов. Давление влияет на распределение по энергиям электронов и ионов в плазме, бомбардирующих поверхность подложки. При увеличении давления и постоянном расходе газа возрастает число столкновений частиц, а средняя энергия электронов уменьшается. Поскольку энергия электронов определяет скорость генерации активных частиц, скорость реактивного ионного травления при увеличении давления уменьшается [2].

Необходимо отметить, что развитие газоразрядных устройств технологического назначения идет в направлении разработки устройств с большим плазменным объемом для обработки полупроводниковых пластин диаметром 150–300 мм, а также групповой обработки пластин с меньшим диаметром на различных технологических операциях. При этом пространственная неоднородность травления по площади пластины, которая сильно зависит от пространственного распределения, как плотностей частиц, так и потенциалов, является основной проблемой для больших пластин или плоских панелей при плазменной обработке материалов. Пространственные неоднородности плазмы в двухчастотных емкостных разрядах имеют большое значение для применения такого оборудования [3]. Исходя из анализа литературных источников установлено, что профили распределения концентрации плазмы, которые определяют пространственную неоднородность травления по площади пластины, сильно зависят от давления и мощности и изменяются от колоколообразного распределения при низком давлении до двухпикового распределения при высоком давлении [3; 4].

В связи с этим, определение такого технологического параметра как диапазон рабочих давлений для конкретных конфигураций, комбинированных емкостных разрядных устройств крайне необходим для установления оптимальных режимов обработки при травлении полупроводниковых материалов.

В исследуемой конструкции разрядной системы комбинированного разряда плазменный объем сформирован таким образом, что СВЧ энергия поступает в вакуумную разрядную камеру посредством щелевых отверстий в кольцевом волноводе. В торцах разрядной камеры расположены два плоскопараллельных электрода – потенциальный и заземленный, подключенные к НЧ генератору. При одновременном взаимодействии СВЧ и НЧ полей с газом пониженного давления в разрядной камере формируется плазма самостоятельного комбинированного разряда [5].

В комбинированном разряде СВЧ (2,45 ГГц) составляющая обеспечивается режимом работы источника питания СВЧ магнетрона от однополярных импульсов с частотой 50 Гц. Генератор НЧ разряда имеет возможность функционировать как в импульсном, так и непрерывном режимах работы. Ввиду необходимости синхронизации сигналов СВЧ и НЧ генераторов для формирования плазмы комбинированного разряда целесообразно использование работы НЧ генератора в прерывистом режиме пачками импульсов 50 Гц. НЧ излучение внутри пачек импульсов составляло 33 кГц.

Оценка работы обоих генераторов на плазменную нагрузку выполнялась с использованием двухканального осциллографа. На один канал подавались сигналы с ФЭУ, который фиксировал оптическое излучение из плазмы, на второй – данные с потенциального электрода НЧ генератора. Оптический сигнал с ФЭУ более информативно отражает формирование плазмы комбинированного разряда, на который оказывает большее энергетическое влияние СВЧ генератор, так как мощность СВЧ плазмы в разрядной камере выше мощности НЧ разряда. Однако, ввиду работы обоих генераторов в импульсном режиме, следование пачек импульсов которых совпадало по времени [1], но имело некоторые расхождения в скважности, по результатам интегрального оптического свечения также возможно фиксировать амплитуду свечения низкочастотного разряда.

Регистрация интегрального оптического свечения комбинированного плазменного разряда при изменении величины давления газа в разрядной камере в диапазоне от 20 до 90 Па представлена на рисунке 1. На осциллограммах интегрального оптического свечения были условно выделены участки, в большей степени характеризующие комбинированный разряд и НЧ составляющую комбинированного разряда, исходя из которых сформированы графические зависимости. Мощность СВЧ импульсов комбинированного разряда составляла 150 Вт, мощность НЧ излучения – 90 Вт. Исследования проводились с использованием воздуха в качестве плазмообразующего газа.

В ходе исследования установлено, что комбинированный разряд в диапазоне давлений от 20 до 90 Па имеет наибольшую интенсивность при величине давления 40–55 Па. Это может указывать на более высокую ак-

тивность плазмы комбинированного разряда, по сравнению с плазмой отдельного СВЧ или НЧ разрядов, при том же значении величины давления в разрядной камере. При низких значениях давления 20–30 Па наблюдается меньшая интенсивность оптического свечения комбинированного разряда, лишь незначительно отличающаяся от интенсивности свечения отдельного СВЧ разряда. Это обусловлено высокой ионизацией газа при данной величине давления. При этом преобладающим в комбинированном разряде является вклад мощности СВЧ разряда. При величине давления 60–90 Па интенсивность интегрального оптического свечения комбинированного разряда имеет нисходящий характер ввиду закономерностей, указанных в [2].

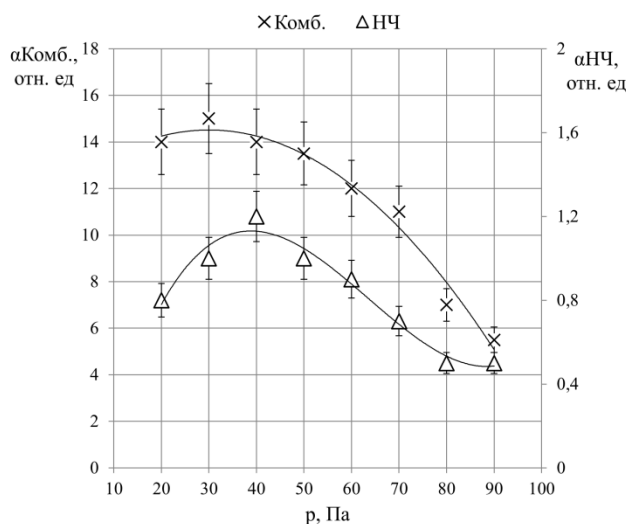


Рисунок 1 – Зависимость амплитуды интегрального оптического свечения СВЧ и НЧ составляющих комбинированного разряда от величины давления в рабочей камере

Полученные экспериментальные данные указывают на наличие оптимального диапазона давлений в интервале 40–55 Па в разрядной камере для формирования комбинированного разряда. Исходя из этого можно предполагать возможную минимальную пространственную неоднородность по площади кремниевой пластины при технологической операции травления в установленном диапазоне давлений.

Список литературы

1. Лушакова, Исследование влияния режимов работы СВЧ и НЧ генераторов на возбуждение плазмы комбинированного разряда / М. С. Лушакова, О. И. Тихон, С. И. Мадвейко // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики [Электронный ресурс] : материалы II междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 14 нояб. 2024 г. / ПГУ. – Новополоцк, 2024. – С. 142–146.
2. Галперин, В. А. Процессы плазменного травления в микро – и нанотехнологиях : учеб. пособие / В. А. Галперин, Е. В. Данилкин, А. И. Мочалов ; под. ред. С. П. Тимошенкова. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 283 с.
3. Experimental study of spatial non-uniformities in a dual frequency capacitively coupled plasma / G. L. Zhao [et al.] // Modern Physics Letters B. – 2009. – Vol. 23, № 28. – P. 3409–3417. – doi.org/10.1142/S0217984909021442.
4. A brief review of dual-frequency capacitively coupled discharges / Bi. Zhen-hua [et al.] // Current Applied Physics. – 2011. – Vol. 11, № 5. – S2–S8. – doi.org/10.1016/j.cap.2011.07.002.
5. Лушакова, М. С. Исследование влияния конструктивных характеристик плазменной камеры на режимы возбуждения СВЧ разряда / М. С. Лушакова, О. И. Тихон, С. И. Мадвейко // Приборостроение – 2022 : материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 нояб. 2022 г. / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 287–289.

The influence of pressure in the discharge chamber on the excitation of an self-sustained combined discharge due to the simultaneous introduction of microwave and low – frequency fields into a single plasma volume has been studied. The optimum range of operating pressures for the formation of a stable combined discharge has been established.

Лушакова Мария Сергеевна, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, lushakova@bsuir.by.

Тихон Олег Игоревич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, kritgar@bsuir.by.

Барковская Кира Николаевна, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, k.barkovskaia@bsuir.by.

Научный руководитель – Мадвейко Сергей Игоревич, доктор технических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, madveyko@bsuir.by.

А. С. БЕЛЯЕВА, В. В. ЛЕЩЕВИЧ

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕГКОГАЗОВОГО УСКОРИТЕЛЯ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Объектом исследования в данной работе являлся процесс преобразования электрической энергии, запасенной в конденсаторной батарее, в кинетическую энергию ударника, метаемого двухступенчатой баллистической установкой. К предмету исследования относятся оптимальные параметры легкогазового ускорителя твердых тел, обеспечивающие максимальную скорость метания. Представлены результаты экспериментального исследования влияния конфигурации и размеров разрядной камеры (первой ступени метательного устройства баллистической установки) на эффективность преобразования запасенной в батарее электрической энергии в кинетическую энергию метаемого тела (ударника). Были проанализированы несколько типов конструкций разрядных камер, наиболее эффективной из которых является разрядная камера с коаксиальными стержневым и кольцевым электродами. Эффективность преобразования запасенной энергии конденсаторной батареи в энергию рабочего газа такой камеры относительно классической разрядной камеры с коаксиальными электродами увеличилась в 2 раза.

Для метания ударника использовалась двухступенчатая легкогазовая магнитоплазменная баллистическая установка, которая состоит из метательного устройства, герметичной камеры, позволяющей проводить эксперименты по пролету ударника как при различном давлении (от атмосферного до вакуума на уровне 10 Па), так и при различном составе газовой среды, блока управления (генератор импульсов, блок запуска), блока питания (конденсаторная батарея, высоковольтный выпрямитель, силовые коммутаторы), системы вакуумирования, системы напуска легкого газа и измерительного оборудования. При проведении экспериментов метательное устройство герметично соединяется с камерой. Камера состоит из 3 секций, разделяемых при необходимости лавсановыми диафрагмами и имеющими индивидуальные порты для откачки и напуска газовой среды. Необходимая для метания электрическая энергия накапливается в конденсаторной батарее, заряжаемой высоковольтным источником напряжения. В качестве метаемых частиц использовались одиночные ударники цилиндрической формы со скругленной носовой частью. Скорость метаемых частиц измерялась при помощи высокоскоростной камеры PhotronFastcam SA-Z при частоте съемки 200 000–336 000 кадр/с и экспозиции 0,16 мкс.

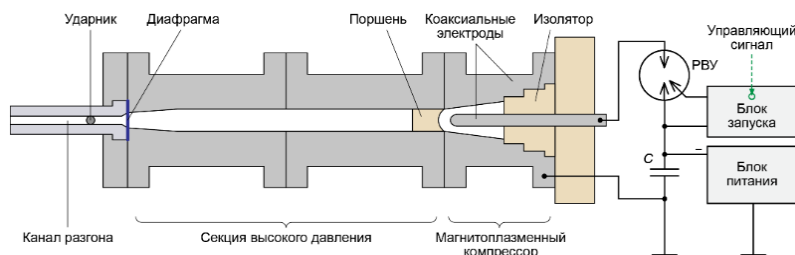


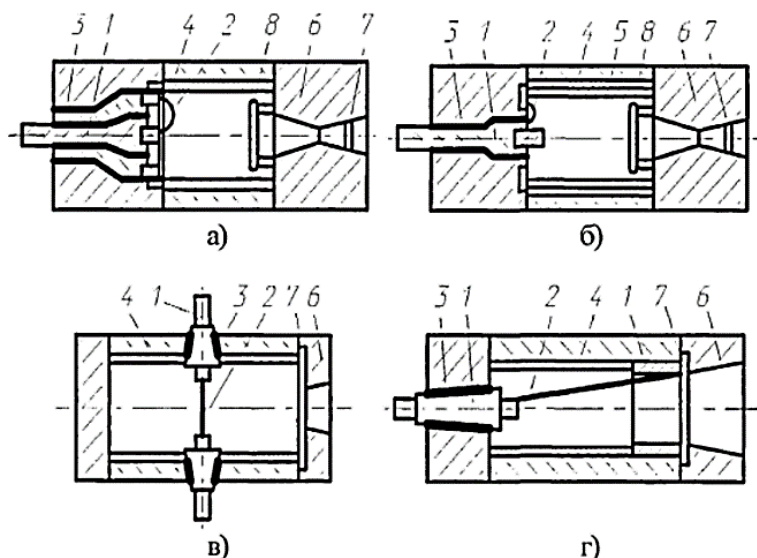
Рисунок 1 – Принципиальная схема метательного устройства

Рабочие параметры установки, которые использовались ранее при проведении баллистических испытаний следующие: $C = 1200\text{--}2400$ мкФ, $U_0 = 1\text{--}6$ В, $I_{\max} = 280$ кА, $P_{\max} = 2\text{--}15$ Мпа, $L = 70\text{--}285$ мм, $d = 2,5\text{--}5$ мм, где C – емкость конденсаторной батареи, U_0 – начальное напряжение, $I_{\max}$ – максимальное значение разрядного тока, $P_{\max}$ – начальное давление гелия в секции высокого давления, L – длина канала разгона, d – диаметр метаемых частиц.

Основным элементом баллистической установки является метательное устройство оригинальной конструкции (рисунок 1), состоящее из эрозионного магнитоплазменного компрессора (МПК), легкогазовой секции высокого давления (ЛСВД) и канала разгона. Между МПК и ЛСВД устанавливается поршень, между ЛСВД и каналом разгона – диафрагма. Секция высокого давления заполняется гелием, в канал разгона помещается метаемая частица (ударник). Образующийся в МПК плазменный поток, обладающий высокой плотностью и температурой, разгоняет поршень в ЛСВД, что приводит к адиабатическому сжатию гелия. При давлении форсирования газ разрывает диафрагму и ускоряет ударник в канале разгона. Канал разгона сменный, что позволяет работать с метаемыми ударниками различного диаметра. Стандартные каналы изготовлены для ударников диаметром 2,5, 4 и 5 мм. Секция высокого давления представляет собой сборку цилиндров внутренним диаметром 13 мм. Комбинация из цилиндров длиной 180, 200 и 380 мм, позволяет дискретно менять общую длину секции высокого давления от 180 до 720 мм. Со стороны канала разгона секция высокого давления отделяется латунной диафрагмой, толщина которой определяет уровень давления раскрытия, т. е. начальное давление в канале разгона. Со стороны магнитоплазменного компрессора секция высокого давления отделена помещенным в нее пластиковым поршнем. Винтовая нарезка на поршне обеспечивает меньшее сопротивление при

его движении, а также заполнение рабочим газом межэлектродного зазора компрессора при заправке секции высокого давления.

Основным элементом импульсных генераторов плазмы является электроразрядная камера, в которой накопленная электрическая энергия преобразуется во внутреннюю энергию рабочего тела при импульсном разряде. Разрядные камеры импульсных генераторов плазмы характеризуются разнообразием конструкций (рисунок 2).



1 – электрод (катод); 2 – инициирующая проволочка; 3 – изоляция катода;
4 – высокотемпературная изоляция; 5 – электрод (анод); 6 – сопловой блок; 7 – диафрагма; 8 – защитный экран

**Рисунок 2 – Основные типы конструкций разрядных камер [4]: а – с коаксиальными электродами;
б – коаксиальная; в – с соосными стержневыми электродами;
г – с коаксиальными стержневым и кольцевым электродами**

Первоначальную конструкцию, использованную в двухступенчатой метательной установке, можно отнести к классу коаксиальных разрядных камер (тип 1). Коаксиальные разрядные камеры отличаются от разрядных камер с коаксиальными электродами тем, что у них длина коаксиального электрода равна длине разрядной камеры, а сам этот электрод находится под одним потенциалом с корпусом разрядной камеры. Помимо этого, разрядные камеры данного типа обладают всеми достоинствами коаксиальных конструкций, т. е. высоким падением напряжения на дуге, высоким коэффициентом теплопередачи от дуги к газу, малым временем установления термодинамического равновесия в объеме разрядной камеры, а, кроме того, способностью стабильно работать при практически неограниченных начальном и импульсном давлении рабочего газа, которые для таких устройств составляют 40–120 МПа и 600 МПа соответственно, при этом предел величины импульсного давления определяется, в основном, механической прочностью корпуса разрядной камеры и изоляции электрода. К недостаткам данных разрядных камер можно отнести высокую критичность поведения дуги и параметров рабочего газа по отношению к величине межэлектродного расстояния и нестабильность во времени величины тока и падения напряжения на дуге. Для поиска пути повышения эффективности преобразования энергии были испытаны другие варианты разрядных камер, тип 2 – коаксиальная с коротким электродом, тип 3 – с коаксиальными стержневым и кольцевым электродами. Конструкция типа 2 позволяет уменьшить ускорение плазменной струи за счет электромагнитных явлений импульсного разряда и позволяет оценить их вклад при использовании исходной конструкции (тип 1). Кроме того, за счет привязки дуги к короткому центральному электроду с одной стороны и перемещения пятна контакта вдоль анода с другой стороны, длина дуги и, как следствие, ее сопротивление, длительность разряда и степень нагрева должны увеличиваться. Основным отличием конструкции типа 3 от других, которое можно считать ее преимуществом, является большая и практически постоянная длина дуги, что при высокой степени заполнения разрядной камеры обуславливает интенсивную передачу тепла от дуги к плазме [5].

Последовательности кадров, полученных в экспериментах с разрядными камерами разного типа в одинаковые моменты времени от начала разряда, представлены на рисунке 3. Для всех случаев к 95 мкс наблюдается формирование характерной ударно волновой структуры сверхзвукового истечения с недорасширением. Но для камеры типа 3 плазменная струя формируется раньше, а расстояние до диска Маха вдвое больше. Это свиде-

тельствует о том, что давление в этой камере повышается быстрее и до более высокого значения, доступная для разгона ударника внутренняя энергия и количество рабочего газа значительно выше. Прежде всего, это является причиной более эффективной передачи энергии от конденсаторной батареи к дуге при разряде.

В результате сравнения эффективности 3-х типов камер, были получены следующие результаты.

Таблица 2 – Сравнение эффективности преобразования энергии дуги во внутреннюю энергию рабочего газа для различных разрядных камер относительно исходной конструкции

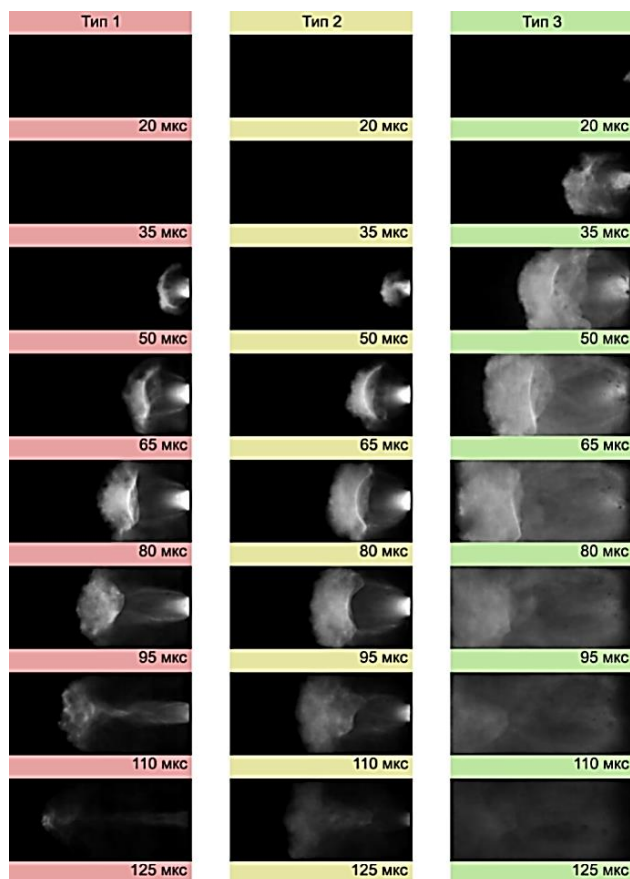


Рисунок 3 – Фоторазвертки процесса истечения плазмы в атмосферу воздуха из разрядных камер различного типа

Параметры для сравнения	Тип 1	Тип 2	Тип 3
$V, \text{см}^3$	5,5	6,7	3,4
$V/V_{\text{тип1}}$	1	1,22	0,62
$P, \text{атм}$	66,5	57	215
$P/P_{\text{тип1}}$	1	0,86	3,23
E_a/E_s	0,42	0,43	0,75
$(E_a/E_s)_{\text{тип 1}}/(E_a/E_s)$	1	0,98	0,56
Эффективность преобразования энергии разряда в энергию рабочего газа относительно камеры типа 1	1	1,03	1,12
Эффективность преобразования запасенной энергии конденсаторной батареи в энергию рабочего газа относительно камеры типа 1	1	1,05	2

Таким образом, процесс образования и нагрева толкающего газа в разрядной камере типа 3 более эффективен. А общий КПД преобразования энергии в двух процессах: из запасенной в конденсаторной батарее в энергию толкающего газа, в два раза выше, чем у оригинальной конструкции плазмотрона.

Список литературы

1. Зельдович, Я. Б. Изучение химических реакций в ударных волнах. Теория метода и результаты предварительных экспериментов / Я. Б. Зельдович, О. И. Лейпунский // Вопросы теории взрывчатых веществ. – 1947. – Вып. 1, кн. 1. – С. 174.
2. Зельдович, Я. Б. Воспламенение взрывчатых газовых смесей в ударных волнах / Я. Б. Зельдович, И. Я. Шляпихин // Доклады Академии наук СССР. – 1949. – Т. 115, № 6. – С. 871–874.
3. Ruegg, F. W. A Missile Technique for the Study of Detonation Wave / F. W. Ruegg, W. W. Dorsey // Journal of Research of the National Bureau of Standards. – 1962. – Vol. 66C. – P. 51–58.
4. Глебов, И. А. Мощные генераторы плазмы / И. А. Глебов, Ф. Г. Рутберг. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 153 с.
5. Weise, T. H. G. Recent experimental results obtained from 45 mm ET-Gun investigations / T. H. G. Weise // Proceedings of the 4th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology. – Celle, Germany: Technologisches Zentrum Nord, 1993.

The object of the study in this paper was the process of converting electrical energy stored in a capacitor bank into kinetic energy of a projectile thrown by a two-stage ballistic installation. The subject of the study includes optimal parameters of a light-gas accelerator of solid bodies, providing the maximum throwing speed. The article presents the results of an experimental study of the influence of the configuration and dimensions of the discharge chamber (the first stage of the throwing device of the ballistic installation) on the efficiency of converting electrical energy stored in the battery into kinetic energy of the thrown body (striker). Several types of discharge chamber designs were analyzed, the most efficient of which was a discharge chamber with coaxial rod and ring electrodes. The efficiency of converting the stored energy of the capacitor bank into the energy of the working gas of such a chamber increased by 2 times relative to the classical discharge chamber with coaxial electrodes.

Беляева Анастасия Сергеевна, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, nastya.bel.221004@gmail.com.

Научный руководитель – *Углов Владимир Васильевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, Uglov@bsu.by.

Научный консультант – *Лецевич Владимир Владимирович*, старший научный сотрудник ИТМО Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь, levir@mail.ru

УДК 004.932

М. А. БОЧКО

АНАЛИЗ КЛАССИЧЕСКИХ МЕТОДОВ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

Произведён анализ стандартных методов машинного зрения, применимых для решения простейших производственных задач в области оптического контроля продукции.

Целью настоящей работы является анализ методов машинного зрения, способных обеспечить автоматический контроль качества выпускаемой продукции в реальном времени.

В условиях постоянного развития и расширения возможностей в области искусственного интеллекта и компьютерного зрения, становится все более важным выбрать наиболее подходящий алгоритм для конкретного приложения или задачи. Однако помимо современных подходов, таких как глубокое обучение и нейронные сети, следует учитывать и классические методы машинного зрения, которые обладают своими преимуществами в сравнении с современными методами.

Среди классических методов машинного зрения можно выделить следующие: обнаружение краев (edge detection), пороговая обработка изображений, каскад Хаара и т. д.

Обнаружение краёв. Обнаружение краев является наиболее важной и широко применяемой операцией обработки изображений. Для этого есть разные важные причины, но в конечном счете описание форм объектов по их краям и внутренним контурам уменьшает объем данных, необходимых для хранения изображения, тем самым значительно повышая эффективность последующего хранения и обработки. [1]

Дискретные производные.

Производная непрерывной функции одного аргумента определяется сходимостью отношений разностей, в которых ненулевое приращение аргумента ε стремится к 0:

$$\frac{df}{dx}(x) = f'(x) = \left(\frac{f(x + \varepsilon) - f(x)}{\varepsilon} \right).$$

Данная функция является дифференцируемой в точке x , при условии, что заданное отношение стремится к определенному пределу. В случае функций с двумя аргументами, таких как функция $f(x, y)$, определяются частные производные, например производная по y :

$$\frac{df}{dy}(x, y) = f_y(x, y) = \left(\frac{f(x, y + \varepsilon) - f(x, y)}{\varepsilon} \right).$$

При этом производная по x определяется аналогично.

Необходимо отметить, что на дискретной сетке минимальное расстояние равно расстоянию между соседними пикселями, таким образом $\varepsilon = 1$. Вместо использования определения производной (3. 2) в виде отношения разностей при $\varepsilon = 1$, оптимальнее использовать симметричное представление, где $\varepsilon = 1$ в обоих направлениях. Простейшее симметричное представление отношения разностей для производной по y имеет следующий вид:

$$I_y(x, y) = \frac{I(x, y + \varepsilon) - I(x, y - \varepsilon)}{2\varepsilon} = \frac{I(x, y + 1) - I(x, y - 1)}{2}.$$

Выражение позволяет аппроксимировать первую производную, которая крайне чувствительна к шуму. Итоговая аппроксимация модуля градиента имеет вид:

$$\sqrt{I_x(x, y)^2 + I_y(x, y)^2} \approx \|\text{grad } I(x, y)\|_2$$

В данном случае можно увидеть комбинацию, состоящую из двух локальных линейных операторов, ядро первого I_x , а ядро второго – I_y (рисунок 1).

0	0	0	/2	0	-1	0	/2
-1	0	1		0	0	0	
0	0	0		0	1	0	

Рисунок 1 – Ядра разностных фильтров

В этом случае масштабный коэффициент 2 не равен сумме весов в ядре. Сумма весов равна нулю, и это соответствует тому факту, что производная постоянной функции равна 0 [2].

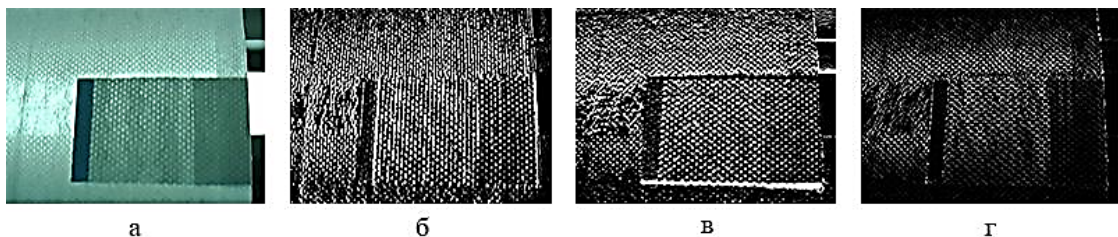
Результат свертки с одним из этих ядер может оказаться отрицательным. Поэтому I_x и I_y – не настоящие изображения в том смысле, что значениями пикселей могут быть отрицательные и рациональные числа, а не только целые в диапазоне $\{0, 1, \dots, G_{\max}\}$. При визуализации дискретных производных, таких как I_x и I_y , принято показывать округленные целые значения $|I_x|$ и $|I_y|$. [2]

Оператор Собеля.

Оператор Собеля необходим для аппроксимации обеих частных производных изображения I . Получается путем умножения фильтров, производных по x и y , полученных выше, на некоторый сглаживающий фильтр (1D) в другом направлении.

Так как в данном случае для размытия применяется фильтр Гаусса, оператор Собеля вычисляет градиент с предварительным сглаживанием. Это делает его менее чувствительным к шуму. Благодаря свойству отделимости ядра оператор Собеля является вычислительно эффективным.

Алгоритм оператора Собеля был протестирован на пробном изображении (рисунок 2а), в направлении x (рисунок 2б), в направлении y (рисунок 2в), а также в обоих направлениях (рисунок 2г).



а) исходное изображение; б) результат работы оператора собеля в направлении x ;
в) результат работы оператора собеля в направлении y ;
г) результат работы оператора собеля в направлении $x - y$

Рисунок 2 – Пример использования оператора Собеля.

Оператор Кэнни.

Детектор краев Кэнни был задуман как значительно более точная альтернатива основным детекторам краев, включая детектор Собеля, что классифицирует его как более продуманный и применимый в более сложных условиях алгоритм.

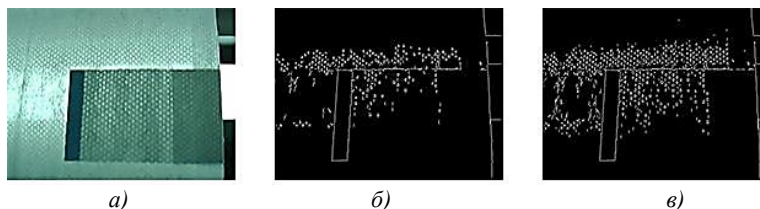
В целях достижения значительной точности последовательно выполняется некоторая совокупность процессов:

1. Для обеспечения математической корректности поля интенсивности применяется двумерное гауссовское размытие изображения.

2. Вычисляется поле величины градиента изображения с предварительным применением дифференцирования с использованием двух одномерных производных функций, таких как функции Собеля.

3. Применение пороговой (гистерезисной) обработки: используется два порога t_1 и t_2 ($t_2 > t_1$) к полю градиента интенсивности; результатом является «не край», если $g < t_1$, «край», если $g > t_2$, а иначе это будет «край», только если он находится рядом с «краем».

С использованием данных методов был протестирован оператор Кэнни для обнаружения краёв при разных условиях пороговой обработки (рисунок 3).



а) исходное изображение; б) результат работы оператора кэнни при $t_1 = 100$, $t_2 = 200$;
в) результат работы оператора кэнни при $t_1 = 100$, $t_2 = 150$.

Рисунок 3 – Пример использования оператора Кэнни

Пороговая обработка изображений.

Данный подход представляет собой проверку принадлежности пикселя изображения в определённый, заранее заданный промежуток. При условии, что значение пикселя не входит в заданный промежуток, ему присваивается значение 0, в противном случае ему присваивается максимальное значение (обычно 255). Таким образом создаётся бинарная маска (состоящая из пикселей с двумя крайними значениями интенсивности 0 и 255 или 0 и 1 в зависимости от используемой системы). Следует отметить, что данный алгоритм может использоваться как в одномерных и двумерных цветовых пространствах, так и в трёхмерных, что значительно расширяет возможности при детектировании объектов.

Данный алгоритм был протестирован (рисунок 4) и показал весьма перспективный результат.

Исходный код для тестирования операторов Собеля и Кэнни приведён в приложении А.



а) исходное изображение; б) результат работы оператора пороговой обработки.

Рисунок 4 – Пример использования метода пороговой обработки изображения

Современными и перспективными подходами для решения задач определения объектов на изображениях являются каскад Хаара и нейронные сети.

Из всех вышеперечисленных методов пороговая обработка изображений является самым надёжным и одним из самых быстродействующих методов, который позволяет сохранять точность обнаружения при условии сохранения цвета объекта.

Список литературы

1. Мэрфи, К. П. Компьютерное зрение. Современные методы и перспективы развития / К. П. Мэрфи ; ред. Р. Дэвис, М. Терк ; пер. с англ. В. С. Яценкова. – М. : ДМК Пресс, 2022. – 31 с.
2. Клетте, Р. Компьютерное зрение. Теория и алгоритмы / Р. Клетте ; пер. с англ. А. А. Слинкина. – М. : ДМК Пресс, 2019. – 506 с.
3. Robust Real-time Object Detection [Электронный ресурс] // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2011. – Режим доступа: <https://www.cs.cmu.edu/~efros/courses/LBMV07/Papers/viola-cvpr-01.pdf>. – Дата доступа: 03.03.2023.
4. Сысоев, Д. В. Введение в теорию искусственного интеллекта : учеб. пособие [Электронный ресурс] / Д. В. Сысоев. – 2013. – Режим доступа: https://cchgeu.ru/upload/iblock/8ff/9xex88pxx7w230wkfntj05zmky2pr694/Iskusstvennyy-intellekt-_uch_posobie.pdf. – Дата доступа: 03.03.2023.
5. Бураков, М. В. Нейронные сети и нейроконтроллеры [Электронный ресурс] / М. В. Бураков. – 2013. – Режим доступа: <https://palchevsky.ru/uploads/books/3.pdf>. – Дата доступа: 03.03.2023.

6. Бахтин, А. В. Элементы искусственного интеллекта в системах управления [Электронный ресурс] / А. В. Бахтин. – 2015. – Режим доступа: <https://nizrp.narod.ru/metod/kafinfizmtex/7.pdf>. – Дата доступа: 03.03.2023.

The paper analyzes standard machine vision methods applicable to solving the simplest production problems in the field of optical inspection of products.

Бочко Матвей Андреевич, студент 1 курса факультета математики и информатики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. 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, г. Гродно, Республика Беларусь, german@grsu.by.

УДК 681.124.41

Д. Д. ДАУКША

ИМИТАТОР ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НА КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЕ ДЛЯ ПОВЕРКИ СЧЁТЧИКОВ ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Представлено разработанное устройство-имитатор прохождения продукции на конвейерной ленте, предназначенное для проверки счетчиков продукции. Устройство обеспечивает прохождение тестовых объектов с заданной скоростью через измерительный зазор (контрольный участок) оптических счетчиков и позволяет выполнять их поверку с высокой точностью.

Точная и надежная работа счетчиков продукции является критически важной для автоматизации производственных процессов и контроля качества. Поверка счетчиков требует использования специализированных устройств, обеспечивающих воспроизведение движения продукции с заданной скоростью и частотой. Существующие методы поверки часто ограничены точностью и воспроизводимостью, что приводит к погрешностям или неточностям в измерениях. В данной работе представлена разработка нового компактного устройства-имитатора прохождения продукции, основанного на контролируемом вращении барабана с расположенными на нём объектами для имитации продукции. Разрабатываемое устройство призвано упростить процесс поверки счётных приборов на предприятиях, оборудованных конвейерными лентами и сделать процесс поверки более удобным, минимизировав затраты финансов и ресурсов на проведение поверки.

В разрабатываемом устройстве предполагается имитация прохождения продукции путём вращения восьмиугольного барабана с расположенными на нём объектами, имитирующими продукцию с заданными параметрами. При прохождении объекта-имитатора через контрольный участок факт прохождения фиксируется датчиком Холла (в каждом из восьми объектов-имитаторов находится магнит), в результате чего совершается +1 счёт. Для более удобного управления служит интерфейс пользователя, включающий в себя жидкокристаллический дисплей и кнопки управления. Вращение барабана производится посредством шагового двигателя.

Имитатор состоит из следующих основных компонентов:

- * Барабан с объектами, имитирующими продукцию: используется восьмиугольный барабан с расположенными на нём объектами – цилиндрами. Один цилиндр имитирует одну единицу продукции. Внутри цилиндра расположен магнит, позволяющий точно зафиксировать прохождение имитирующего цилиндра через контрольный участок = прохождению одной единицы продукции по конвейерной ленте.

- * Привод: в качестве привода используется шаговый двигатель с микрошаговым управлением, обеспечивающий высокую точность позиционирования и плавность движения.

- * Система управления: система управления основана на микроконтроллере, который обеспечивает точное регулирование скорости вращения двигателя и, следовательно, скорости прохождения имитирующих цилиндров через контрольный участок = скорости движения продукции на конвейерной ленте. Система позволяет задавать скорость вращения барабана с высокой точностью и воспроизводимостью в диапазоне от 1 до 25 – и единиц продукции в секунду.

- * Датчик Холла: для точного отслеживания прохождения продукции через контрольный участок решено использовать датчик Холла, т. к. в таком случае получится не зависеть от таких факторов как лучи света, которые могли бы создавать помехи или засветы при использовании оптических датчиков

- * Интерфейс пользователя: устройство оснащено простым и интуитивно понятным интерфейсом пользователя для задания параметров работы, таких как скорость ленты, время работы и количество проходов. Включает в себя жидкокристаллический дисплей и клавиши управления.

Блок-схема алгоритма поверки:

Согласно данному алгоритму можно разделить процесс поверки на несколько этапов: подготовка, поверка, заключение. Первоочередно проходит процесс установки требуемых поверкой параметров, таких как количество единиц продукции, проходящих через контрольный участок за единицу времени, направление прохождения продукции. После подготовки можно начать процесс отсчёта прошедшей продукции. По достижению заданных параметров, например, времени или количества продукции (не считая случая возникновения ошибки) можно совершить поверку, совершив сравнение результатов отсчёта устройством и счётчиком, установленным на предприятии. В случае возникновения ошибки, пользователь будет уведомлён о прекращении отсчёта посредством дисплея интерфейса управления.

Разрабатываемое устройство-имитатор прохождения продукции обеспечивает высокоточную и воспроизводимую поверку счетчиков. Использование шагового двигателя с микрошаговым управлением и системы обратной связи позволяет достичь высокой точности и стабильности работы. В дальнейшем планируется расширение функциональности имитатора, включая возможность моделирования различных режимов работы конвейерной ленты и интеграцию с системами автоматизированного тестирования.

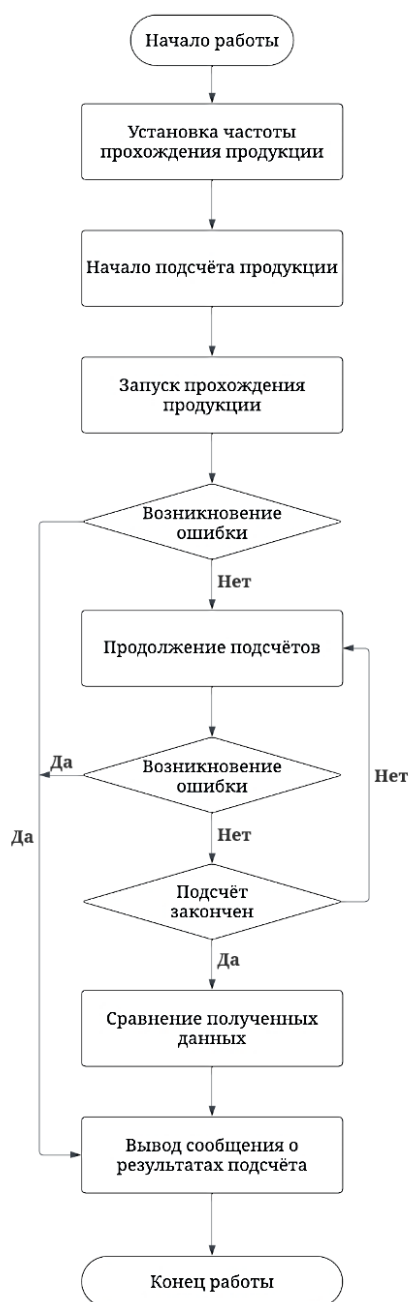


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма поверки

Блок-схема устройства имитатора движения продукции на конвейерной ленте:



Рисунок 2 – Блок-схема устройства имитатора движения продукции на конвейерной ленте

This paper presents the developed device – simulator of product passage on the conveyor belt, designed for verification of product counters. The device provides the passage of test objects at a given speed through the measuring gap (control section) of optical counters and allows to perform their verification with high accuracy.

Даукия Денис Дмитриевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, denis.d.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, г. Гродно, Республика Беларусь, german@grsu.by.

УДК 621.7:620.3

Д. Ю. КОВАЛЁВ, А. В. СЛИЖЁВА

МОДИФИКАЦИЯ ПАЯЛЬНЫХ ПАСТ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

Предложена методика модификации паяльных паст углеродными наночастицами с применением ультразвуковых колебаний в режиме микро- и макропотоков в пограничном акустическом слое. Проведены исследования прочности паяных соединений в зависимости от содержания наночастиц в пасте и температуры нагрева.

Для различных технологий пайки электронных модулей оплавлением (инфракрасной, в парогазовой фазе, конвекционной, лазерной) основным материалом является паяльная паста. В технологии поверхностного монтажа паяльная паста служит не только материалом для пайки, но и технологическим клеем, что позволяет в ряде случаев исключить нанесение клея с последующим его отверждением. Нанесение паяльной пасты с помощью трафарета или дозированием обеспечивает повторяемость объема припоя на контактных площадках, что снижает вероятность образования перемычек припоя при пайке компонентов с малым шагом выводов [1].

Наноразмерные частицы находят применение в процессах получения модифицированных материалов для космических аппаратов и в других областях науки и техники. Углеродные нанотрубки (УНТ) обладают уникальным комплексом свойств, так как они в 50–100 раз прочнее стали и имеют в 6 раз меньшую плотность [2]. Модуль Юнга у нанотрубок вдвое выше, чем у обычных углеродных волокон. Нанотрубки не только прочны, но гибки, так как перестраиваются под действием механических напряжений.

При использовании УНТ возникает ряд проблем коллоидно-химического характера, так как большинство наноструктурных частиц агрегировано, что вызывает необходимость их диспергирования и введения в композиции различного назначения. Эффективным способом диспергирования УНТ в жидких средах является применение ультразвуковых (УЗ) колебаний, под действием которых в результате кавитации и мелкомасштабных микропотоков ослабевают силы сцепления между УНТ в водных растворах ПАВ. Концентрация дисперсной фазы в суспензиях может варьироваться от 0,01 до 0,5 % масс [3].

Модифицированные УНТ паяльные пасты и припои проверяют на прочность сформированных паяных соединений и на растекание припоя по контактным поверхностям. Добавки УНТ в легкоплавкие бессвинцовые припои на основе олова улучшают паяемость, измельчают структуру припоя и тормозят рост интерметаллидов, увеличивают механическую прочность паяных соединений. При оптимальной концентрации УНТ 0,075 % прочность соединений припоем Sn – Cu увеличилась в 1,4 раза и достигла 25,1 МПа [4].

Исследовано влияние УНТ, вводимых в паяльные пасты на основе бессвинцовых припоев, на механические свойства паяных соединений, выполненных локальным индукционным нагревом. В паяльную пасту Lead Free Solder Koki (217 °C) KoreaCO, LTD в качестве модифицирующей добавки вводился углеродный наноматериал «Арт-нано», производимый на ООО «Передовые исследования и технологии» (г. Минск) по технологии пиролизного разложения сжиженного газа. Материал представляет собой смесь углеродных нанотрубок среднего диаметра 30–40 нм и длиной 0,5–1,5 мкм. Перед введением в пасту сырой материал подвергался комплексной обработке в шаровой мельнице, центрифугированию, функционализации. На рисунке 1 показана фотография обработанного углеродного материала на растровом электронном микроскопе (РЭМ).

УНТ вводились в пасту с помощью диспергатора, который подключался к генератору УЗГ22-1.5. При диспергировании наночастиц в пасте мощность генератора изменялась от 150 до 600 Вт при контроле величины кавитационного давления в ванночке с помощью кавитометра ЛК-7. Средний размер частиц УНТ составлял от 10 до 40 нм при величине кавитационного давления в жидкой среде 3–3,5 Па.

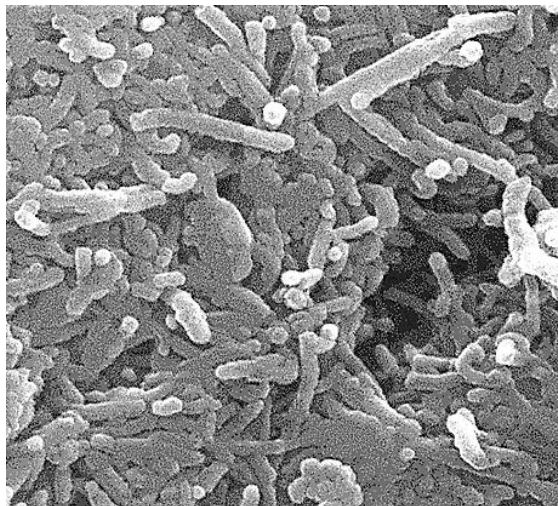


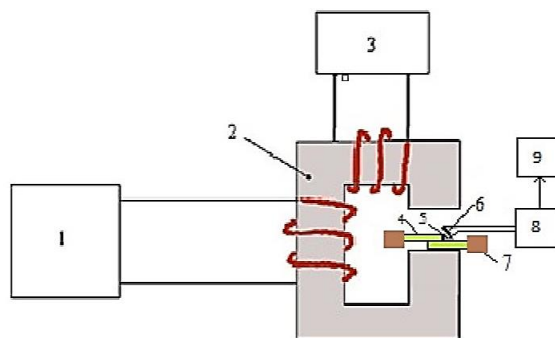
Рисунок 1 – РЭМ фотография углеродного материала

В процессе УЗ диспергирования микро-и макропотоки формировались таким образом, чтобы они обеспечивали равномерное распределение наночастиц в жидкой среде. Акустические течения шлихтинговского типа возникают в жидкой среде вблизи границы с твердой поверхностью в пограничном слое, который имеет толщину δ , и представляют собой вихри с масштабом $\lambda/4 \times 1,9 \delta$. Толщина акустического пограничного слоя δ определяется формулой [5]:

$$\delta = \sqrt{\frac{\eta}{\pi \cdot f}}$$

где η – вязкость расплава, f – частота УЗ колебаний.

Для испытаний модифицированных составов паст выполнены паяные соединения внахлест при температурах пайки 220–380 °C локальным индукционным нагревом (рисунок 2).



1 – генератор, 2 – магнитопровод, 3 – источник подмагничивания, 4 – образцы, 5 – паяльная паста, 6 – термопара, 7 – фиксатор образцов, 8 – измеритель температуры, 9 – дисплей

Рисунок 2 – Схема локального индукционного нагрева

Образцы (рисунок 3), изготовленные из латунной ленты Л62 толщиной 0,7 мм, паялись индукционным нагревом на частоте 140 кГц. Индукционный нагрев производился в зазоре магнитопровода при различных концентраторах вихревых токов (рисунок 4). Контроль прочности паяных соединений проводился на разрывные машины НПЦ-13.04.5. Зависимости усилия на сдвиг от температуры и процентного соотношения УНТ приведены на рисунке 5.

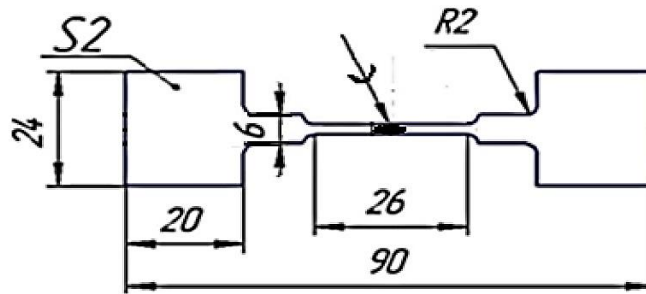


Рисунок 3 – Конструкция образцов для испытаний паяных соединений

Оптимальное значение прочности паяных соединений для большинства паяльных паст находятся в диапазоне 260–340 °С. С увеличением процентного соотношения УНТ растет прочность и стабильность. Наибольшие значения прочности соединений достигнуты при содержании УНТ 0,01 %. Механическая прочность паяных соединений, полученных с помощью бессвинцовых паяльных паст пасте Lead Free Solder KOKI KoreaCO, LTD, модифицированных УНТ, увеличивается в 1,2–1,4 раза, достигая максимального значения 42,2 МПа при содержании УНТ 0,01 %.

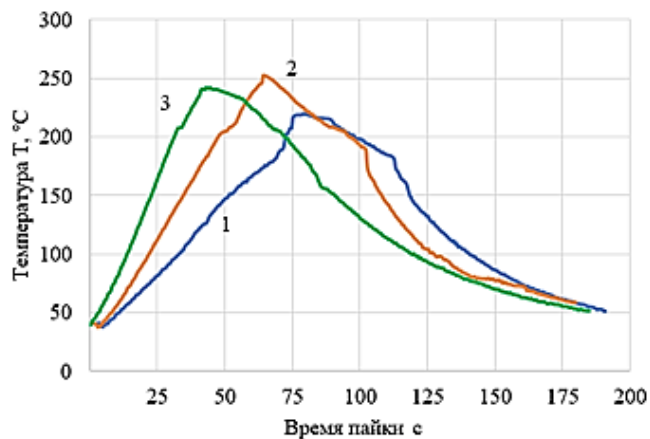


Рисунок 4 – Зависимости температуры от времени индукционного нагрева:
1 – обычный нагрев, 2 – с концентратором тока, 3 – с замкнутым контуром

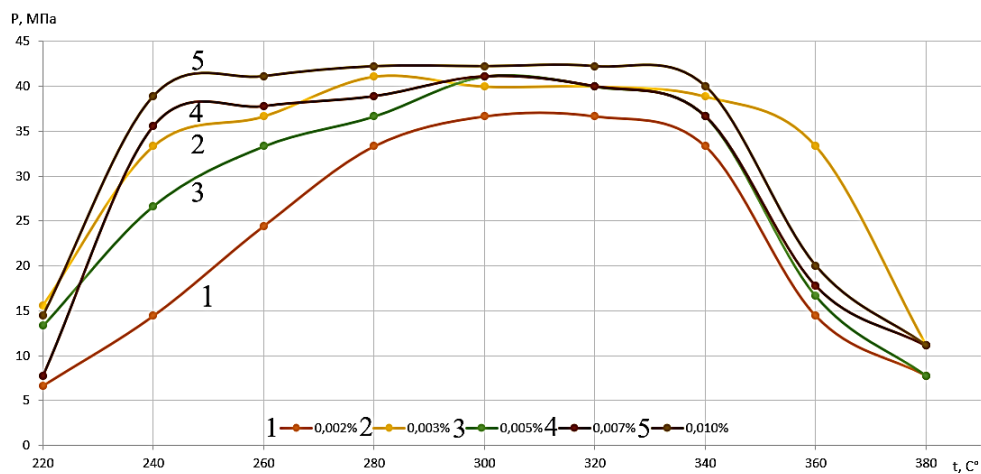


Рисунок 5 – Зависимости усилия на сдвиг паяных соединений от температуры нагрева

Список литературы

1. Нинг-Ченг Ли. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и Flip Chip технологии / Ли Нинг-Ченг. – М. : Технологии, 2006. – 392 с.
2. Раков, Э. Г. Нанотрубки и фуллерены / Э. Г. Раков. – М. : Университетская книга, Логос, 2006. – 376 с.
3. Диспергирование одностенных углеродных нанотрубок и фуллеренов с 60 в воде и в водных растворах ПАВ / А. Р. Гатауллин [и др.] // Вестн. Казан. технолог. ун-та. – 2011. – № 10. – С. 54–57.
4. The Influence of Carbon Nanotubes on the Properties of Sn Solder / Xu Kai-kai [et al.] // Materials Transactions. – 2020. – Vol. 61, № 4. – P. 718–722.
5. Повышение прочности паяных соединений введением углеродных нанотрубок в паяльные пасты / В. Л. Ланин [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 6. – С. 1465–1470.

A method for modifying solder pastes with carbon nanoparticles using ultrasonic vibrations in the micro – and macroflow mode of the boundary acoustic layer is proposed. Studies of the strength of soldered joints depending on the content of nanoparticles in the paste and the heating temperature are conducted.

Ковалёв Дмитрий Юрьевич, студент факультета компьютерного проектирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, dmitriy.kovaliou.17@gmail.com.

Слiжэва Аляксi Вячаславаўна, студэнт факультэта камп'ютэрнага праектавання Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта інфарматыкі і радыёэлектронікі, г. Мінск, Рэспубліка Беларусь, slizevaa08@gmail.com.

Научный руководитель – *Ланин Владимир Леонидович*, доктор технических наук, профессор кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, vlanin@bsuir.by.

УДК 53.087.45

В. А. КУЛИКОВСКИЙ

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УЧЕБНОГО КОРПУСА № 9 ГрГУ ИМ. ЯНКИ КУПАЛЫ

Целью данной статьи является ознакомление с результатами измерений параметров качества электрической энергии (ПКЭ), произведенных в учебном корпусе № 9 ГрГУ им. Янки Купалы.

Измерения параметров качества электроснабжения (ПКЭ) учебного корпуса № 9 ГрГУ им. Янки Купалы по адресу г. Гродно, ул. Поповича, 50 производились в период с 18:20 часов 26.02.2025 по 17:30 часов 03.03.2025. Общая продолжительность измерения составила: 4 дня 23 часа 9 минут.

На рисунке 1 приведена схема подключения анализатора качества электрической энергии PQM-703. В качестве места подключения была использована розетка 230 В, использовались только входы по напряжению L1 и N, входы по току не использовались.

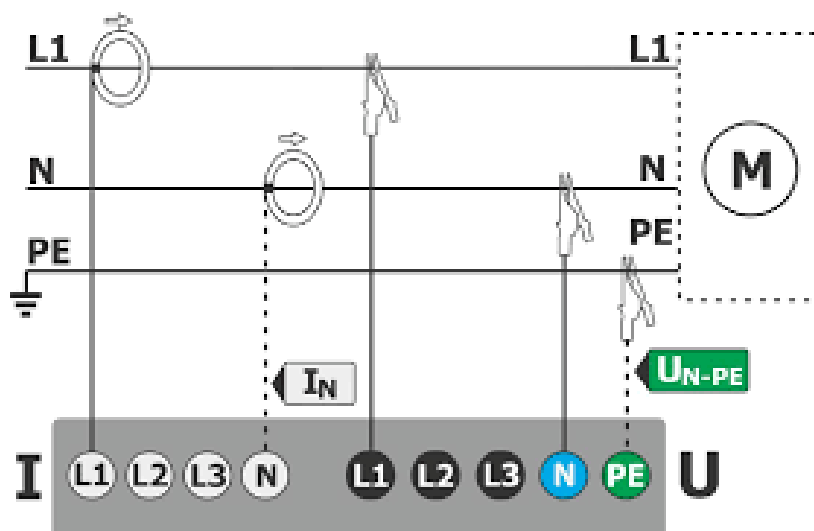


Рисунок 1 – Схема подключения анализатора PQM-703

Во время измерения были получены данные следующих параметров:

- частота;
- напряжение;
- постоянная составляющая напряжения;
- кратковременная доза фликера;
- длительная доза фликера;
- коэффициент пиковых значений напряжения;
- коэффициент гармонических искажений;
- амплитуды напряжений гармоник;
- коэффициент интергармоник напряжения;
- амплитуды интергармоник напряжения.

После завершения измерений данные были загружены с анализатора качества электрической энергии PQM-703 на персональный компьютер для последующей обработки результатов в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [3].

Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерений

Показатель ПКЭ	Результат измерения			Нормативное значение [3]
	Минимальное	Среднее	Максимальное	
Частота, Гц	49,95	$49,998 \pm 0,017$	50,05	50,0
Напряжение, В	217,18	$225,11 \pm 3,56$	230,44	220
Постоянная составляющая напряжения, В	–0,345	$-0,120 \pm 0,015$	0,118	–
Кратковременная доза фликера	0,09	$0,24 \pm 0,014$	0,64	1,38
Длительная доза фликера	0,11	$0,16 \pm 0,083$	0,33	1,0
Коэффициент пиковых значений напряжения	1,37	$1,38 \pm 0,08$	1,43	1,41
Коэффициент гармонических искажений, %	1,17	$2,35 \pm 1,15$	3,88	8,0
Коэффициент интергармоник напряжения	0,05	$0,06 \pm 0,02$	1,84	8,0

Проанализировав данные с таблицы 1 на соответствие ГОСТ 32144-2013 [3], можно сделать вывод, что ПКЭ соответствуют [3] и находятся в допустимых отклонениях в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [3].

На рисунке 2 приведены зависимости ПКЭ от времени.

В таблице 2 приведены значения коэффициентов напряжения для гармонических и интергармонических составляющих 2–11 порядка из 50 измеренных с допустимыми значениями в соответствии ГОСТ 32144-2013 [3].

Значения коэффициентов напряжений гармонических и интергармонических составляющих n -порядка рассчитываются по формуле:

$$(U_{(n)i} / U_{(1)i}) \cdot 100 \%,$$

где $U_{(n)i}$ – значение напряжения n -й гармоники;

$U_{(1)i}$ – действующее значение напряжения основной частоты на i -м наблюдении.

После расчета анализируем полученные данные.

Проанализировав данные из таблицы 2 можно сделать вывод, что данные для коэффициентов напряжений гармонических и интергармонических составляющих соответствуют ГОСТ 32144-2013 [3].

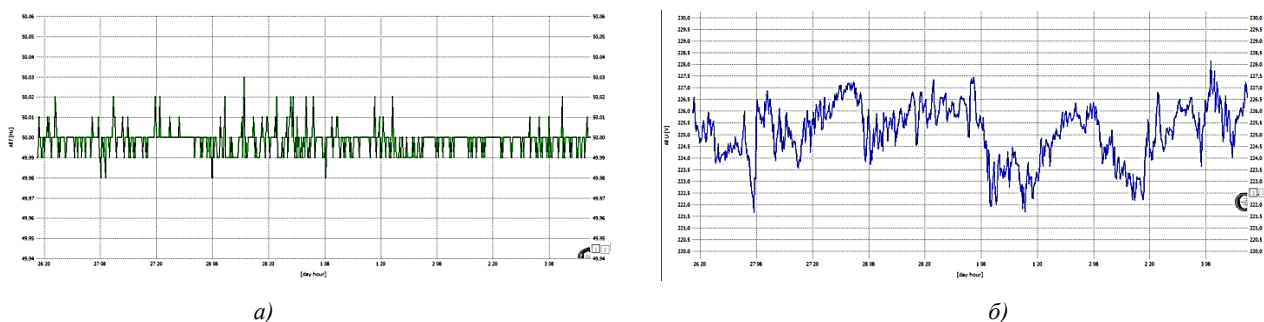


Рисунок 2 – Графики зависимости параметров ПКЭ от времени: а) частоты; б) напряжения

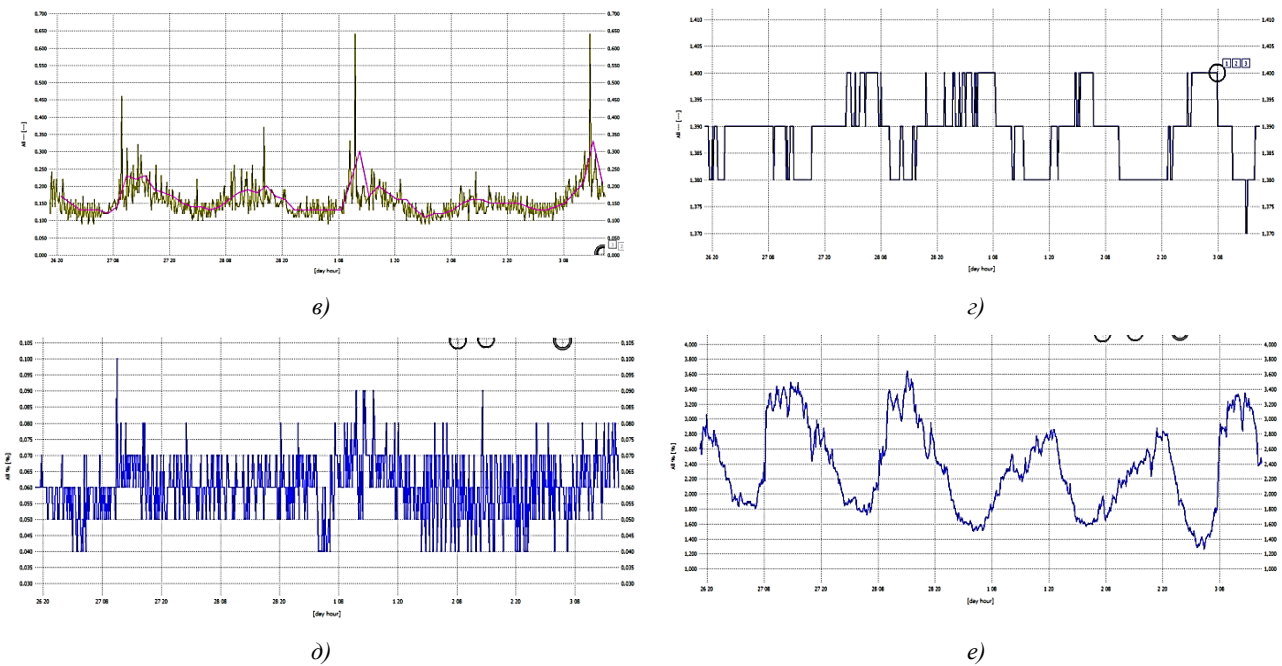


Рисунок 2 – Графики зависимости параметров ПКЭ от времени:
в) кратковременной дозы фликера (жёлтый) и длительной дозы фликера (розовый);
г) коэффициента пиковых значений напряжения; д) коэффициента гармонических искажений;
е) коэффициента интергармоник напряжения

Таблица 2 – Коэффициенты напряжений гармонических и интергармонических составляющих

<i>n</i>	Результат	Нормативное значение	Результат	Нормативное значение
Гармоники			Интергармоники	
2	0,022	2,0	0,023	2,0
3	1,646	5,0	0,016	5,0
4	0,019	1,0	0,019	1,0
5	1,392	6,0	0,012	6,0
6	0,016	0,5	0,013	0,5
7	0,324	5,0	0,009	5,0
8	0,012	0,5	0,008	0,5
9	0,511	1,5	0,006	1,5
10	0,008	0,5	0,007	0,5
11	0,402	3,5	0,006	3,5

На рисунке 2 приведены амплитуды для *n*: гармоник и интергармоник.

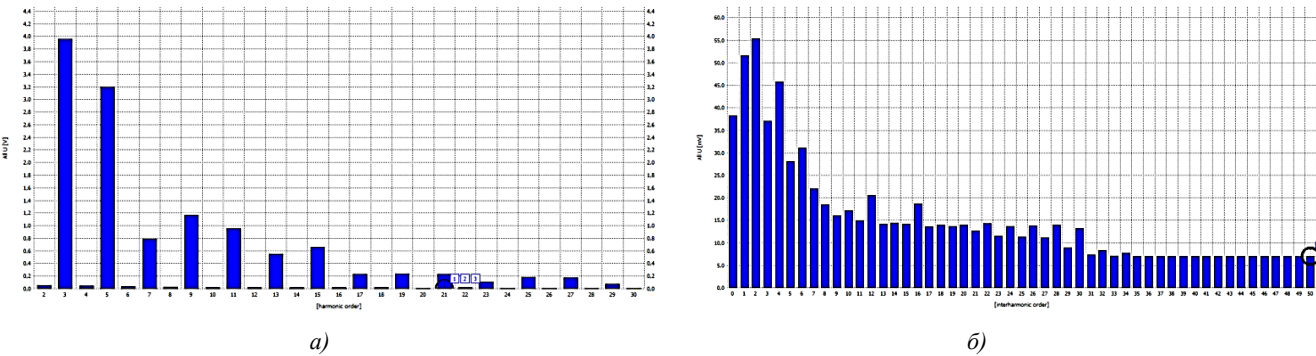


Рисунок 3 – Амплитуды напряжений от *n*: а) гармоник, б) интергармоник

Качество электроснабжения учебного корпуса № 9 ГрГУ им. Янки Купалы соответствует ГОСТ 32144-2013.

Список литературы

1. PQM-702 PQM-703 PQM-710 PQM-711. Анализаторы качества электрической энергии. Руководство по эксплуатации. Версия 1.3: SONEL S. A. – Свидница : SONEL S. A., 2017. – 136 с.
2. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 33073-2014. – Введ. 01.01.2015. – М. : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2019. – 45 с.
3. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 32144-2013. – Введ. 01.04.2016. – М. : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2013. – 20 с.

The purpose of this article is to familiarize with the results of measurements of the parameters of quality of electric energy (PQE) carried out in the educational building No. 9 of the YankaKupala State University of Grodno.

Куликовский Владислав Александрович, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, vkulikovsky86@gmail.com.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь.

УДК 621.375.826

А. А. ЛИСКОВИЧ

РОСТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ФАКЕЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НА ВЕЩЕСТВО

Рассмотрены причины роста эффективности образования плазменного факела при воздействии сдвоенными лазерными импульсами на вещество. Показано, что использование сдвоенных лазерных импульсов наносекундной длительности дает возможности широкого маневра при подборе настроек как для лазерно-эмиссионного спектрального анализа, так и для технологических применений – прецизионной лазерной обработки материалов и изделий.

С развитием науки и техники на современном этапе значительный вклад в исследование характеристик материалов, веществ и изделий внес лазерно-эмиссионный спектральный анализ (LIBS) [1; 2]. Он позволяет определять не только элементный химический состав исследуемого вещества, на которое проецируется концентрированное лазерное излучение, но и свойства образованного на его поверхности плазменного факела [3; 4]. Методы исследования состава вещества при этом базируются на анализе эмиссионного спектра плазменного факела, образованного под действием сфокусированного в пятно диаметром 0,1–0,3 мм на вещество импульсного лазерного излучения наносекундной длительности. Расшифровка этого спектра позволяет сделать заключение об элементном химическом составе вещества [5; 6]. Исследование продуктов рекомбинации лазерно-эмиссионной плазмы показывает, что при конденсации вынесенного из кратера вещества образуются наночастицы и другие наноструктуры [7; 8].

Возможности методов лазерно-эмиссионного спектрального анализа на раннем этапе их развития были не высокими. С развитием технологий возможности LIBS анализа выросли на порядок. В настоящее время LIBS методы имеют ряд преимуществ перед классическим эмиссионным спектральным анализом. Это минимальный пробоотбор, высокая экспрессность, бесконтактность, возможность многократного повторения анализа. Применение LIBS-методов позволяет проводить «быстрый» контроль химического состава веществ (~1 минута). Скорость выполнения анализа в основном зависит от скорости компьютерной обработки зарегистрированных спектров. LIBS методы позволяют проводить анализ элементного состава вещества, находящегося в различных агрегатных состояниях, различной электропроводности, различной температуры. Для анализа требуется всего лишь 10^{-4} – 10^{-5} мм³ вещества, что позволяет реализовать точечное определение элементного состава и изучать распределение химических элементов по поверхности изделий. Для проведения LIBS – анализа предварительная подготовка образца не является обязательной. Указанные выше преимущества стимулировали бурный интерес к LIBS спектроскопии.

Взаимодействие лазерного излучения с веществом. На рисунке 1 приведена схема взаимодействия лазерного излучения с твердой поверхностью. Лазерный импульс (2) фокусируется через линзу (1) на исследуемую твердую поверхность (3). Пятно фокусировки имеет площадь от 10^{-3} см² до 10^{-4} см² (4). После воздействия лазерного импульса на твердую поверхность образуется эрозийный кратер (6). Вынесенное из кратера вещество формирует над ним высокотемпературное разлетающееся облакоплотной плазмы (7) расширение которого приводит к формированию излучающей области с рекомбинирующей плазмой (8). За областью светящейся плазмы скапливаются вытесненные из светящейся плазмы положительные ионы (9). За ней находится область нулево-

го потенциала (10), которая является границей двух областей между положительными ионами (10) и электронным фронтом (11).

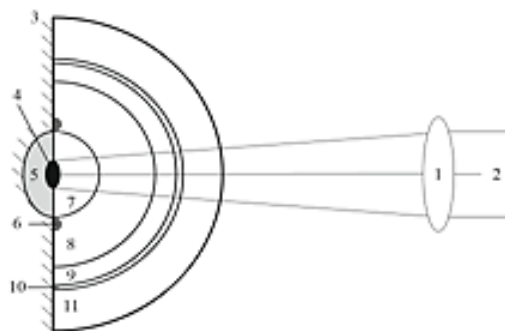


Рисунок 1 – Образование и развитие плазменного факела при взаимодействии лазерного излучения с веществом

Время жизни плазменного облака составляет от нескольких микросекунд до нескольких десятков. Образование границ нулевого потенциала сопряжено с распределением непрорекомбинировавших положительных ионов и электронов в своих областях. Во время формирования эрозийного плазменного факела изменяются температура, плотность, энергия частиц и др. При определенных настройках лазерной установки, можно добиться максимального размера плазменного факела с облучаемой поверхности на порядки превышающего диаметр пятна фокусировки лазерного излучения. Помимо этого, в результате образования плазменного факела образуются капельные массы вещества, выносимые с поверхности в окружающую среду, т. е. происходит абляция вещества с облучаемой поверхности. Абляция вещества происходит при нагревании облучаемой поверхности до температуры свыше 10^4 К. В месте фокусировки лазерного излучения давление плазмы будет составлять примерно 10^3 атм. Образовавшаяся плазма высокой плотности и высокой температуры будет разлетаться в окружающую среду и конденсироваться в виде капель вещества, а также выдавливать расплав из кратера [8; 9].

Взаимодействие двояных лазерных импульсов с веществом. Исследования лазерно-эмиссионной плазмы, образованной одиночными лазерными импульсами, показали, что она является очень нестабильной, а интенсивности ее спектральных линий сильно зависят от стабильности характеристик импульса лазерного излучения, точности его фокусировки, однородности исследуемого вещества и т. д. это затрудняло использование лазерно-эмиссионной плазмы для количественного анализа и потребовало развития дополнительных методов для ее стабилизации. Ситуация изменилась, когда в работе [10] было показано, что воздействие на вещество парой лазерных импульсов, разделенных временным интервалом в несколько микросекунд, приводит к существенному росту интенсивности спектральных линий плазмы, повышению их контрастности и стабильности. В работах [11–13] показано, что рост интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы и рост выноса вещества из эрозийного кратера, образованного на поверхности металлов наносекундными лазерными импульсами, обусловлен значительным ростом эффективности взаимодействия второго лазерного импульса, по сравнению с первым.

Первый лазерный импульс формирует эрозийный кратер на поверхности вещества. Образовавшийся плазменный факел отбрасывает воздух от него. Второй лазерный импульс, проникает сквозь плазменный факел, образованный первым лазерным импульсом, и уже взаимодействует с «горячей» поверхностью кратера, образованного первым лазерным импульсом. Он выносит из кратера значительно большее количество вещества. Его количество может на порядок превышать количество вещества, вынесенное первым лазерным импульсом. Плазменный факел, образованный вторым лазерным импульсом, инжектируется внутрь первого, в область, практически не содержащую воздуха. Инжекция горячей плазмы, образованной вторым лазерным импульсом, вовнутрь первого плазменного факела приводит к повторному испарению наноразмерных частиц, сконденсировавшихся из вещества, вынесенного первым лазерным импульсом, возбуждению и ионизации его атомов. Это приводит к росту их концентрации, и в конечном итоге к скачкообразному росту интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы [14; 15].

Для повышения интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы и контрастности линейчатого спектра, предлагалось использовать нагрев изделий [16], стробирование временного интервала при регистрации спектров [17], нанесение наночастиц на поверхность и др.

При использовании двояных лазерных импульсов, разделенных между собой временным интервалом, в практической лазерно-эмиссионной спектроскопии имеется возможность изменять как величину межимпульсного интервала, так и величину энергии лазерных импульсов. Имея возможность изменять задержку между лазерными импульсами, можно получить большое количество различных комбинаций настроек как самой лазер-

ной системы, так и лазерного излучения вместе с облучаемой поверхностью исследуемого вещества. Выставляя начальные параметры лазера и зная значения параметров первого импульса, можно задавать с достаточно высокой точностью нужный нам интервал времени для формирования второго импульса. Выбирая промежуток времени между лазерными импульсами, можно влиять на параметры плазменного факела, образованного вторым лазерным импульсом. При воздействии второго лазерного импульса на плазменный факел, образованный первым лазерным импульсом, происходит слабое его поглощение плазмой первого факела.

С увеличением плотности мощности лазерного излучения происходит рост температуры эрозионного кратера и рост плотности плазмы в лазерно-эмиссионном факеле. А с ростом температуры и плотности облучаемой поверхности растёт и количество выносимого материала с этой поверхности. Ростом плазменного факела также можно управлять, задавая мощности для лазерных импульсов и их временного интервала относительно друг друга. Так, первый импульс, может иметь меньшую мощность по сравнению со вторым импульсом, и эффективность роста существующего факела будет значительно большей. Или на оборот, второй импульс лазерный импульс может иметь меньшую мощность и тогда роста плазменного факела будет меньше. С ростом самого плазменного факела возрастают и активные зоны вокруг него. Происходит увеличение глубины и ширины кратера за счёт выносимого давлением плазмы капельного материала. Происходит рост бруствера по окружности края кратера, за счёт вытесненной из кратера массы вещества, поскольку выносимой абляционной массы становится больше из-за второго импульса, следовательно, и образовавшийся бруствер, тоже станет больше. Возрастает область светящейся рекомбинирующей плазмы. При этом она будет иметь большую яркость, за счёт большего количества, поступившего в ней вещества.

Таким образом, использование вдвоенных лазерных импульсов наносекундной длительности дает возможности широкого маневра при подборе настроек как для лазерно-эмиссионного спектрального анализа, так и для технологических применений – прецизионной лазерной обработки материалов и изделий. Особенностью воздействия вдвоенными лазерными импульсами на вещество является существенный рост эффективности взаимодействия второго импульса по сравнению с первым. Это обусловлено тем, что второй лазерный импульс взаимодействует с горячей поверхностью кратера, образованного первым лазерным импульсом.

Список литературы

1. Singh, J. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy / J. Singh, S. Thakur. – Amsterdam : Elsevier, 2007. – 454 p.
2. Кремерс, Д. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия / Д. Кремерс, Л. Радиемски. – М. : Техносфера, 2009. – 370 с.
3. Курьян, Н. Н. Временная динамика свечения лазерно-эмиссионного факела глины / Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, В. В. Григуть // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 101–110.
4. Лещик, С. Д. Исследование частиц, генерированных лазерной абляцией твердых тел в жидкости / С. Д. Лещик, К. Ф. Зноско, Ю. К. Калугин // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер.: Машиностроение. – 2014. – № 4. – С. 6–10.
5. Ануфрик, С. С. Спектральный анализ элементного состава древесноволокнистой плиты / С. С. Ануфрик, К. Ф. Зноско, Н. Н. Курьян // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2015. – № 3 (199). – С. 83–92.
6. Исследование микроэлементного химического состава строительного песка методами спектрального анализа / С. С. Ануфрик [и др.] // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2016. – Т. 6, № 2. – С. 57–63.
7. Получение наночастиц лазерной абляцией твердых тел в жидкости в режиме наносекундных импульсов / С. Д. Лещик [и др.] // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 84–87.
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. Протекание эрозионных процессов в приповерхностной области металлов под действием интенсивных наносекундных лазерных импульсов / В. К. Гончаров [и др.] // Инженерно- физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 4. – С. 747–753.
10. Влияние режима облучения на поверхности на спектр свечения лазерной плазмы / Г. П. Арумов [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1987. – Т. 13, № 14. – С. 870–874.
11. Першин, С. М. Нелинейный рост эффективности взаимодействия второго импульса с мишенью при возбуждении плазмы пучком импульсов Nd: YAG-лазера / С. М. Першин // Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39, № 1. – С. 63–67.
12. Зноско, К. Ф. Усиление интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы при ее формировании вдвоенными лазерными импульсами / К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 103–115.
13. Зноско, К. Ф. Рост эффективности взаимодействия вдвоенных импульсов YAG: Nd³⁺-лазера с Al мишенью при уменьшении межимпульсного интервала / К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2020. – Т. 10, № 3. – С. 100–113.
14. Зноско, К. Ф. Оптимизация двухимпульсного режима лазерной абляции цветных металлов / К. Ф. Зноско, С. Д. Лещик // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка. – 2021. – Т. 11, № 1. – С. 45–58.

15. Зноско, К. Ф. Механизмы усиления интенсивности спектральных линий плазмы и роста выноса материала из эрозионного кратера при двухимпульсной лазерной абляции / К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 116–132.

16. Зноско, К. Ф. Влияние температуры мишени на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы / К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2021. – Т. 11, № 1. – С. 94–106.

17. Попов, А. М. Использование лазерно – искровой эмиссионной спектроскопии для анализа конструкционных материалов и объектов окружающей среды / А. М. Попов, Т. А. Лабутин, Н. Б. Зоров // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. – 2009. – Т. 50, № 6. – С. 453–467.

In this paper, we consider the reasons for the increase in the efficiency of plasma torch formation when double laser pulses act on a substance. It is shown that the use of double laser pulses of nanosecond duration provides opportunities for wide maneuvering in selecting settings for both laser emission spectral analysis and for technological applications – precision laser processing of materials and products.

Лискович Антон Андреевич, аспирант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, 130041997@mail.ru.

Научный руководитель – *Зноско Казимир Францевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, znosko@grsu.by.

УДК 535-45

Н. И. ОЧЕРЕТЯНЫЙ

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ПЛЁНКА НА ЛОБОВОЕ СТЕКЛО АВТОМОБИЛЯ

Предложен вариант поляризационной плёнки на лобовое стекло автомобиля. Плёнка работает на основе явления поляризации света, устраняя блики от мокрого асфальта и фар встречных автомобилей, а также блокируя ультрафиолетовое излучение. Она решает проблему повышенной нагрузки на зрение водителя и улучшает видимость в сложных погодных условиях. Рассмотрены методы измерения светопропускания с использованием люксметра и спектрометра, тестирование на оптические искажения с помощью лазерного указателя, а также анализ УФ-защиты.

Поляризация света – это физическое явление света, в результате него электрические векторы световой волны ориентируются в плоскости, параллельной той, в которой свет распространяется.

Поляризационная плёнка работает на основе явления поляризации света. Свет, отражаясь от горизонтальных поверхностей (асфальта, воды, снега), становится частично поляризованным, создавая блики. Плёнка действует как фильтр: она пропускает только свет с вертикальной ориентацией волн, блокируя горизонтальные колебания, которые вызывают ослепляющий эффект. Это устраняет блики, улучшая видимость и снижая нагрузку на глаза водителя. Также плёнка уменьшает воздействие ультрафиолетового излучения, защищая глаза и салон автомобиля.



Рисунок 1 – Принцип работы поляризационной плёнки

Технические характеристики поляризационной плёнки:

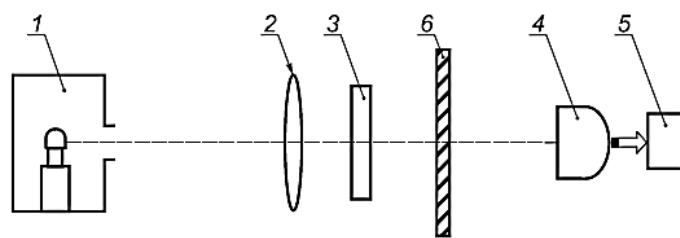
- Светопропускание: составляет 70–80 %, что соответствует нормам безопасности и обеспечивает хорошую видимость.
- Толщина: от 0,1 до 0,3 мм, что делает плёнку прочной, но не утяжеляет стекло.
- Защита от УФ-лучей: блокирует 99 % ультрафиолетового излучения, защищая глаза и салон автомобиля.
- Устойчивость к повреждениям: плёнка устойчива к царапинам и механическим воздействиям благодаря специальному защитному слою.
- Температурный диапазон: работает в широком диапазоне температур (от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$), сохраняя свои свойства в любых условиях.
- Долговечность: срок службы – до 10 лет при правильной установке и уходе.

Поляризационная плёнка состоит из нескольких слоёв, каждый из которых выполняет определённую функцию. Основу составляет полимерный материал, это полиэтилентерефталат (ПЭТ) или триацетат целлюлозы (ТАЦ), обеспечивающий гибкость и прочность. На основу наносится поляризационный слой, содержащий йод или другие дихроичные материалы (которые выборочно поглощают свет в зависимости от его поляризации), которые блокируют горизонтально поляризованный свет, устраняя блики. С обеих сторон плёнка покрыта защитными слоями из акрила или полиуретана, предохраняющими её от царапин и повреждений. С внутренней стороны наносится клеевой слой на основе акрила, устойчивый к перепадам температур и обеспечивающий надёжное крепление к стеклу. Для защиты от ультрафиолетового излучения добавляется слой с оксидами металлов (например, цинка или титана) или органическими УФ-абсорберами. В некоторых моделях присутствует антибликовое покрытие для уменьшения отражений, а также декоративный слой с красителями или металлизированным напылением для затемнения.

Для оценки эффективности поляризационной плёнки используем несколько методов измерения. Устранение бликов проверяется с использованием источника света (например, фары) и камеры с поляризационным фильтром: фиксируется уровень бликов до и после установки плёнки. Для измерения УФ-защиты применяется УФ-метр, который показывает, насколько плёнка блокирует ультрафиолетовые лучи. Температурный тест выполняется с использованием термометра или тепловизора: измеряется температура в салоне автомобиля под прямыми солнечными лучами до и после установки плёнки.

Лазерный указатель (например, с длиной волны 532 нм) направляется через образец стекла с плёнкой на экран, где фиксируется форма и чёткость светового пятна. В случае использования проектора тестовое изображение (например, сетка или точечный паттерн) проецируется через стекло, после чего анализируется наличие искажений, размытия или неравномерности. Результаты сравниваются с контрольными измерениями (без плёнки). Отсутствие искажений свидетельствует о высоком качестве плёнки, в то время как дефекты (размытие, искривление линий) указывают на низкое качество или неправильную установку.

Для количественной оценки светопропускания поляризационной плёнки применяются приборы, измеряющие интенсивность светового потока: люксметр или спектрометр. Люксметр фиксирует освещённость в люксах, в то время как спектрометр позволяет определить спектральные характеристики светопропускания в различных диапазонах длин волн, включая видимый свет, ультрафиолетовое (УФ) и инфракрасное (ИК) излучение.



1 - источник света; 2 - оптическая система; 3 - диафрагма; 4 - приемник излучения; 5 - измерительный прибор; 6 - безопасное стекло

Рисунок 2 – Оптическая схема измерений светопропускания

Процедура измерения включает несколько этапов. На первом этапе образец стекла без плёнки закрепляется на подставке, обеспечивая перпендикулярное прохождение светового потока от источника (например, стандартизированной лампы или естественного солнечного света). Люксметр или спектрометр размещается за стеклом, после чего фиксируется базовое значение освещённости или светопропускания.

На втором этапе на стекло наносится поляризационная плёнка, и измерения повторяются в идентичных условиях. Для расчёта коэффициента светопропускания используется формула:

$$T = \frac{E_f}{E_0} \times 100 \%,$$

где:

- T – коэффициент светопропускания в процентах,
- E_f – освещённость за стеклом с плёнкой,
- E_0 – освещённость за стеклом без плёнки.

В случае использования спектрометра прибор автоматически вычисляет процент светопропускания в заданном диапазоне длин волн.

Полученные данные сравниваются с нормативными требованиями. Для лобовых стёкол автомобилей допустимое значение светопропускания обычно составляет 70–80 %. Снижение этого показателя может свидетельствовать о чрезмерном затемнении, что недопустимо с точки зрения безопасности дорожного движения.



Рисунок 3 – Видимость с плёнкой и без плёнки

Поляризационная плёнка на лобовое стекло – эффективное решение для борьбы с бликами и защиты от УФ-лучей, повышающее комфорт и безопасность вождения. Она снижает нагрузку на глаза, в яркую погоду или ночью, и предотвращает выгорание салона. Однако у неё есть минусы: искажения при неправильной установке, а также ухудшения видимости ночью из-за не полного пропускания света. Несмотря на это, плёнка остаётся практичным и полезным решением для автовладельцев.

Список литературы

1. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – М. : Физматлит, 2003. – 848 с.
2. Иванов, А. А. Современные материалы для автомобильной промышленности / А. А. Иванов. – М. : Автопром, 2019. – 352 с.
3. Европейский стандарт ECE R43. Требования к безопасности автомобильных стёкол. – Женева : Европейская экономическая комиссия ООН, 2018. – 45 с.
4. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Оптика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1985. – 752 с.

A version of polarizing film for car windshield is proposed. Film at work based on the effects of light polarization, use of glare from wet asphalt and headlights of oncoming cars, as well as blocking ultraviolet radiation. It solves the problem of increased strain on drivers' eyesight and increases visibility in difficult climatic conditions. Methods for measuring light transmittance using a lux meter and spectrometer, testing for optical distortion using a laser pointer, and analyzing UV protection are discussed.

Очеретяный Никита Иванович, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, rotanchik688@gmail.com.

Научный руководитель – *Ступакевич Валерий Юозефович*, старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, tv_sad@grsu.by.

М. А. СКИРУХА, В. С. МАНКЕВИЧ

СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

В рамках данной работы была разработана система интеллектуального видеонаблюдения, сочетающая в себе методы детекции, трекинга объектов и потоковой передачи видео.

Разработка системы, способной в реальном времени анализировать видеопоток, обнаруживать и отслеживать объекты, а также предоставлять возможность записи и сохранения обработанного материала. Это позволяет повысить уровень автоматизации видеонаблюдения и снизить нагрузку на операторов.

Основной целью является создание системы, способной в реальном времени обрабатывать видеопоток, обнаруживать и отслеживать объекты, а также предоставлять возможность записи и хранения данных для последующего анализа. Автоматизированный подход к анализу видеопотока позволяет повысить уровень безопасности, минимизировать человеческий фактор и облегчить работу операторов видеонаблюдения.

Система использует YOLOv5 для детекции объектов на видеопотоке. YOLOv5 представляет собой нейросетевую архитектуру, оптимизированную для быстрого обнаружения объектов. Она работает с входными изображениями различного разрешения, анализируя сцены и выявляя объекты с высокой точностью. YOLOv5 применяет алгоритм подавления не максимальных значений (Non-Maximum Suppression, NMS), который позволяет устранить дублирующие детекции и оставить только наиболее релевантные boundingboxes. Для загрузки и использования модели в системе применяется библиотека PyTorch, обеспечивающая поддержку работы как на центральном процессоре (CPU), так и на графическом процессоре (GPU), что позволяет добиться максимальной производительности при обработке видеопотока.

После выполнения детекции объекты передаются в модуль трекинга, который реализован на основе алгоритма SORT (Simple Online and Realtime Tracking), как показано на рисунке 1. Данный метод использует Калмановский фильтр для предсказания будущего положения объектов, а также алгоритм оптимального сопоставления на основе метрики Intersection over Union (IoU), который помогает идентифицировать, являются ли два обнаружения в последовательных кадрах одним и тем же объектом. Это обеспечивает плавное отслеживание движения объектов даже в случае кратковременной потери детекции, например, если объект оказывается временно перекрыт другим элементом сцены.

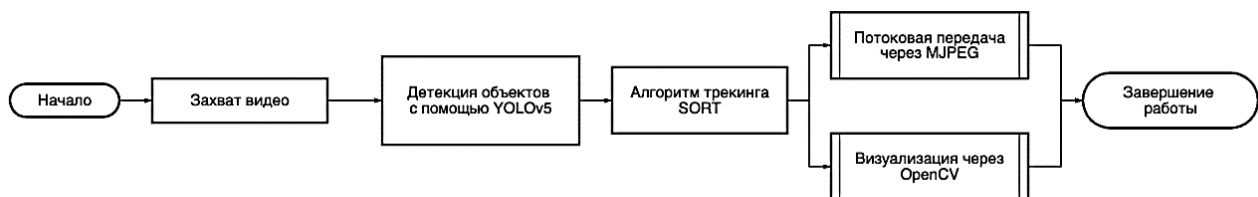


Рисунок 1 – Блок-схема работы программы

Визуализация результатов детекции и трекинга выполняется с помощью библиотеки OpenCV, которая позволяет накладывать boundingboxes, идентификаторы объектов и их траектории на видеопоток в режиме реального времени. Данные отображаются в веб-интерфейсе, разработанном на базе HTML5 и JavaScript. Веб-интерфейс также предоставляет пользователю возможность настраивать параметры работы системы, включая порог уверенности детекции, настройки трекинга и параметры записи видео.

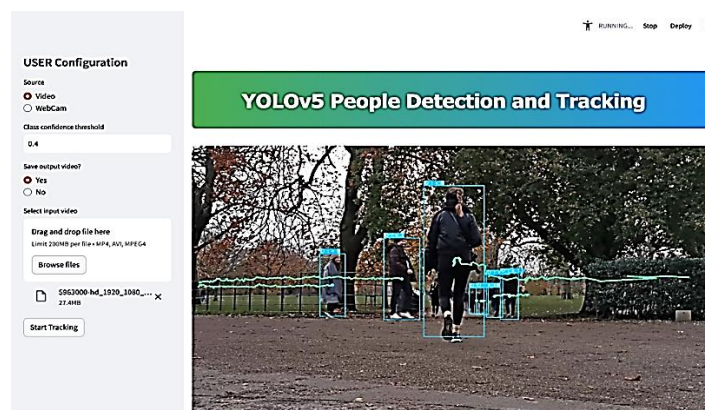


Рисунок 2 – Графический интерфейс программы анализа видео

Для организации потоковой передачи видео используется протокол Motion JPEG (MJPEG), который позволяет передавать видеопоток как последовательность изображений, минимизируя задержки и обеспечивая высокую скорость обновления кадров. Потоковое видео может поступать как с локальной веб-камеры, так и с удалённой IP-камеры, подключённой через сеть. В случае работы с IP-камерами система поддерживает интеграцию через протоколы RTSP и HTTP, обеспечивая гибкость в выборе источников видеоданных.

Запись видео реализована с использованием API MediaRecorder, который позволяет сохранять потоковые данные в формате WebM. При необходимости пользователь может включить или отключить запись, управляя процессом через веб-интерфейс. Для повышения надёжности система включает обработку ошибок, таких как разрыв соединения с камерой или отсутствие видеопотока. Записанные файлы могут быть загружены пользователем и использованы для дальнейшего анализа или архивного хранения.

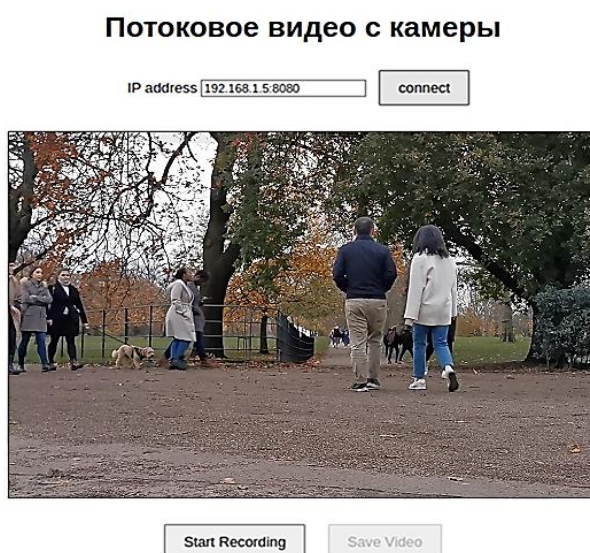


Рисунок 3 – Графический интерфейс программы потоковой передачи видео

Дополнительно в системе предусмотрена гибкая настройка параметров детекции и трекинга. Пользователь может изменять чувствительность модели YOLOv5, настраивать параметры Калмановского фильтра и регулировать время хранения треков объектов. Это позволяет адаптировать систему под различные сценарии использования, включая контроль доступа, мониторинг транспортных потоков и обеспечение безопасности на промышленных объектах.

Разработанная система интеллектуального видеонаблюдения предоставляет эффективные инструменты для анализа видеопотока в реальном времени. Использование YOLOv5 и алгоритма SORT позволяет не только обнаруживать объекты, но и отслеживать их перемещение, что значительно повышает информативность системы. Возможность потоковой передачи и записи видео делает систему универсальной и удобной в применении.

Список литературы

1. Comprehensive Guide to Ultralytics YOLOv5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.ultralytics.com/ru/yolov5>. – Дата доступа: 19.01.2025.
2. SORT: Simple, online, and real-time tracking [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/abewley/sort>. – Дата доступа: 19.01.2025.

This research demonstrates an intelligent video surveillance system that integrates object detection, tracking, and real-time video streaming. The system employs YOLOv5 for fast and accurate object detection, while SORT with Kalman filtering enables real-time tracking of detected objects. The integration of Motion JPEG-based streaming and a web-based interface ensures efficient monitoring and recording of video feeds.

Скируха Максим Антонович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, maksim@skirukha.com.

Манкевич Владислав Сергеевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, gsumt3d@gmail.com.

Научный руководитель – *Ассанович Борис Алиевич*, кандидат технических наук, доцент, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, bas@grsu.by.

М. Ч. ТАРАСЕВИЧ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ УДАРА МЯЧА

Целью данной работы является исследование комплексов электронного оборудования для подготовки спортсменов игровых видов спорта, применение в мишенях указанных систем полимерных датчиков для измерения энергии удара мяча. Для повышения качества подготовки спортсменов, увеличения количества тренировочных программ разного уровня сложности, автоматизации обработки результатов тренировок с последующей выдачей рекомендаций по корректировке параметров нагрузки в тренировочном процессе применяются комплексы электронного оборудования для подготовки спортсменов игровых видов спорта.

Конструктивно комплекс электронного оборудования состоит из системы датчиков, размещенных на игровых мишенях и считывающих энергетические параметры летящего футбольного мяча, а также блока обработки информационных сигналов, блока индикации и блока управления. Разработана структурная схема электронного оборудования для подготовки спортсменов игровых видов спорта. Проведен анализ использования в игровых мишенях для регистрации их и расчета энергетических параметров удара мяча полимерных (пленочных) пьезоэлектрических датчиков.

В настоящее время такие комплексы выпускаются за рубежом. Целью данной работы является разработка отечественной системы с улучшенными параметрами и меньшей стоимостью.

Значение контроля физической подготовленности при подготовке высококвалифицированных спортсменов в футболе в последнее время существенно возросло, что обусловлено необходимостью более эффективного управления организационным процессом с целью получения соревновательных результатов. Поэтому проведение поэтапного контроля физической подготовленности позволит не только отслеживать динамику и степень выраженности адаптационных процессов, но и обеспечить целенаправленное применение средств восстановления и коррекцию лечебных процедур в зависимости от состояния организма футболистов.

Оборудование будет использоваться для тестирования и развития специальных психофизиологических возможностей спортсмена-игрока: перемещение игрока с максимальной скоростью между заданными точками (ориентирами) площадки без мяча, с мячом, выполнение заданных технико-тактических действий (передачи, ведения мяча, удары по воротам и т. п.); выполнение заданных технико-тактических действий с максимальной скоростью по сигналу (световому и (или) звуковому).

Комплекс электронного оборудования создает искусственную среду управления, которая предъявляет к спортсмену ряд определенных требований для решения двигательной задачи (ведение мяча, передача мяча, бросок по воротам и т. п.), имитируя реальные игровые ситуации: индивидуальные, групповые и командные действия и взаимодействия игроков одной команды, противодействие соперникам, поражение ворот (баскетбольного кольца).

Планируется создать комплекс для тренировки сложных сенсомоторных реакций футболиста, выполняющего технико-тактические действия с мячом (далее – Комплекс).

Основой комплекса является мишень, которая предназначена для попадания в нее мяча.

Мишень представляет собой плоскость размером 500×1000 мм, которая может быть установлена вертикально, должна быть возможность установки не менее трех мишеней по высоте одна на другую. Необходимо найти оптимальную конструкцию мишени.

Мишень должна иметь световой индикатор двух цветов – зеленый и красный. Предполагается, что в ответ на зеленый световой сигнал игрок должен поразить мишень, которая при условии попадания и/или достижения заданной силы удара подает красный световой сигнал. Количество мишеней, размещаемых на площадке, должно быть не менее 4. Примерная схема расположения мишеней показана на рисунке 1.

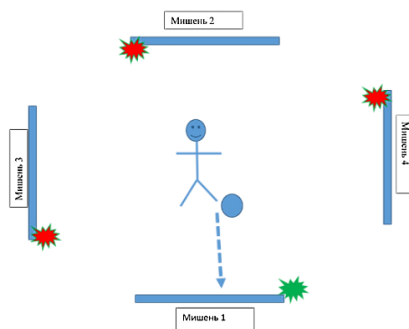
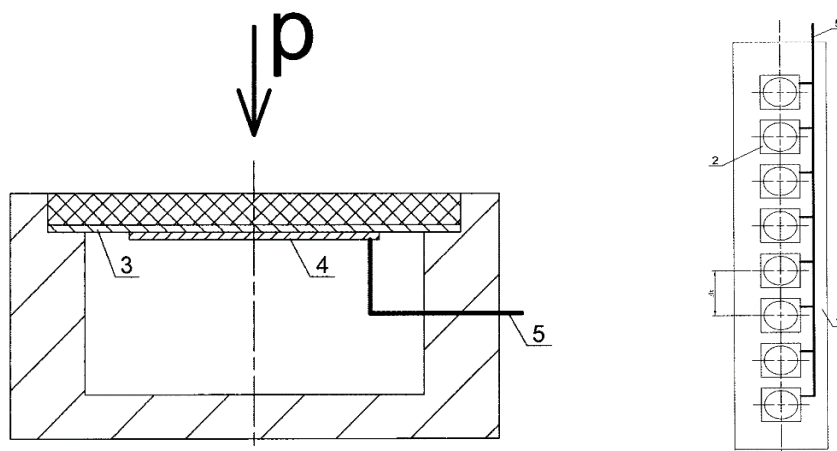
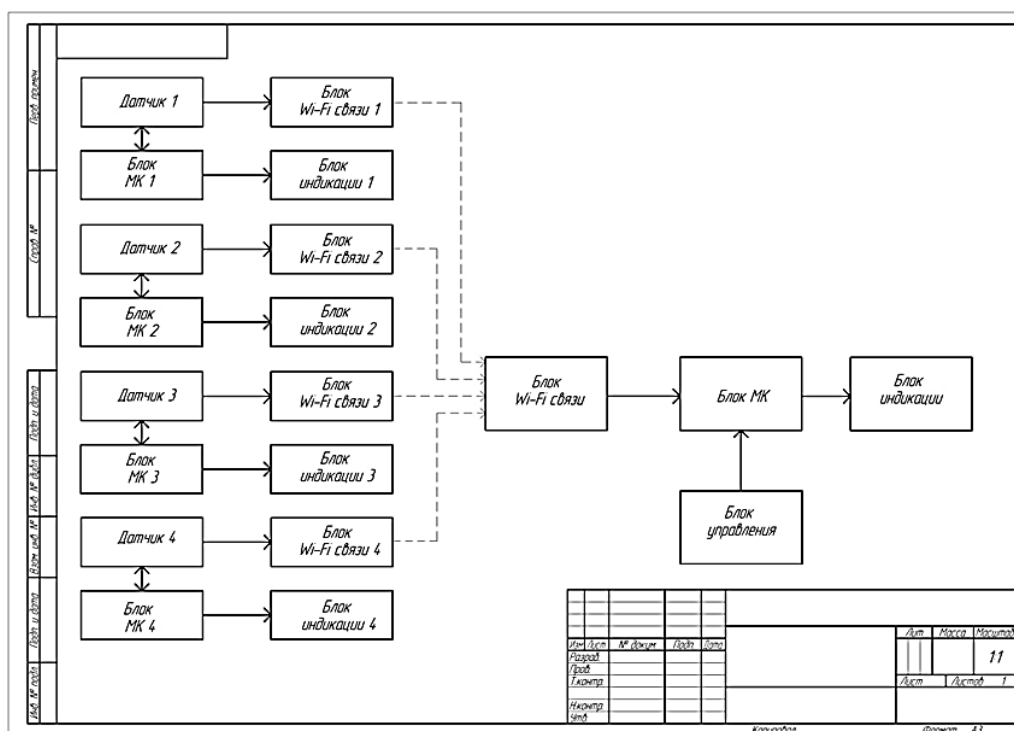


Рисунок 1 – Схема упражнений с использованием Комплекса

– мишень, в которую попадает футбольный мяч и где считаются параметры удара мяча, основой которого является полимерный датчик;

- На основании технического задания и результатов анализа технического задания разработана структурная схема, которая представлена на рисунке 2.



Пьезоэлектрический датчик силы удара (рисунок 3а) содержит цельный корпус, выполненный из диэлектрического материала, чувствительный элемент, представляющий собой мембрану из полимерного материала, на которой установлена керамика, а на внешней стороне нанесено токопроводящее напыление. Мембрана крепится к корпусу при помощи клея. На поверхность мембраны нанесен слой силикона. Данный слой силикона также выступает как демпфер, оказывая непосредственное воздействие на АЧХ устройства. Металлические обкладки чувствительного элемента через активный фильтр подключены к входу аналого-цифрового преобразователя, который подключен к компьютеру. Фильтр для уменьшения габаритов датчика размещен отдельно. Полосовой фильтр рассчитан таким образом, что со стороны высоких частот $f > 50$ Гц он подавляет помехи, связанные с высокочастотными колебаниями напряжения сети и внешними акустическими шумами. Сигнал на выходе пьезоэлектрического датчика представлен на рисунке 4.

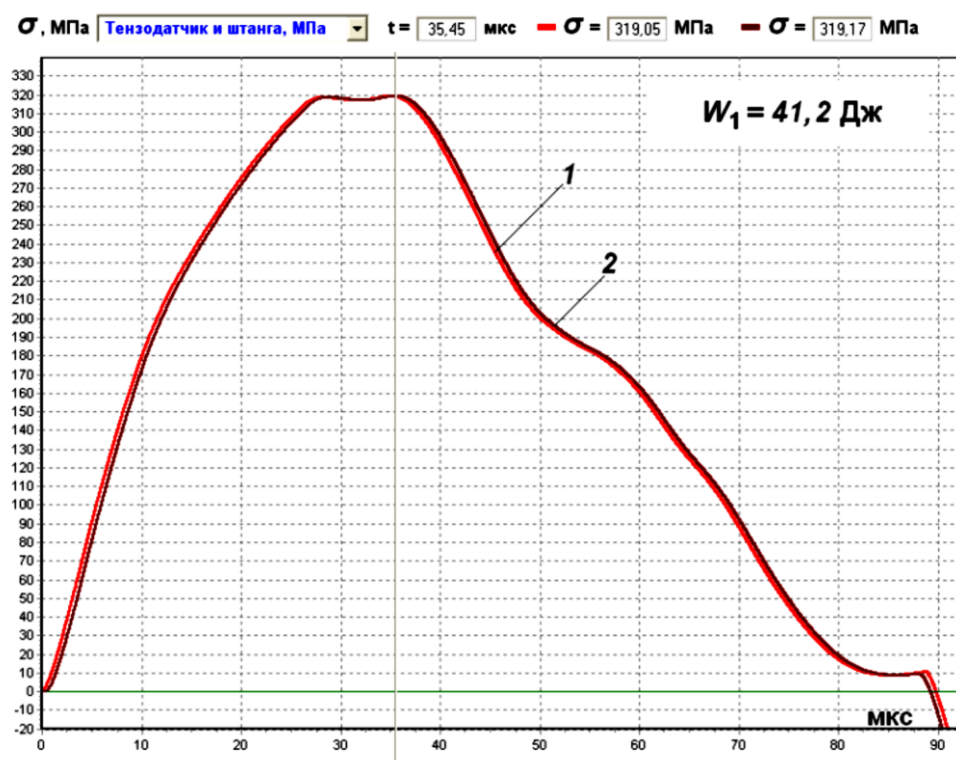


Рисунок 4 – Сигнал на выходе пьезоэлектрического датчика

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 // Вестн. науч.-техн. развития. – 2010. – № 1. – С. 42–44.

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, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, orion-88@mail.ru

Научный руководитель – Гачко Геннадий Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, gachko@grsu.by.

**СЕКЦИЯ 4.
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ
МЕТОДИКИ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКИ
КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСВОЕНИЯ МАТЕРИАЛА У ШКОЛЬНИКОВ

Одной из перспективных форм популяризации науки является использование интерактивных игровых приложений, которые позволяют делать процесс обучения более увлекательным и доступным. В данной работе было разработано игровое приложение по теме «Основы термодинамики» с применением на уроках физики для X классов учреждений образования, реализующих образовательные программы общего среднего образования с русским языком обучения и воспитания.

Современные технологии открывают широкие возможности для создания интерактивных образовательных продуктов, которые способствуют повышению интереса к обучению и улучшению усвоения материала. Разработка игр, направленных на изучение научных понятий, представляет собой перспективное направление, объединяющее образовательные, технические и креативные аспекты. Игры становятся эффективным инструментом обучения, поскольку позволяют создать увлекательную и динамичную среду, где пользователь активно взаимодействует с материалом.

Целью данной работы является разработка обучающей игры, посвящённой теме «Основы термодинамики». В процессе разработки необходимо учитывать, как научную достоверность содержания, так и удобство использования, привлекательный интерфейс и наличие интерактивных элементов. Важным этапом работы является интеграция учебных материалов в игровой процесс, чтобы пользователи могли не только получать знания, но и закреплять их через взаимодействие с игровым миром.

Процесс разработки обучающей игры начался с создания нового пустого проекта в среде GameMaker. На данном этапе ключевым аспектом являлась адаптация игры для мобильных устройств под управлением операционной системы Android, что требовало настройки специализированных инструментов и среды разработки. Для обеспечения совместимости проекта с Android – платформой были загружены и установлены необходимые программные компоненты, включая Android SDK (среда разработки), Java Development Kit (JDK) и Android Studio. Эти инструменты позволили наладить взаимодействие между GameMaker и Android-устройствами, предоставляя возможности для тестирования и отладки приложения в реальном времени. Интерфейс представлен на рисунке:

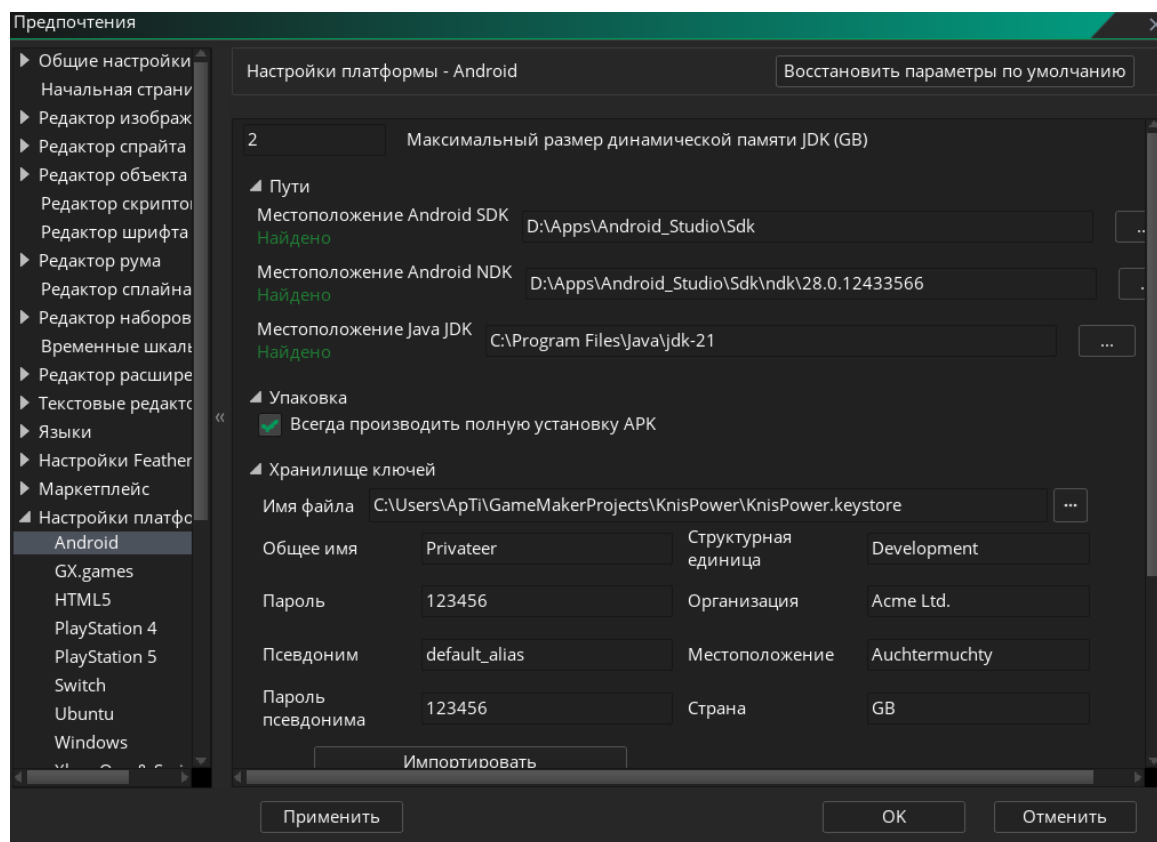


Рисунок 1 – Настройка среды разработки

Следующим шагом стало создание эмулятора Android в Android Studio. Эмулятор был настроен на версию Android 12, поскольку эта версия обладает высокой стабильностью, широким функционалом для разработчиков и соответствует современным требованиям безопасности. Использование эмулятора значительно ускорило процесс тестирования игры, устранив необходимость физического устройства на каждом этапе разработки.

После успешной настройки инструментов и эмулятора была выполнена интеграция GameMaker с Android-средой. В параметрах GameMaker был указан путь к эмулятору, что позволило наладить двустороннюю связь между средой разработки и виртуальным устройством. Затем был выполнен первый запуск игры на эмуляторе, который подтвердил корректность настроек и обеспечил базовую платформу для дальнейшей реализации игровых элементов.

Разработанное приложение апробировано для уроков в X классе, показано, что применение данного приложения на уроках помогает эффективно проводить актуализацию, обобщение, систематизацию и закрепление знаний, а также активизирует мышление учащихся, что помогает сформировать и развивать навыки поиска неочевидной информации, необходимой для решения поставленных задач.

Список литературы

1. Game-Based Learning Approach in Science Education: A Meta-Analysis / G. S. Cadiz [et al.] // International Journal of Social Science and Human Research. – 2023. – Vol. 6, № 3. – P. 1234–1245.
2. Liu, E. Z. F. Effect of Game-Based Learning on Students' Learning Performance in Science Learning – A Case of «Conveyance Go» / E. Z. F. Liu, P. K. Chen // Procedia-Social and Behavioral Sciences. – 2013. – Vol. 103. – P. 1044–1051. – (International Educational Technology Conference IETC2013).
3. Lestari, T. Effects of Quantum Learning Model Using Roulette Game on Physics Learning Outcomes / T. Lestari, Y. Rahmadhar, F. C. A. Burhendi // Jurnal Fisika dan Pendidikan Fisika. – 2020. – Vol. 6, № 1. – P. 14–19. – ISSN 2502-2318.

In this work, a game application on the topic «Fundamentals of Thermodynamics» was developed for use in physics lessons for grades X of educational institutions implementing educational programs of general secondary education with the Russian language of instruction and upbringing.

Живолевский Артемий Викторович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, artemgame20375@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, г. Гродно, Республика Беларусь, zharnova_oa@grsu.by.

Научный руководитель – *Крупская Татьяна Константиновна*, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь.

УДК 373.51

К. Н. КОЗЕЛЬСКИЙ

РАЗРАБОТКА ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСВОЕНИЯ МАТЕРИАЛА У ШКОЛЬНИКОВ

Школьники в процессе обучения по-разному усваивают школьную программу. Одни более склонны к предметам гуманитарного профиля, другим легче даются точные дисциплины. На современном этапе одной из основных образовательных задач, решаемых школой, является обучение учащихся работе с различными источниками информации, развитие функциональной грамотности учащихся. Применение на уроке рабочих листов может улучшить процесс усвоения информации [1].

Каждый учитель, планируя свой урок, ставит цели и задачи, которые он хотел бы осуществить вместе с учащимися, рассматривая ту или иную тему. Хочется, чтобы урок был интересным, ведь интересный урок – это активизация интеллектуальных и волевых процессов, их взаимопроникновение и взаимодействие друг на друга. Для повышения качества проведения урока и усвоения материала, предлагается использовать понятие «рабочий лист».

Рабочий лист – это одноразовое дидактическое пособие на печатной основе, применяемое на небольшом отрезке учебного процесса (уроке), обязательным элементом которого выступают учебные задания с требованием ответа в специально созданных формах (заготовках).

Целью работы является разработка приемов организации образовательного процесса на уроках физики в 8 классе на основе использования инструмента «рабочий лист» для формирования функциональной грамотности учащихся.

Было разработано 11 рабочих листов для уроков физики в 8 классе. Показано, что рабочие листы позволяют качественно проводить актуализацию, закрепление, обобщение и систематизацию, а также контроль знаний. Составление рабочих листов и работа с ними дают возможность развития ключевых компетенций и компонентов функциональной грамотности у учащихся с разным уровнем подготовки по конкретному учебному предмету «Физика». Разработанные методические материалы могут применять учителя средних общеобразовательных школ при подготовке и проведении уроков физики в 8 классе.

Далее представлен рабочий лист к уроку по теме: «Электрический заряд. Элементарный заряд»

Мы разработали рабочий лист, включающий несколько блоков – «Повторение пройденного», «Задачи с рисунками», «Изучите информацию для решения задачи», «Решите задачи» согласно тематике, которую изучают ученики 8 класса.

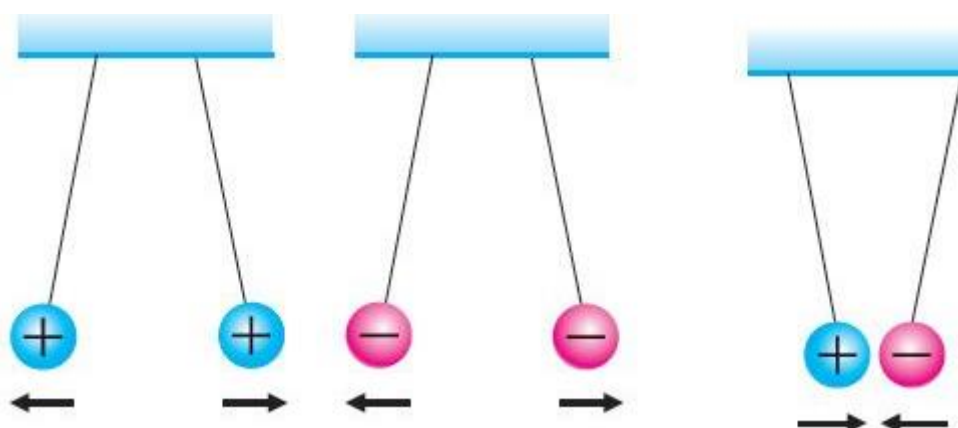
Задание 1

Повторение пройденного:

1. Что такое электрический заряд? _____.
2. Чему равен элементарный неделимый заряд? _____.
3. Что является единицей измерения в СИ заряда? _____.

Задание 2

Скажите, что будет происходить с зарядами в приведенных ниже рисунках?



Задание 3

1. Можно ли на концах стеклянной палочки получить два одновременно существующих разноименных заряда?
2. Изолированные проводники, окруженные влажным воздухом, обычно неплохо удерживают заряды. Можно ли из этого заключить, что влажный воздух проводит электричество?

Задание 4

Изучите информацию для решения задачи:

Вычислите заряд и массу трех электронов.

Дано:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$N = 3$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$m - ?$$

$$|q| - ?$$

Решение:

Полный заряд $|q|$ всех электронов найдем через элементарный заряд: $|q| = eN$. Массу трех электронов найдем через $m = Nm_e$:

$$|q| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 3 = 4,8 \cdot 10^{-19} \text{ Кл};$$

$$m = Nm_e = 3 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 27,3 \cdot 10^{-31} \text{ кг};$$

Ответ: $|q| = 4,8 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; m = 27,3 \cdot 10^{-31} \text{ кг}.$

Задание 5

Решите задачи:

1. Сколько электронов надо передать незаряженному телу чтобы заряд стал равным $q = -1,28 \cdot 10^{-11} \text{ Кл}$?
2. Два одинаковых металлических шара с зарядами $-2q$ и $+2q$ приводят в соприкосновение. Определите заряд каждого шара после соприкосновения.

Также мы провели анкетирование учителей физики чтобы иметь представление об их знакомстве с таким инструментом учебной деятельности на уроках, как рабочий лист. В ходе проведения анкетирования было выявлено, что применяют на уроках только 35 % учителей.

Таким образом, разработанные рабочие листы апробированы для уроков в 8 классе, показано, что внедрение рабочего листа в практику учебного процесса помогает эффективно проводить актуализацию, обобщение, систематизацию и закрепление знаний, а также активизирует мышление учащихся, что помогает сформировать и развивать навыки поиска неочевидной информации, необходимой для решения поставленных задач.

Список литературы

1. Физика : учеб. пособие для 8-го кл. учреждений общ. средн. образования с рус. яз. обучения / А. В. Грачёв [и др.]. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2024. – 200 с.
2. Миренкова, Е. В. Рабочий лист как средство организации самостоятельной познавательной деятельности в естественнонаучном образовании / Е. В. Миренкова // Ценности и смыслы. – 2021. – № 1 (71). – С. 115–130.
3. Файзуллина, С. Роль рабочего листа в управлении учением / С. Файзуллина // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2019. – № 6–7 (50). – С. 94–96.

Schoolchildren learn the school curriculum differently during the learning process. Some are more inclined to subjects of the humanities profile, while others find exact disciplines easier. At the present stage, one of the main educational tasks solved by the school is teaching students to work with various sources of information, developing the functional literacy of students. The use of worksheets in the lesson can improve the process of assimilation of information.

Козельский Константин Николаевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, kostakozelskij@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, г. Гродно, Республика Беларусь, zharnova_olga@grsu.by.

Научный руководитель – *Крупская Татьяна Константиновна*, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь.

УДК 004.42

Н. В. СЛИЗЕНКО

АВТОМАТИЗАЦИЯ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА ПО ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ С ПОМОЩЬЮ ЧАТ-БОТА TELEGRAM

Описана разработка Telegram-бота для изучения электродинамики. Бот предоставляет пользователям структурированные теоретические материалы, формулы и тесты для самопроверки знаний, что способствует лучшему усвоению учебного материала. Разработка выполнена с использованием языка программирования Python, базы данных SQLite и библиотеки TeleBot. Проведенное тестирование подтвердило эффективность чат-бота в образовательных целях, демонстрируя его полезность для изучения физики. Инструмент обладает потенциалом для расширения на другие разделы физики, такие как механика, оптика и термодинамика, и может быть адаптирован под индивидуальные потребности пользователей, предлагая персонализированный образовательный опыт.

В современном мире интернет стал не только средством развлечений, но и мощным инструментом для обучения. Развитие сетевых технологий позволяет пользователям получать доступ к знаниям через различные платформы, включая мессенджеры и чат-ботов. Telegram, будучи одной из самых популярных платформ для общения, предлагает уникальные возможности для создания чат-ботов, способных автоматизировать учебные процессы, предоставлять образовательные материалы и помогать пользователям усваивать новые знания.

Изучение электродинамики – важная составляющая физики, однако сложность темы и большое количество формул часто вызывают трудности у учащихся. Создание Telegram-бота для изучения электродинамики может существенно облегчить этот процесс, предлагая структурированные теоретические материалы и автоматизированные тесты. Это решение особенно актуально, поскольку на данный момент специализированных решений в формате чат-бота для изучения электродинамики практически не существует.

Основной целью данной работы является разработка и внедрение Telegram-бота, который предоставляет пользователям структурированную информацию по электродинамике, помогает освоить основные концепции, решать задачи и проходить тестирование знаний в интерактивной форме. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: анализ существующих методов и инструментов для автоматизации процесса обучения через мессенджеры, разработка структуры и алгоритмов работы Telegram-бота для изучения электродинамики.

намики, реализация бота с теоретическими материалами и вариантами тестовых задач, а также проведение тестирования функционала бота и анализ его эффективности.

Чат-бот – это компьютерная программа, которая имитирует человеческое общение и позволяет взаимодействовать с цифровыми устройствами так, как если бы они были живыми людьми. В современном мире чат-боты находят широкое применение во многих сферах, включая обслуживание клиентов, автоматизацию рабочих процессов и образование. Они позволяют быстро получать ответы на вопросы, оформлять заказы, записываться на прием и многое другое. Особенно важно их использование в образовательных целях, где они могут помочь студентам и школьникам получать дополнительную информацию о предметах, учебных материалах или заданиях.

Telegram – одна из наиболее популярных платформ для создания чат-ботов. Этот мессенджер доступен как на мобильных устройствах, так и на компьютерах, что делает его универсальным инструментом для общения и взаимодействия. Telegram предлагает широкие возможности для создания каналов, групповых чатов, обмена медиафайлами и голосовыми сообщениями. Благодаря удобному API и простой интеграции с различными сервисами, Telegram становится идеальной платформой для разработки образовательных ботов.

Чат-бот, созданный для повторения и изучения учебного материала по физике в разделе «Электродинамика», представляет собой структурированную систему, состоящую из нескольких ключевых разделов. Каждый компонент бота выполняет конкретные функции, направленные на обеспечение удобства взаимодействия пользователя с программой.

Главное меню служит отправной точкой для пользователей, предоставляя им выбор между основными функциями: теоретическими материалами, формулами и тестами. Через главное меню можно легко переключаться между различными разделами бота, что делает навигацию интуитивно понятной и простой. Главная задача этого раздела – обеспечить быстрый доступ к нужному контенту и упростить процесс обучения.

Раздел теоретических материалов содержит подробные описания ключевых тем по физике, таких как электростатика, постоянный электрический ток, магнитное поле и другие, соответствующие учебной программе. В этом разделе пользователи могут не только ознакомиться с основными концепциями, но и увидеть их визуальное представление через схемы, графики и примеры. Такая подача информации позволяет глубже понять сложные физические явления и адаптировать учебный материал под свой уровень подготовки.

Раздел формул представляет собой сборник важнейших математических выражений, необходимых для решения задач и освоения теории в области электричества. Здесь можно найти формулы, связанные с законами Ома, Кирхгофа, емкостью, сопротивлением и другими фундаментальными понятиями. Данный раздел помогает пользователям эффективно запоминать формулы и использовать их на практике при решении различных задач.

Тестовый блок предназначен для проверки уровня знаний пользователя. Он предлагает пройти серию тестов по различным темам, таким как электростатика, постоянный электрический ток и магнитное поле. Тесты могут включать как вопросы с несколькими вариантами ответов, так и задания с открытым ответом. После завершения тестирования бот анализирует результаты и предоставляет обратную связь, указывая на сильные и слабые стороны пользователя. Это позволяет выявить пробелы в знаниях и сосредоточиться на их устранении. Более того, тесты служат не только средством оценки, но и активным инструментом для повторения материала.

Таким образом, разработанный чат-бот предлагает комплексный подход к обучению, объединяя теоретические материалы, справочные данные и интерактивные тесты в одном месте. Это делает процесс обучения более удобным, эффективным и доступным для широкой аудитории.

Пользователь начинает взаимодействие с ботом с команды /start, после чего попадает в главное меню, где может выбрать между теоретическими материалами и тестами. Все взаимодействие организовано через кнопки, которые выполняют соответствующие действия: «Теория», «Формулы» и «Тесты». Каждый раздел теории или формул включает кнопки для перехода к следующей теме или возвращения назад. Также предусмотрены кнопки для возврата в меню разделов или к содержанию. Пример работы представлен на рисунке 1.

Для хранения теоретического материала и тестов используется база данных SQLite3. База данных включает несколько таблиц: 'constant_current', 'electrical_toque_in_media', 'electrostatics', 'formulas', 'magnetic_field', 'questions' и 'tests'. Эти таблицы обеспечивают структурированный доступ к учебным материалам, формулам и тестовым заданиям, что делает систему удобной для пользователей, желающих изучить или повторить основные темы электродинамики.

Чат-бот выполняет запросы к базе данных для получения материалов и тестов, а затем отправляет их пользователю в соответствующем формате. Например, при выборе раздела «Электростатика» бот извлекает данные из таблицы 'electrostatics' и отображает их в чате. Раздел с формулами позволяет просматривать формулы с описаниями и изображениями. Тестовый блок предлагает пройти тест из 10 вопросов, выбираемых случайным образом из базы данных. По завершении теста отчет с результатами, включая список правильных и неправильных ответов.

Основой реализации послужили язык программирования Python, база данных SQLite и библиотека TeleBot для работы с Telegram API. Чат-бот разделён на функциональные блоки: подключение к базе данных и её ис-

пользование для хранения и извлечения информации, подключение токена и настройка взаимодействия с Telegram, реализация разделов теоретических материалов, формул и тестов для проверки знаний, а также навигация и управление через встроенные кнопки (inlinekeyboard).



Рисунок 1 – Принцип работы бота

Структура кода бота организована так, чтобы каждая функция отвечала за конкретный аспект работы. Например, для отображения главного меню с кнопками для выбора теоретических материалов и тестов используется специальная функция 'main_menu_buttons'. Эта функция генерирует кнопки, которые дают пользователю возможность выбрать нужный раздел.

Теоретический раздел предоставляет доступ к описаниям, законам и ключевым концепциям электродинамики. Например, пользователь может выбрать тему, связанную с «Магнитным полем», после чего бот извлекает данные из таблицы 'magnetic_field' и отображает их в чате. Раздел с формулами реализован на основе таблиц 'formulas' и 'formulas_to_show'. Пользователь может выбрать тему, чтобы просмотреть формулы с описаниями и изображениями. Навигация осуществляется через inline-кнопки, генерируемые динамически.

Тестовый блок позволяет пользователю пройти тест из 10 вопросов, выбираемых случайным образом из базы данных. По завершении теста отчет с результатами, включая список правильных и неправильных ответов. Алгоритм проверки сравнивает выбранные пользователем варианты с правильными ответами из базы данных и выдает результаты в виде сообщения с эмодзи: ✅ для верных ответов и ❌ для неверных.

В ходе выполнения работы была достигнута цель разработки Telegram-бота для изучения раздела физики – электродинамики. Бот предоставляет пользователям структурированную теоретическую информацию, помогает осваивать ключевые концепции и проверять свои знания через различные тесты. Проведенный анализ показал, что чат-боты обладают высоким потенциалом для образовательных целей, предоставляя удобный доступ к учебным материалам, автоматизируя процесс проверки знаний и делая обучение более доступным и увлекательным.

Созданный бот охватывает основные темы раздела «Электродинамика», включая теорию, формулы и задачи, что позволяет пользователям систематизировать свои знания и эффективно готовиться к экзаменам. Проведенное тестирование подтвердило удобство интерфейса, стабильность работы и актуальность использования бота как инструмента обучения.

Перспективы дальнейших разработок включают расширение функционала бота для других разделов физики, внедрение системы адаптивного обучения, добавление поддержки мультимедийных материалов и реализацию функции ведения статистики для отслеживания прогресса пользователя. Таким образом, разработанный Telegram-бот является инновационным инструментом для изучения электродинамики, который не только облегчает процесс освоения материала, но и способствует популяризации науки среди широкой аудитории.

Список литературы

1. Чат-боты как элемент управления системой [Электронный ресурс] // КиберЛенинка. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/chat-boty-kak-element-upravleniya-sistemoy/viewer>. – Дата доступа: 17.11.2024.
2. Чат-бот: функционал, преимущества и применение в работе // ELMA365 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://service.elma365.com./articles/chat-bot-funkcional-preimushchestva-i-primenenie-v-rabote/?utm_source. – Дата доступа: 17.11.2024.
3. BotAPILibraryExamples [Электронный ресурс] // GitHub. – Режим доступа: <https://github.com/python-telegram-bot/python-telegram-bot>. – Дата доступа: 11.11.2024.
4. Веряев, А. А. Чат-боты как средство повышения интерактивности учебных занятий / А. А. Веряев, Ю. Э. Лозыченко // Информационно-коммуникационные технологии в педагогическом образовании. – 2022. – № 5. – С. 3–9.

This article presents the development of an educational Telegram bot designed for studying electrodynamics, providing users with structured theoretical materials, formulas, and interactive tests. Built using Python and SQLite, the bot leverages Telegram's API to deliver engaging learning experiences through a user – friendly interface. The study highlights its effectiveness in simplifying complex physics concepts and improving accessibility to educational content, with potential for expansion into other scientific areas. Results confirm the bot's practical value and its role in enhancing modern educational tools.

Слизенко Назар Валентинович, студент 4 курса физико-технического факультета (специальность «Компьютерная физика») Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, nazarslizenko68@gmail.com.

Научный руководитель – *Ситкевич Анастасия Леонидовна*, магистр физико-математических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, girl-physicist@mail.ru.

УДК 004.42

Е. В. СОБОЛЕВСКАЯ

ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ: ОБЗОР И АНАЛИЗ ДЛЯ ИГРЫ ПО ФИЗИКЕ

Рассматриваются современные технологии разработки образовательных приложений, ориентированных на обучение физике. Проведен анализ интерактивных симуляций, образовательных игр и виртуальных лабораторий, позволяющих учащимся глубже осваивать материал через практическое взаимодействие и мгновенную обратную связь. Особое внимание уделяется выбору технологического стека, включающего FastAPI, React, PostgreSQL и Aiogram, для создания эффективных и масштабируемых решений. Обсуждаются ключевые принципы интеграции теории, практики и тестирования в единый интерактивный интерфейс, а также применение DevOps-методов для обеспечения стабильности и гибкости системы. Перспективы дальнейших исследований связаны с внедрением искусственного интеллекта и адаптивных систем обучения, что способствует персонализации образовательного процесса.

Современные образовательные технологии, такие как интерактивные симуляции (например, PhET Interactive Simulations), образовательные игры (например, Kerbal Space Program) и виртуальные лаборатории (например, Labster), становятся неотъемлемой частью образовательного процесса, позволяя значительно улучшить усвоение материала и повысить мотивацию студентов. Эти технологии обеспечивают возможность учащимся на практике взаимодействовать с физическими явлениями, проводить эксперименты в безопасной виртуальной среде и получать мгновенную обратную связь [1; 2].

Кроме того, использование таких современных технологий, как FastAPI, React и PostgreSQL, улучшает не только эффективность самих образовательных приложений, но и их быстродействие, что критически важно для создания масштабируемых и высококачественных образовательных инструментов [3; 4]. В данной статье проводится анализ существующих образовательных приложений, выбор технологического стека для разработки игры по физике, а также рассматриваются аспекты развертывания и применения практик DevOps в контексте разработки образовательных приложений.

Технологии разработки образовательных приложений постоянно эволюционируют, что связано с ростом популярности цифровых платформ и мобильных устройств. В последние годы важно понимать, как технологии могут улучшить учебный процесс. На рисунке 1 представлена схема использования современных технологий в образовательных приложениях.

Физика – это область знаний, в которой требуется не только теоретическое понимание, но и умение решать задачи. Для эффективного обучения физике образовательные приложения должны быть ориентированы на:

- Теоретическое обучение: приложения должны предлагать материалы, объясняющие основные физические законы, включая текстовые материалы, видео уроки и анимации.

• Интерактивные задачи: в физике важно, чтобы ученик не только читал о законах природы, но и практиковался в их применении. Задачи с пошаговыми решениями позволяют глубже понять материал и развить навыки решения проблем.

• Геймификация: приложения должны быть увлекательными. Включение игровых элементов, таких как миссии, награды и бонусы, помогает удерживать интерес пользователей [5].

Проект предполагает использование всех этих элементов, что способствует созданию сбалансированного образовательного опыта. Важной задачей является интеграция теории, практики и тестирования в одном интерактивном интерфейсе, представленный на рисунке 2.

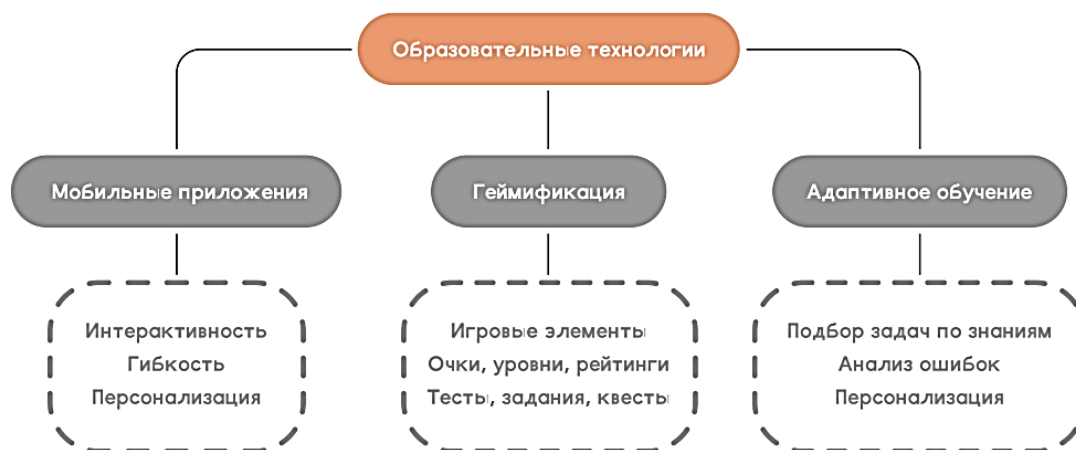


Рисунок 1 – Современные технологии в образовательных приложениях

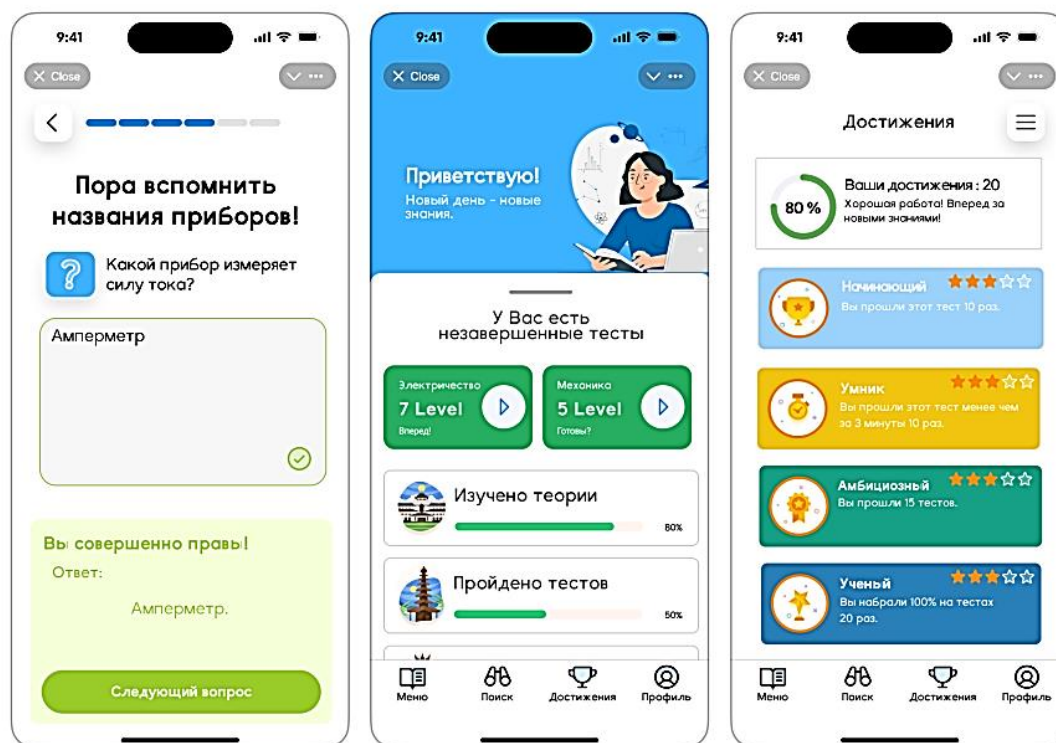


Рисунок 2 – Интерфейс Telegram Mini App

Для бэкенда было выбрано сочетание Python, FastAPI и Aiogram по ряду причин:

• Python – это один из самых популярных языков для образовательных приложений. Он предоставляет широкий набор библиотек для работы с математическими расчетами, симуляциями и научными вычислениями, таких как NumPy, SciPy и SymPy. Для бэкенд-разработки Python является отличным выбором из-за своей простоты, гибкости и огромного количества готовых решений [1].

• FastAPI – это современный фреймворк для создания быстрых веб-приложений и API. Он обладает асинхронной обработкой запросов, что позволяет эффективно масштабировать приложение при увеличении нагрузки. FastAPI предоставляет удобные средства для валидации данных через Pydantic, что особенно важно для образовательных приложений, работающих с динамичными данными [3].

• Aiogram – это библиотека для создания чат-ботов в Telegram, которая будет использоваться для взаимодействия с пользователями. Aiogram позволяет легко интегрировать бота с внешними API и реализовать интерактивное взаимодействие с пользователями.

Основной код бэкенда находится в файле main.py. Он объединяет FastAPI для работы с API и Aiogram для обработки сообщений от пользователей:

```
import logging
import sys
import os
import threading
from flask import Flask, render_template
from telegram import Update, InlineKeyboardButton, InlineKeyboardMarkup, WebAppInfo
from telegram.ext import Application, CommandHandler, CallbackContext
from dotenv import load_dotenv

logging.basicConfig(
    stream = sys.stdout,
    format = '%(asctime)s - %(name)s - %(levelname)s - %(message)s',
    level = logging.INFO
)
logger = logging.getLogger(__name__)

load_dotenv()
TOKEN = os.getenv('BOT_TOKEN')
MINI_APP_URL = «https://2d6d10a66c7ef6b3617dcbc78be7c944.serveo.net/»

app = Flask(__name__, template_folder = «templates»)

@app.route('/')
def home():
    return render_template(«index.html»)

def run_flask():
    logger.info(«Запускаем Flask – сервер. . .»)
    app.run(host = '0. 0. 0', port = 5000, debug = False)

async def start(update: Update, context: CallbackContext):
    user_name = update.message.from_user.first_name
    welcome_message = (
        f»👋Приветствую тебя, {user_name}!\n\n»
        «Добро пожаловать в Physics Quest – увлекательное мини-приложение для изучения физики!\n\n»
        «Здесь ты сможешь шаг за шагом осваивать законы природы, проходя уровни от простого к сложному. 📈\n\n»
        «🔍Решай интересные задачи\n\n»
        «🧪Проходи интерактивные тесты\n\n»
        «💰Зарабатывай очки и открывай новые уровни\n\n»
        «Готов отправиться в мир науки? Тогда вперед – к открытиям! 🚀🌟\n\n»
    )
    keyboard = [
        [InlineKeyboardButton(«Начать», web_app = WebAppInfo(url = MINI_APP_URL))]
    ]
    reply_markup = InlineKeyboardMarkup(keyboard)
    await update.message.reply_text(welcome_message, reply_markup = reply_markup)

def run_telegram_bot():
    application = Application.builder().token(TOKEN).build()
    application.add_handler(CommandHandler(«start», start))

    logger.info(«Запускаем Telegram – бота. . .»)
    application.run_polling(allowed_updates = Update.ALL_TYPES)

if __name__ == '__main__':
```

```
threading.Thread(target = run_flask, daemon = True).start()
run_telegram_bot()
```

Разработка образовательных приложений требует использования различных технологий, которые обеспечат как качественный учебный процесс, так и стабильную работу приложения. Выбор технологий Python, FastAPI, Aiogram и React позволяет эффективно решать задачи, связанные с обработкой данных, созданием интерактивных интерфейсов и геймификацией. Внедрение методов DevOps и CI/CD ускоряет процесс разработки и повышения качества. Мониторинг приложения после его развертывания обеспечит его бесперебойную работу и высокую доступность для пользователей.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением функционала приложений, включая использование искусственного интеллекта для персонализированного обучения и адаптивных систем, что обеспечит ещё более эффективное обучение в будущем.

Список литературы

1. 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.
2. Климович, Е. В. Развитие геймификации образования в процессе реализации программ высшего и дополнительного образования / Е. В. Климович // Современное педагогическое образование. – 2021. – № 8. – С. 78.
3. Горизонт, Д. М. Как преподаватели вузов воспринимают цифровую трансформацию высшего образования / Д. М. Горизонт, О. Б. Солодовникова, А. А. Игнатова // Вопросы образования. – 2022. – № 1. – С. 89.
4. Цветкова, А. В. Использование технологий геймификации при формировании профессиональных навыков будущего специалиста на уроках иностранного языка в вузе / А. В. Цветкова // МНКО. – 2022. – № 1 (92). – С. 95.
5. Проценко, С. Г. Геймификация профессионального образования: стоит ли игра свеч? / С. Г. Проценко // Профессиональное образование и рынок труда. – 2021. – № 4. – С. 132.

The article examines modern technologies for developing educational applications focused on physics learning. It analyzes interactive simulations, educational games, and virtual laboratories that enable students to deepen their understanding through hands-on interaction and instant feedback. Special attention is given to the choice of a technology stack, including FastAPI, React, PostgreSQL, and Aiogram, to create efficient and scalable solutions. Key principles of integrating theory, practice, and testing into a unified interactive interface are discussed, along with the application of DevOps methods to ensure system stability and flexibility. Future research perspectives involve the implementation of artificial intelligence and adaptive learning systems to enhance the personalization of the educational process.

Соболевская Екатерина Викторовна, студент 3 курса физико-технического факультета (специальность «Компьютерная физика») Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, sobolll.ekk@gmail.com.

Научный руководитель – *Ситкевич Анастасия Леонидовна*, магистр физико-математических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, girl-physicist@mail.ru

УДК 004.4

Я. В. ЯНУШЕВИЧ

ДЕСКТОПНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ УЧАЩИХСЯ СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ НА ПОНИМАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Описано десктопное приложение, разработанное для проведения тестирования учащихся средних школ и оценивания их знаний о механических явлениях, обоснован выбор языка программирования и структура основного окна приложения и элементов управления.

Автоматизация системы оценивания результатов учебной деятельности предполагает, прежде всего, создание программного продукта, который выполнял бы автоматическое вычисление оценки по заданным критериям. Для модернизации тестирования необходимо понимать, что конкретно надо улучшить в процессе тестирования. Это может быть улучшение самого теста, улучшение методики тестирования и создание средств, которые будут помогать быстрее проводить тестирование и получать результаты.

Для оценивания понимания механических явлений учащимися средней школы было разработано десктопное приложение, позволяющее ускорить процесс прохождения тестирования. Для создания приложения была выбрана среда Visual Studio от Microsoft, язык программирования был выбран C#, платформа .NET 7.0 тип проекта Windows Forms. Данный тип приложения и язык программирования были выбраны в связи с тем, что они довольно просты для освоения и каждый, кто захочет доработать приложение, сможет внести изменения в программу собственноручно и без значительных проблем с освоением языка программирования. В подобных типах

проекта довольно комфортно создавать программы, так как присутствует конструктор «формы», который позволяет размещать компоненты по всей форме.

Первоначальной задачей было определиться с расположением и назначением всех компонентов для реализации поставленной задачи. В приложении имеются 3 кнопки управления. Первая отвечает за начало теста. Пока кнопка «Начать» активна, кнопки «Следующий вопрос» и «Результаты» заблокированы. Это необходимо для того, чтобы пользователь не мог их использовать не по назначению. За создание кнопок отвечал элемент «Button», имеющий свои методы. При нажатии кнопки «Начать» запускается тест (при этом кнопка «Начать» становится неактивной, а кнопка «Следующий вопрос» активируется) и отображается обратный счет времени (рисунок 1).

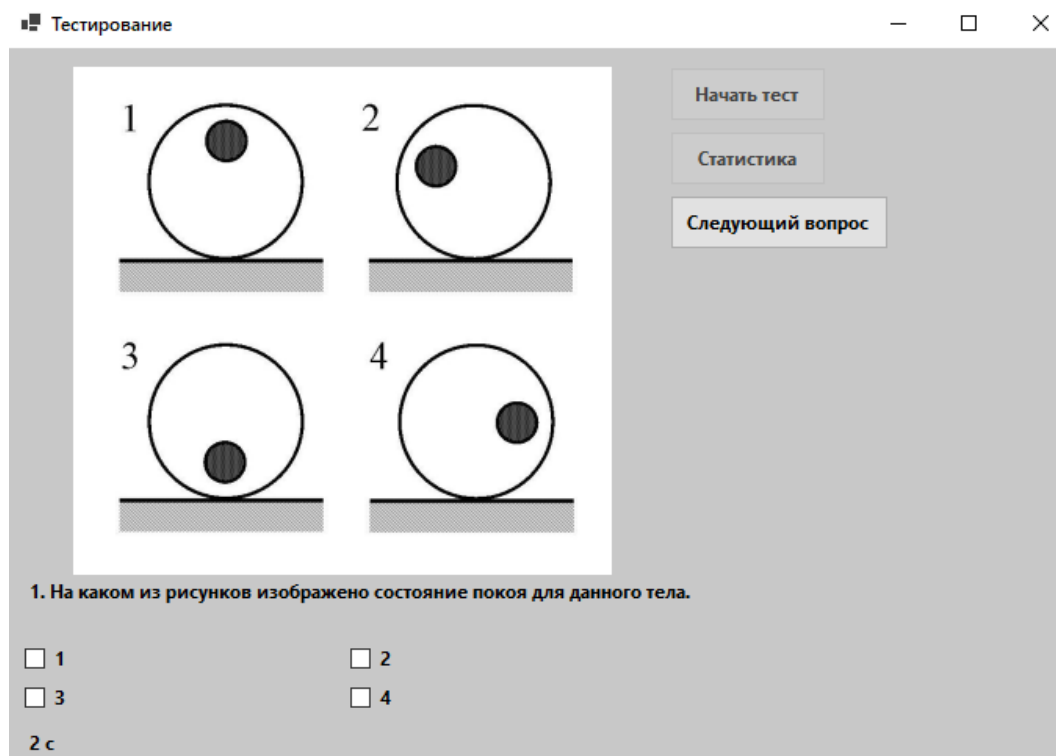


Рисунок 1 – Внешний вид главного окна десктопного приложения

После начала теста в окне появляются картинки с заданием, вопросы и варианты ответа. Для уменьшения затрачиваемой памяти компьютера варианты ответов на вопросы занесены в массив так же, как и сами вопросы. Картинки с заданиями в свою очередь внесены в ресурсы проекта. Все ответы пользователя вносятся в массив типа «bool» и в зависимости от правильности ответа в массив передаётся значение «true» или «false».

Смена вопросов проводится при помощи оператора ветвления «switch – case». Это позволяет помимо зарезервированных вариантов из массива выводить и индивидуальные варианты, которые не повторяются. В «case» присутствует оператор ветвления «if», который отвечает за заполнение массива с ответами пользователя.

Ответы пользователя вносятся при помощи элемента «Check Box». В зависимости от вариантов ответа на поставленный вопрос становятся активными необходимое количество данных элементов. Данный элемент возвращает значение «true» если элемент выбран и «false» – если нет. Программа обрабатывает только тот «Check Box» которые отвечает за правильный вариант ответа.

Всё то время, которое идет с начала теста, элемент «Timer» считает количество секунд, пройденных с начала теста. Это необходимо для понимания того, как быстро тестируемый справляется с заданием.

После прохождения теста кнопка «Результаты» становится активной, и пользователь может посмотреть правильность своих ответов. По нажатию данной кнопки появляется вторая «Форма», в которой пользователю показываются результаты.

Список литературы

1. Документация по языку C# [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/csharp>. – Дата доступа: 22.10.2024.
2. Язык программирования C# и .NET [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://metanit.com/sharp/general.php>. – Дата доступа: 22.10.2024.

A desktop application developed for teaching high school students and studying their knowledge of mechanical phenomena is described, and the choice of programming language and the structure of basic window applications and controls is substantiated.

Янушевич Ян Владимирович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, yan.yanushevich@gmail.com.

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

УДК 37.013

Я. В. ЯНУШЕВИЧ

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПОНИМАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ У УЧАЩИХСЯ СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

Рассматриваются необходимость проведения тестирования среди учащихся средних школ для определения уровня понимания механических явлений. Описан разработанный тест для проведения тестирования и оценки уровня знаний учащихся, представлены обобщенные результаты после проведения тестирования.

Пространственное мышление представляет собой вид умственной деятельности, которая отвечает за создание пространственных образов, способность мысленно перемещать их, трансформировать, компоновать различными способами. Именно пространственное мышление способствует тому, как человек будет понимать и воспринимать различные механические системы. Оценка уровня понимания механических явлений у учащихся, а в свою очередь и оценка их пространственного мышления даст хорошее подспорье в дальнейшем будущем тестируемого. Это связано с тем, что у людей с развитым пространственным мышлением более развито механистическое понимание мира. Они способны представлять разные механизмы и физические процессы, и тем самым предсказывать возможный исход того или иного процесса.

Для оценки уровня понимания учащимися механических явлений разработан тест, содержащий 20 вопросов с примерами механических систем и явлений. Тест содержит задания, в которых необходимо определить, например, траекторию, по которой будет перемещаться тело при заданных условиях, либо определить, в какую сторону будет перемещаться или вращаться некоторое физическое тело под действием заданной системы сил.

Тестирование проводилось на базе средней школы с учащимися 7–11 классов. Выборка тестируемых составила 100 человек, по 20 человек из каждого класса. Для прохождения теста отводилось 10 минут. Данное решение было обусловлено тем, что для дачи ответа не требовалось вычисления каких-либо формул, только умение представить, что происходит в данной механической ситуации. Предполагалось то, что для ответа тестируемому необходимо приблизительно 30 секунд.

Результаты тестирования приведены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Распределение правильных ответов по классам

Из графика видно, что с возрастанием класса среднее значение правильных ответов растёт. Однако было установлено, что вне зависимости от класса присутствуют учащиеся, которые лучше понимают протекание тех или иных процессов. Вероятно, они более склонны к естественным наукам. Следует отметить, что результаты выполнения теста коррелируют с оценками учащихся по физике и математике. При этом выяснено, что практически все учащиеся, которые получили высокие баллы по тесту, планируют поступать в вузы по техническим профилям или же по направлениям, связанным с преподаванием физики и математики.

Подобного рода тестирование поможет и учителям в школах и самим учащимся. Учителям будет проще определить тех, кто более склонен к точным наукам и начать готовить данных учащихся к олимпиадам и конкурсам, а ученикам позволит понять, на сколько они сами склонны к физике и математике и уже в дальнейшем определиться, куда им лучше поступать.

Список литературы

1. Авасенов, В. С. Композиция тестовых заданий : учеб. книга для преподавателей вузов, учителей школ, аспирантов и студентов педвузов / В. С. Авасенов. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Адепт, 1998. – 217 с.
2. Семеновская, С. А. Основы тестологии : учеб. пособие / С. А. Семеновская. – Саратов, 2015. – 57 с.
3. Методика преподавания физики в 8–10 классах средней школы. Ч. 1 / под ред. В. П. Орехова, А. В. Усовой. – М. : Просвещение, 2020. – 256 с.

The necessity of testing secondary school students to determine the level of understanding of mechanical phenomena is considered. The developed test for testing and assessing the level of knowledge of students is described, and the generalized results after testing are presented.

Янушевич Ян Владимирович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь, yan.yanushevich@gmail.com.

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