УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ГРОДНЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ЯНКИ КУПАЛЫ»
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Научное электронное издание

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Материалы
XXVII международной
научно-практической конференции
аспирантов, магистрантов и студентов

(Гродно, 18 апреля 2019 г.)

Гродно
ГрГУ им. Я. Купалы
2019

УДК 538.9
ББК 22.3
Ф50

Редакционная коллегия:

А. Е. Герман (гл. ред.), *В. А. Лиопо*, *А. В. Никитин*,
С. С. Ануфрик, *Н. Д. Стрекаль*, *А. А. Маскевич*

Издаётся в авторской редакции
Ответственный за выпуск: *А. В. Лавыш*
Компьютерная вёрстка: *Н. П. Уласевич*
Дизайн упаковки: *А. Е. Герман*
Техническое редактирование: *М. В. Вахмянина*, *А. И. Соболева*

Ф50 **Физика** конденсированного состояния [Электрон. ресурс] : материалы XXVII междунар. науч.-практ. конф. аспир., магистр. и студ. (Гродно, 18 апр. 2019 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы, физ.-техн. фак. ; редкол.: А. Е. Герман (гл. ред.) [и др.]. – Объём электрон. дан. 47,5 Мбайт. – 30,0 уч.-изд. л. – Гродно : ГрГУ, 2019. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Тираж 120 экз. – Заказ 025.

ISBN 978-985-582-263-0

Содержатся доклады, в которых 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 22.3

Издатель и изготовитель:
Учреждение образования
«Гродненский государственный университет имени Янки Купалы».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/261 от 02.04.2014.
Ул. Ожешко, д. 22, 230023, Гродно,
Республика Беларусь; www.grsu.by

ISBN 978-985-582-263-0

© Учреждение образования
«Гродненский государственный университет
имени Янки Купалы», 2019

СЕКЦИЯ 1.
ИЗУЧЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 541.15

HASANIEN A. ALSHARIF

SURFACE MORPHOLOGY OF NICKEL COMPOSITE COATINGS FORMED UNDER THE EFFECT OF UV- AND X-RAYS RADIATION

The work presents the results of investigation of surface morphology of protective composite nickel layers with SiO_2 nanopowder (7–15 nm) electrodeposited under energy effects. The electrodeposition was being proceeded in the X-rays field (P_{eks} = 10^5 R/h) and in the UV-field (207 nm). It is obtained the energy irradiation promotes to formation Ni composite coatings with improved a surface morphology due to radiolysis inside an electrolyte.

Over the past years considerable researches have been devoted either experimental or theoretical in the electrodepositing protective coatings. Composite nickel coatings are generally have many application for decorative and protection by improving corrosion and resistance [1]. The many current applications of nickel electroplating are the result of developments and improvements that have been made almost since the day the process was discovered [2]. This is evident that important to develop new methods for coating nickel layers with unique properties for functional applications.

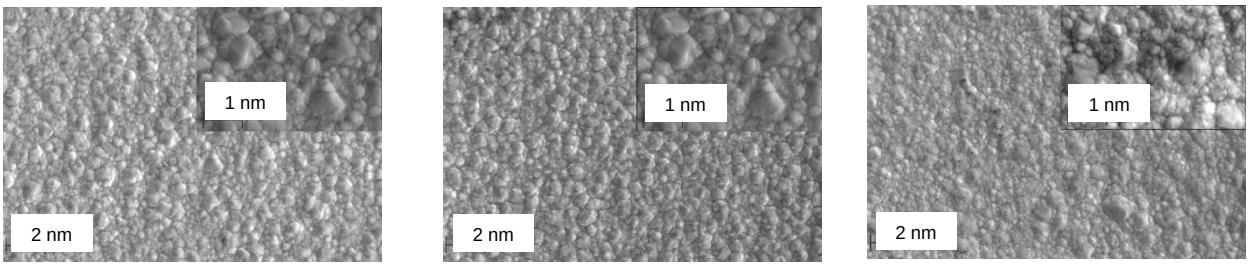
Previous investigations [2–3] have marked differences in the structure and properties of protective coatings based on the Zn and magnetic coatings based on the cobalt had been formed in the X-rays. The effect of any radiation sets in interaction between radiation and the molecules. The basic advantage of this process is the change of the physical conditions of metal deposition by means of radiolysis of the irradiated electrolyte [3; 4].

There have been two different types of interactions either direct effect which observed in the same molecule where the primary absorption occurred or indirect effect in which the radiation energy has been absorbed in another molecule (solvent) resulting in the formation of reactive products that subsequently reacted with other molecules in the system.

The aim of this study is searching a new opportunities for creating protective layers by electrolytic deposition of composite coatings under the effect of X-rays and UV-rays during electrodeposition and investigating the features of it structure and physical properties.

Coatings were deposited for 1 hour at current of 42 mA from nickel electrolyte with SiO_2 nanopowder (7–15 nm). in the X-rays field (P_{eks} = 105 R/h) at constant temperature, equaled 26 °C. For comparison another coatings were deposited in the UV-rays field. To estimate structural variations it was compared the coatings obtained under irradiation the field and not involving it (reference samples). The surface morphology of the coatings were examined by scanning electron microscopy (SEM) on a LEO 1455VP and on the X-MaxN OXFORD INSTRUMENTS microanalyzer.

Figure 1–2 show the relief of the surface of coatings formed in the X-ray and UV-radiation. Compare with the reference coatings (figure 1(1)) it is evident that the irradiated samples (figure 1(2) and figure 1(3)) have less rough surface geometry. Moreover it is visibly the small grain size with respect of reference coatings.

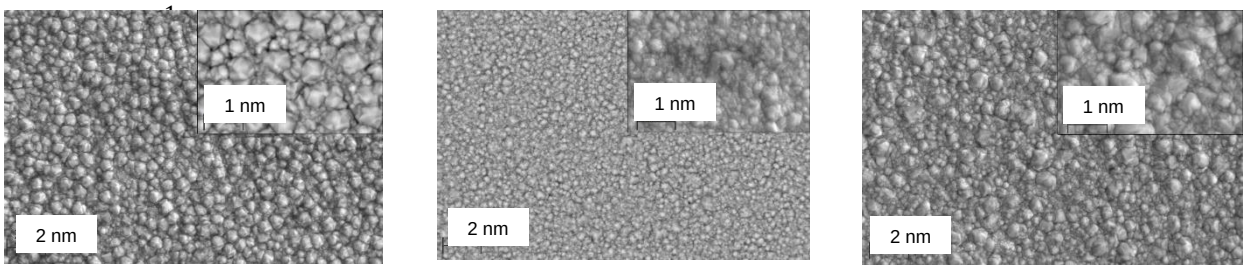


1 2 3

1 – reference samples obtained; 2 – irradiated by X-rays; 3 – irradiated by UV-rays

Figure 1 – Surface morphology of nickel coatings

The similar situation observes for coatings are deposited from electrolyte with nanopowder (figure 2).



1 2 3

1 – reference samples obtained; 2 – irradiated by X-rays; 3 – irradiated by UV-rays

Figure 2 – Surface morphology of composite Ni coatings

So, we have demonstrated that composite coatings are formed by the electrochemical method involving exposure by X-rays and UV-radiation characterized by more perfectly morphology surface with more smooth and less rough surface geometry than reference coatings. The observed variations on the morphology of irradiated samples explain with destruction of the primary structure of electrolyte as a result of radiolysis transformations taking place in solutions in the radiation field.

References

1. Di Bari, G. A. Electrodeposition of Nickel / G. A. Di Bari // Modern Electroplating / eds. M. Schlesinger and M. Paunovic. – 5th ed. – New Jersey : JohnWiley and Sons Inc., 2010. – P. 79–114.

2. Electrodeposition of composite coatings with SiO_2 nanopowder in the X-rays / N. Valko [et al.] // Nanomaterials : Applications. – 2017. – Vol. 2. – P. 247.

3. Валько, Н. Г. Влияние рентгеновского излучения на коэффициент поверхностного натяжения электролитов для осаждения композиционных покрытий $ZnNi/SiO_2$ / Н. Г. Валько // New Technologies and Achievements in Metallurgy, Material Engineering, Production Engineering and Physics : a collective monograph. – Czenstochowa : [Б. и.], 2017. – С. 500–503.

4. Valko, N. Electrical and magnetic properties of cobalt alloys electrodeposited in the X-rays irradiation / N. G. Valko. V. G. Hurtavy // Xth International Conference «New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation» NEET 2017, June 25–30 2017 in Zakopane (Poland). – 2017. – P. 11.

В работе представлены результаты исследования морфологии поверхности композиционных покрытий на основе никеля с наночастицами SiO_2 (7–15 nm), осажденными при воздействии рентгеновского ($P_{eks} = 10^5$ R/h) и ультрафиолетового излучения (207 nm). Установлено, что морфология поверхности композиционных покрытий на основе никеля, сформированных при энергетическом воздействии, менее развита.

Хасаниен Аль Шариф, магистрант факультета инновационных технологий машиностроения Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, hasanien9112@gmail.com.

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

УДК 533.9.082.5;543.423;621.373.826

В. А. АКУЛИЧ, А. С. РЯБЦЕВА, М. П. ПАТАПОВИЧ

РОЛЬ ОБЪЁМНО-СТРУКТУРИРОВАННЫХ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ В ПОВЫШЕНИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная многоканальная спектрометрия дает возможность зарегистрировать локальное распределение эссенциальных элементов при абляции высохших капель биологических жидкостей и стандартных образцов. Разработанные методики и стандартные образцы позволяют провести оценки локального пространственного и общего содержания микроэлементов в высушенных каплях биологических жидкостей.

Для интегрального определения содержания элементов в жидких биообразцах исследуется зависимость между интенсивностью спектральных линий и концентрацией элемента, которые адекватны реальным. При этом химический и фазовый состав стандартов должен соответствовать составу проб; интервал концентраций определяемых элементов в стандартах должен быть шире, чем в реальных пробах; технология изготовления,

размер, физико-химические свойства стандартов и анализируемых проб должны быть по мере возможности одинаковы [1].

Следует отметить, что основной причиной, которая ограничивает широкое использование метода лазерной искровой спектрометрии для прямого анализа жидкостей, является невысокая чувствительность. Это делает затруднительным определение концентраций, близких к предельно допустимым. Кроме того, к факторам, обуславливающим собственную нестабильность плазмы, добавляется случайный характер развития механизма лазерного пробоя [2]. Проблемы нестабильности плазмы в случае воздействия лазерного излучения на жидкость стоит более остро, чем для дугового и искрового разряда. Это также оказывает влияние на характеристики градуировочных графиков.

Любые, даже самые малые, отклонения могут привести к существенным различиям на градуировочном графике, а значит, исказить результаты. Стандартные образцы для спектрального анализа должны быть адекватны не только по химическому составу, так и по физическим свойствам. В нашем случае соответствием физическим свойствам нужно считать равенство диаметра высохшей капли образца и стандарта при нанесении одинакового объем жидкости. Также отмечается, что наиболее выгодные спектральные характеристики при анализе сухих остатков биологических субстратов получаются при возбуждении элементов сдвоенными лазерными импульсами с поверхности и объема пористых тел.

Для создания модельных образцов и интегральной оценки содержания элементов в анализируемых биообъектах пробу наносили на пористую поверхность. Использовали беззольные фильтры нескольких типов, различающиеся плотностью и размером пор (черная, синяя, белая лента с диаметром пор 10, 3 и 1–2,5 нм, соответственно). Таким же образом исследовали и пространственное распределение макро- и микроэлементов в образцах [1]. Образец определенного размера наклеивали с помощью двухстороннего скотча на поверхность держателя образцов – предварительно обезжиренную пластинку из органического стекла. После нанесения и высушивания капли образца осуществляли анализ.

Для того, чтобы оценить вид распределения микроэлементов, нами исследованы водные растворы нитратных солей меди, железа и цинка с концентрациями значительно большими, чем в биообразцах [3]. Данные изменения интенсивности линии меди (λ = 324,754 нм) на бумажном фильтре (черная лента) диаметром 6 и 20 мм в спектрах высушенных капель нитрата меди по диаметру приведены на рисунке 1. Анализировали растворы с различным содержанием меди (0,10 % и 1,0 %). Аналогичные зависимости получены и для других элементов. Чтобы повысить чувствительность анализа, использовано искусственное уменьшение зоны распределения раствора образца. Был взят фильтр диаметром 6 мм. Площади для диаметров 20 и 6 мм различаются примерно в 10 раз, и, казалось, чувствительность за счет роста концентрации солей должна была бы увеличиться на порядок.

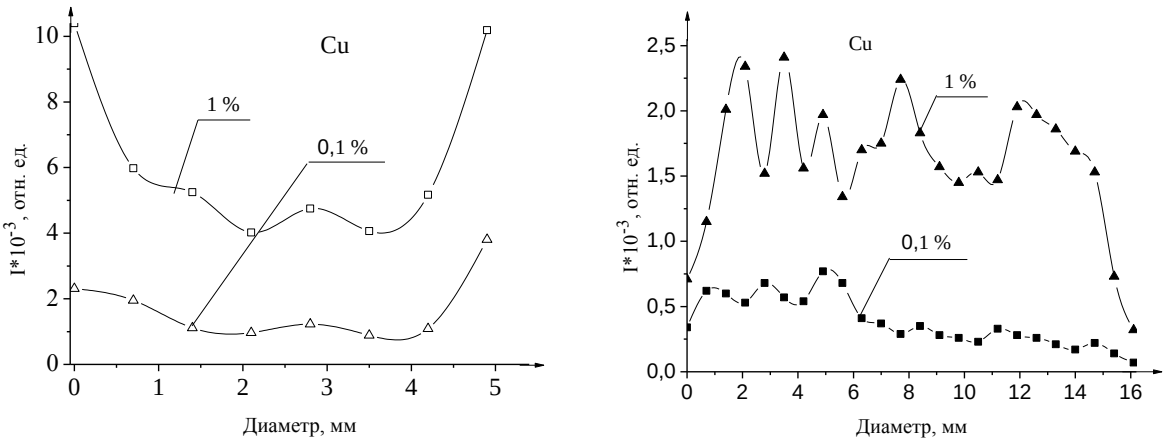


Рисунок 1 – Зависимость интенсивности линии меди от положения точки по диаметру для разных концентраций

Из рисунка следует, что независимо от концентрации химического элемента в случае диаметра 20 мм раствор распределяется по всей поверхности образца. При концентрации 0,10 % интенсивность линии уже довольно слабая. Интенсивность спектральных линий значительно выросла по краям фильтра, при этом тем больше, чем больше концентрация элемента в растворе. Поскольку при миграции солей по капиллярам фильтра по краям скорость высыхания больше, то раствор постепенно по мере высыхания передвигается на край, увеличивая тем самым концентрацию катионов у края капли. При использовании фильтра размером 6 мм, интенсивность линий элементов в средней части выше при больших концентрациях по сравнению с фильтром размером 20 мм, но при уменьшении концентрации и кальция, и меди такая зависимость проявляется уже не так отчетливо.

Проведенные эксперименты показали возможность построения градуировочных графиков и для других макро- и микроэлементов вплоть до 10^{-2} %. Кроме того, можно отметить, что при использовании сдвоенных лазерных импульсов для экспресс-анализа локального содержания элементов в твердых биологических субстратах перевод образца в неорганическую форму не требуется. В этом случае в отличие от плазмы искрового разряда, существенное изменение интенсивности линий, вызванное испарением верхнего загрязненного слоя образца, наблюдается для всех элементов только во время первого импульса, посылаемого в точку поверхности. После этого можно проводить результативный анализ.

Список литературы

1. Патапович, М. П. Атомно-эмиссионный спектрометрический анализ развития нарушения обмена макро- и микроэлементов в организме человека : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.05 / М. П. Патапович. – Минск, 2014. – 136 л.

2. Ермалицкая, К. Ф. Двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия многокомпонентных сплавов и функциональных покрытий : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.05 / К. Ф. Ермалицкая. – Минск, 2010. – 140 л.

3. Патапович, М. П. Разработка методик определения меди и цинка в биологических объектах (волосах) методом лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии / М. П. Патапович, Лэ Тхи Ким Ань // Физика конденсированного состояния : материалы XXI междунар. науч.-практ. конф. аспир., магистр. и студ., Гродно, 18–19 апр. 2013 г. / Гродн. гос. ун-т им. Я. Купалы ; редкол. : Г. А. Хацкевич (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2013. – С. 208–210.

Two-pulse atomic-emission laser spectrometry allows for recording of the local distribution of the essential elements on ablation of the dried drops of biological fluids and standard samples. The developed methods and standard samples provide the basis for estimation of the local spatial distribution and total microelemental content in dried drops of biological fluids.

Акулич Валентин Александрович, студент 4 курса уровня среднего специального образования факультета электросвязи Белорусской государственной академии связи, Минск, Беларусь, VAAKU2019@mail.ru.

Рябцева Анна Сергеевна, студентка 2 курса уровня высшего образования факультета инжиниринга и технологий связи Белорусской государственной академии связи, Минск, Беларусь.

Научные руководители – *Патапович Мария Петровна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и физики факультета инжиниринга и технологий связи Белорусской государственной академии связи, Минск, Беларусь, mpetpat@mail.ru.

Зажогин Анатолий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

УДК 620.3

М. Ф. С. Х. АЛЬ-КАМАЛИ, А. А. АЛЕКСЕЕНКО

ПОЛУЧЕНИЕ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ SiO_2-КСЕРОГЕЛЕЙ И ПОРОШКОВ НА ИХ ОСНОВЕ, СОДЕРЖАЩИХ НАНОЧАСТИЦЫ ВОССТАНОВЛЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

Приводятся данные по морфологии поверхности высококремнеземных ксерогелей, содержащих микро- и наночастицы восстановленной меди различной концентрации. Приводятся сорбционные свойства синтезированных композиционных материалов. Сделано предположение об эффективности применения сформированных микропорошков в биомедицинских исследованиях, относящихся к созданию недорогих и эффективных бактерицидно активных препаратов, направленных на борьбу с резистентностью патогенных микроорганизмов.

С применением золь-гель метода был проведен контролируемый синтез наночастиц восстановленных металлов в структуре чистых высокопористых SiO_2-матриц (на примере меди, по технологическому процессу, описанному в работе [1]). На рисунках 1–2 приводятся данные по сорбционной способности сформированных ксерогельных заготовок (рисунок 1) и морфологии их поверхности в случае получения в их структуре микро- и наночастиц восстановленной меди (рисунок 2). Технологические приемы получения композиционных материалов подобного рода, изложенные в работе [1], состояли в проведении этапов последовательной трансформации нитрата меди сначала в ее оксид, а затем в состояние восстановленной меди (под действием первичной термообработки на воздухе, а затем в среде водорода).

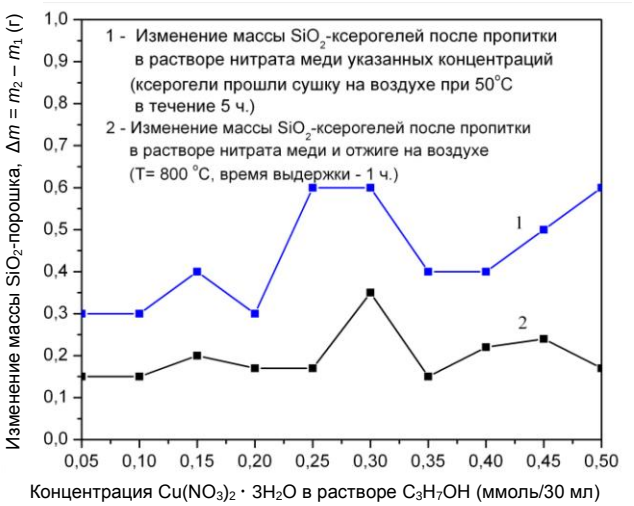
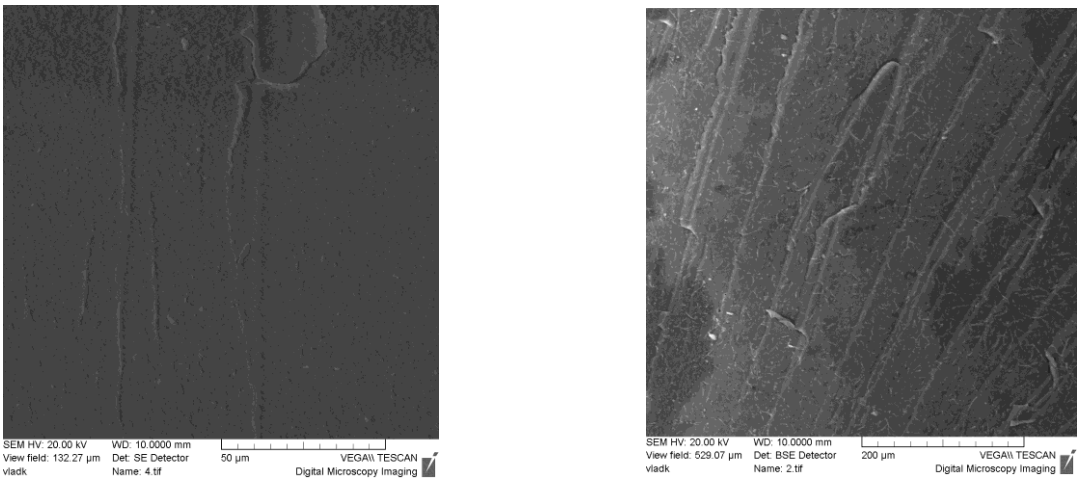


Рисунок 1 – Сорбционная способность чистых SiO_2-порошков, предварительно отожжённых на воздухе при T = 800 ºC (1 ч)

Например, при получении ксерогеля состава SiO_2:Cuº в чистый золь предварительно вводился нитрат меди $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ из расчета концентрации по массе 4 г на 70 мл готового золя. Далее следовал этап стабилизации приготовленного коллоидного раствора и его сушка при нормальных условиях в открытых пластиковых контейнерах. Отжиг такого ксерогеля на воздухе (при 800 °С, время выдержки – 1 ч) приводил к формированию в его структуре двухвалентного оксида меди CuO. После инерционного охлаждения печи образцы подвергались термообработке в потоке осушенного водорода с целью получения отдельно локализованных микрочастиц восстановленной меди, чётко наблюдаемых методом оптической микоскопии. На рисунке 2 приводятся микрофотографии поверхности ксерогельных заготовок, содержащих в своей структуре восстановленную медь. Разрешение использованного оборудования (растрового электронного микроскопа модели VEGA II LSH), не позволило установить присутствие наночастиц Cu°. Но можно предполагать наличие таких наночастиц, т. к. проведенные ранее исследования кварцевых стекол, содержащих восстановленную медь (методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения), показали их образование в виде отдельных наночастиц размерами от 5 нм [1]. В случае необходимости (с целью получения микропорошков состава SiO_2:Cu°) ксерогели, содержащие восстановленную медь, предварительно измельчались в агатовой ступке, а затем просеивались через сито с размером ячейки 100 мкм (отсеявшиеся микрочастицы большего размера проходили этап повторного домалывания). Полученные таким образом микропорошки можно было наиболее эффективно использовать при процедуре точной дозировки вводимых веществ, а также получать на их основе антибактериальные препараты в таблетированном виде.



а *б*

Рисунок 3 – РЭМ-изображения поверхности ксерогелей, сформированных на основе водной дисперсии аэросила А-300 и нитрата меди, концентрацией 0,3 ммоль / 30 мл золя и 0,5 ммоль / 30 мл золя (микрофотографии *а* и *б* соответственно). Все ксерогели прошли восстановительную обработку в среде водорода при T = 800 °С (1 ч)

Сорбционные свойства формируемых ксерогелей (рисунок 1) позволяют предложить их в качестве биологически активных материалов, применяемых для создания антимикробных агентов, обладающих высокой подавляющей способностью (в т. ч. за счет механизмов сорбции-десорбции, например, ионов Cu^{2+}, [2, 3]). Локализация наночастиц Cu° в структуре веществ состава SiO_2:Cu° также может эффективно повлиять на стабилизацию их антибактериальных свойств в результате уменьшения механизмов их естественного окисления [2]. В частности, хорошо известно, что ксерогели обладают системой как открытых, так и закрытых пор [1]. В этом случае высока доля вероятности нахождения в закрытых порах наночастиц восстановленной меди в неокисленном состоянии достаточно длительное время, что выгодно отличается от временного состояния ассоциатов наночастиц меди, полученных, например, плазмохимическим способом [3].

Список литературы

1. Алексеенко, А. А. Функциональные материалы на основе диоксида кремния, получаемые золь-гель методом / А. А. Алексеенко, А. А. Бойко, Е. Н. Подденежный. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 183 с.

2. Гульченко, С. И. Перспективы создания антибактериальных препаратов на основе наночастиц меди / С. И. Гульченко, А. А. Гусев, О. В. Захарова // Вестн. ТГУ. – 2014. – Т. 19, вып. 5. – С. 1397–1399.

3. Антибактериальное действие наночастиц меди / И. В. Бабушкина [и др.] // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер.: Медицина. – 2012. – № 2. – С. 137–139.

This paper presents data on the surface morphology of high-silica xerogels containing micro- and nanoparticles of reduced copper of various concentrations. The sorption properties of the synthesized composite materials are given. An assumption is made about the effectiveness of the use of formed micropowders in biomedical research related to the creation of inexpensive and effective bactericidal active drugs aimed at combating the resistance of pathogenic microorganisms.

Аль-Камали Марван Фархан Саиф Хассан, аспирант кафедры «Материаловедение в машиностроении» Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого, Гомель, Беларусь, marwan.ye2@gmail.com.

Научный руководитель – *Алексеенко Александр Анатольевич*, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НИЧ, заведующий (научный руководитель) НИЛ «Техническая керамика и наноматериалы» Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого, Гомель, Беларусь, alexeenko@dstu.by.

УДК 543.42:666.752

И. А. АНУШКЕВИЧ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ ОРНШТЕЙНА

Используя метод Орнштейна, проведено определение температуры лазерно-эмиссионной плазмы, образованной путем воздействия сдвоенных лазерных импульсов YAG:Nd^{3+}-лазера (1,06 мкм) на поверхность алюминиевого сплава. Экспериментально получены относительные интенсивности двух спектральных линий пластинки алюминия λ_1 = 308,215 нм и λ_2 = 309,279 нм. Показано, что температура в факеле лазерно-эмиссионной плазмы составляет порядка 13 700 К.

Огромную роль в методах диагностики плазмы играет спектроскопия, применение которой позволяет изучать и анализировать процессы, происходящее в плазме. Также спектроскопическими методами можно определять температуру плазмы, ее зарядовый состав и концентрации частиц. Известен ряд способов спектроскопических измерений температуры плазмы, например, метод распределения яркости в континууме, метод сравнения яркостей двух континуумов, метод относительных интенсивностей спектральных линий, определение температуры по контуру спектральной линий и т. д. Указанные выше методы имеют ограниченную область применений. В данных методах используются предположения о том, что плазма находится в локальном термодинамическом равновесии. Возможность их применения для неравновесных процессов требует дополнительного обоснования. Указанные выше первый и второй методы часто используются при достаточно высоких температурах, при таких условиях, когда уже высока интенсивность тормозного и рекомбинационного излучения. Также при использовании третьего метода в плазме должно быть наличие саха-больцмановского равновесия, а четвертый метод требует отсутствия самопоглощения в линии, что существенно сказалось на области его применения [1].

Для исследования и создания различных устройств, использующих разрядную плазму или лазерно-эмиссионную плазму, необходимы исследования свойств излучающей плазмы, которая является в них рабочим телом. Знание физических процессов, протекающих в газоразрядной и лазерно-эмиссионной плазме, позволяет сформулировать требования к ее формированию. При выполнении этих требований реализуются наиболее благоприятные условия для эмиссии светового излучения и получения максимальной эффективности

преобразования подводимой энергии в световой поток. Исследование излучений плазмы в широком спектральном диапазоне, зондирование плазмы внешними источниками излучения позволяют исследовать процессы, происходящие в ней, измерять температуру без введения в плазму зондов. Исследования интенсивностей спектральных линий, молекулярных полос и непрерывного спектра позволяют получить информацию о температуре и плотности электронов в плазме, а также температуре газов, заполняющих разрядный объем этих источников излучения [2–5].

Одним из важнейших применений плазмы является лазерно-эмиссионный спектральный анализ вещества. Определение элементного состава вещества является одними из важнейших составляющих современных технологических процессов в промышленности. Основными достоинствами лазерно-эмиссионного спектрального анализа являются экспрессность, низкие пределы обнаружения, возможность определения ряда элементов в одной пробе и т. д. [6–7]. На первом этапе развития лазерно-эмиссионного спектрального анализа испарение вещества осуществлялось одиночными лазерными импульсами. Однако стабильность спектроскопических характеристик лазерной плазмы была низкой, предел обнаружения химических элементов был не высоким. В моноимпульсном режиме стабильность спектроскопических характеристик лазерной плазмы удалось улучшить путем подбора параметров лазерного импульса, таких как длина волны, длительность импульса, частота повторения, энергия импульса, количество накопленных импульсов, окружающая исследуемый объект среда, фокусировка лазерного излучения и т. д. Для достижения высокой чувствительности также применялись дополнительные источники возбуждения лазерно-эмиссионной плазмы, однако это приводило к усложнению аналитических процедур. При проведении исследований в воздушной среде продукты абляции исследуемого вещества вступают в реакции с азотом и кислородом и искажают истинную аналитическую картину. Возможности лазерно-эмиссионного спектрального анализа существенно расширились с использованием двухимпульсного возбуждения, при котором наблюдается резкое увеличение интенсивности спектральных линий химических элементов [8].

Целью настоящей работы является определение температуры лазерно-эмиссионной плазмы спектральными методами. Для достижения поставленной цели использовался метод Орнштейна. Он позволяет определить температуру плазмы по результатам измерения отношения интегральных интенсивностей двух спектральных линий, принадлежащих одному и тому же излучающему химическому элементу [5].

Согласно квантовой теории излучения, отношение интенсивностей и двух спектральных линий, соответствующих длинам волн λ_1 и λ_2, определяется выражением [9]:

$$J_{ki} = N_0 \left(\frac{g_k}{g_0} \right) \cdot A_{ki} \cdot h \cdot \nu_{ki} \cdot \exp\left[-\frac{E_k}{kT} \right], \tag{1}$$

где величины N_0, g_k, g_0, A_{ki}, h, ν_{ki}, E_k берутся соответственно для переходов в атоме, ионе или молекуле. A_{ki} – вероятности спонтанных переходов, J_{ki} – интенсивность излучения, ν_{ki} – частота спектральной линии, h – постоянная Планка, T – температура, k – постоянная Больцмана, g_k – статистический вес возбужденного состояния, g_0 – статистический вес основного состояния, N_0 – заселенность основного состояния, E_k – энергия возбужденного состояния, отсчитываемая от основного уровня.

Впрочем, точное измерение абсолютных интенсивностей спектральных линий связано с большими экспериментальными проблемами [10]. Также во многих случаях известны лишь относительные значения вероятностей переходов. В основу способа измерения температуры плазмы, созданного Л.С. Орнштейном, положено спектроскопическое определение температуры по измерениям относительных интенсивностей спектральных линий. Таким образом, это дает возможность избежать измерения абсолютных значений и не требует знания абсолютных величин концентраций атомов или ионов.

Суть метода состоит в следующем. Рассматриваются 2 спектральные линии, образующиеся при переходе между возбужденными уровнями $k \to i$ и $l \to m$ одного сорта частиц (атомов, ионов данной кратности и т. д.). В случае если заселенности всех этих уровней удовлетворяют распределению Больцмана с одной и той же температурой возбуждения T_e, то, записав выражение (1) для каждой линий и сделав преобразования, получим

$$\frac{J_{ki}}{J_{lm}} = \left(\frac{A_{ki}}{A_{lm}} \right) \cdot \left(\frac{g_k}{g_l} \right) \cdot \left(\frac{\lambda_{lm}}{\lambda_{ki}} \right) \cdot \exp\left[-\frac{(E_k - E_l)}{kT_e} \right], \tag{2}$$

где λ_{ki} и λ_{lm} – длины волн выбранных спектральных линий. Здесь учтено, что основное состояние для данных частиц одного сорта одно и то же. Экспериментально измерив относительные интенсивности двух спектральных линий и используя формулу (2), можно вычислить электронную температуру по формуле

$$T_e = \frac{E_l - E_k}{k \cdot \ln\left[\left(\frac{J_{ki}}{J_{lm}}\right) \cdot \left(\frac{A_{lm}}{A_{ki}}\right) \cdot \left(\frac{g_l}{g_k}\right) \cdot \left(\frac{\lambda_{ki}}{\lambda_{lm}}\right)\right]}. \quad (3)$$

Для определения температуры лазерно-эмиссионной плазмы, как следует из формулы (3), необходимо определить относительную интенсивность спектральных линий. В качестве объекта исследования был выбран алюминиевый сплав. Излучение лазера фокусировалось на исследуемый образец, и на нем формировался лазерно-эмиссионныйи ли эрозийный плазменный факел, излучение которого с помощью оптико-механического блока фокусировки и сбора излучения направлялось в монохроматор – спектрограф MS 2004i. Регистрация эмиссионного спектра лазерной плазмы алюминия на выходе монохроматора-спектрографа осуществлялась с помощью регистратора оптического излучения UC-16H10420-1106 на базе ПЗС-линеек. Более подробно экспериментальная установка описана в работах [3; 7].

Производилась серия воздействий на исследуемый образец лазерными импульсами YAG:Nd^{3+}-лазера (1,06 мкм). Полученные спектры лазерно-эмиссионной плазмы накапливались, усреднялись и отображались в виде спектра в программе Qsp Client. Измерялись интенсивности двух линий λ_1 и λ_2, которые были равны J_{ki} = 29 300 и J_{lm} = 21 950 относительных единиц. Теперь, когда известны интенсивности спектральных линий, можно определить температуру плазмы по формуле (3). Вероятности спонтанных переходов и статистические веса возбужденного и основного состояния брались из справочника [11].

Подставляя все данные в уравнение (3), рассчитывали в программе MathCad температуру сформированной на алюминиевом образце лазерно-эмиссионной плазмы, которая оказалась равной 13700 К.

Список литературы

1. Мажукин, В. И. Математическое моделирование спектра неравновесной лазерной плазмы / В. И. Мажукин, М. Г. Никифоров, К. Фьеве // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36, № 2. – С. 125–133.

2. 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 Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – № 2. – С. 101–110.

3. Ануфрик, С. С. Влияние плотности мощности лазерного излучения на интенсивность спектральных линий основных компонентов лазерной плазмы глины / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, М. В. Бельков // Журнал прикладной спектроскопии. – 2018. – Т. 85, № 2. – С. 285–292.

4. Зноско, К. Ф. Распределение интенсивности излучения плазмы импульсно-периодического разряда в смеси паров ртути с аргоном / К. Ф. Зноско, В. Ч. Белаш // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2019. – № 1. – С. 78–89.

5. Белаш, В. Ч. Температура и концентрация электронов импульсного разряда в смеси паров ртути с аргоном / В. Ч. Белаш, К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – № 3. – С. 83–92.

6. Ануфрик, С. С. Спектральный анализ элементного состава древесноволокнистой плиты / С. С. Ануфрик, К. Ф. Зноско, Н. Н. Курьян // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2015. – № 3(199). – С. 83–92.

7. Ануфрик, С. С. Исследование химического состава глазурей керамических плиток / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, И. И. Жукова, К. Ф. Зноско, М. В. Бельков // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т. 83, № 5. – С. 724–730.

8. Ануфрик, С. С. Модификация химического состава и повышение износостойкости полуфриттовой глазури напольной керамической плитки путем добавления плавленого корунда / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, И. И. Жукова // Журнал Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 2. – С. 83–94.

9. Квасников, И. А. Термодинамика и статистическая физика. Т. 2 : Теория равновесных систем: Статистическая физика / И. А. Квасников. . – Изд. стереотип. – М. : URSS, 2016. – 432 с.

10. Интернет-портал «Студопедия» [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа: https://stydopedia.ru/4x34eb.html. – Дата доступа: 27.12.2018.

11. Радциг, А. А. Параметры атомов и атомных ионов : справ. / А. А. Радциг, Б. М. Смирнов. – 2-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 382 с.

Using the Ornstein method, the temperature of the laser emission plasma formed by the action of double laser pulses YAG:Nd3+-laser (1,06 μm) on the surface of the aluminum alloy was determined. The relative intensities of two spectral lines of the aluminum plate λ_1 = 308,215 nm and λ_2 = 309,279 nm are experimentally obtained. It is shown that the temperature in the plume of laser-emission of the plasma is of the order of 13700 K.

Анушкевич Илья Александрович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, anushkevich.1997@mail.ru.

Научный руководитель – *Зноско Казимир Францевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, znosko@grsu.by.

УДК 543.42:666.752

И. А. АНУШКЕВИЧ

РАСЧЁТ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЕ

С помощью уравнения Саха – Ленгмюра определенна концентрация электронов в лазерно-эмиссионной плазме, образованной путем воздействия сдвоенных лазерных импульсов YAG:Nd^{3+}-лазера (1,06 мкм) на поверхность алюминиевого сплава, которая составила $n_e = 2{,}11 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$.

При высокой плотности потока лазерного излучения на поверхности облучаемой мишени возникает эрозионный плазменный факел, в эмиссионном спектре которого содержится информация об элементном химическом составе плазмы. Данное физическое явление положено в основу лазерно-эмиссионного спектрального анализа (LIBS) [1–3]. Излучение лазерной плазмы представляет собой комбинацию непрерывного, и линейчатого спектра, который используется для определения элементного состава [4]. Соотношение между непрерывным и селективным спектрами лазерной плазмы зависит от температуры и плотности плазмы, степени ее пространственной неоднородности и линейных размеров плазменного факела. Степень ионизации экспоненциальным образом зависит от температуры, поэтому с ее ростом в эмиссионных спектрах наряду с атомными линиями появляются линии ионов, что повышает их информативность. При большой концентрации возбуждаемых частиц важными могут стать эффекты самопоглощения и реабсорбции линейчатого спектра излучения. С увеличением плотности излучения плазмы возрастает контрастность спектра.

Состояние равновесной плазмы полностью характеризуется термодинамическими параметрами, например, температурой и давлением. Ее состав, скорости частиц, населённость возбуждённых уровней находится несложными термодинамическими соотношениями – уравнением Саха, функциями распределения Максвелла и Больцмана. Однако в реальных условиях полное термодинамическое равновесие достигается крайне редко. Среди причин, нарушающих равновесие, можно указать внешние поля, выход излучения, градиенты физических величин, конечную скорость физических и химических процессов. С другой стороны, столкновительные процессы, приводящие к перераспределению энергий и импульсов частиц, восстанавливают равновесие. В результате устанавливаются некоторые компромиссные состояния: неравновесные в целом и, возможно, равновесные по отдельным степеням свободы. Такие состояния уже невозможно описать с помощью одной температуры. Так, простейшее неравновесное состояние плазмы, так называемая двухтемпературная плазма, характеризуется температурой электронов и температурой тяжелых частиц. При этом степень ионизации, распределение возбужденных атомов по энергиям и распределение электронов по скоростям определяются электронной температурой. Однако неравновесность часто приводит к более сложному виду функций распределения и уравнениям для степени ионизации, которые вообще невозможно характеризовать какой-либо температурой. Нарушение ионизационного равновесия наиболее существенно оказывается на различных макроскопических характеристиках плазмы. Поэтому такую плазму называют плазмой с неравновесной ионизацией [5]. К такой плазме относится лазерно-эмиссионная плазма.

С целью нахождения условий наиболее эффективного излучения лазерно-эмиссионной плазмы необходимо знание ее параметров и в первую очередь электронной температуры разрядной плазмы и концентрации или плотности электронов в ней. Знание этих параметров лазерно-эмиссионной плазмы используется при ее компьютерном моделировании, что позволяет снизить трудоёмкость и материальные затраты экспериментального моделирования [6]. Для определения электронной температуры разрядной плазмы и концентрации электронов в ней используются различные методы, однако наибольший интерес представляют спектральные методы.

Целью настоящей работы является определение концентрации электронов в лазерно-эмиссионной плазме спектральными методами на основе уравнения Саха – Ленгмюра. Это уравнение, определяющее степень термодинамической ионизации в газе, было получено 1920 году. Большое применение это уравнение получило для объяснения ионизации в звездных атмосферах и разработке спектральной классификации звезд. В этом уравнении объединены идеи квантовой и статистической физики. Оно имеет вид:

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} = \frac{2 \cdot g_2}{g_1} \cdot \frac{(2\pi m_e)^{3/2}}{h^3} \cdot \frac{(kT)^{5/2}}{p} \cdot e^{-\frac{e_0 U_i}{kT}}, \qquad (1)$$

где g_1, g_2 – статистические веса ионов и тяжелых частиц; h – постоянная Планка; p – парциальное давление (находится из уравнения Менделеева – Клапейрона), U_i – потенциал ионизации, m_e – масса электрона, α – степень ионизации. Если в формулу (1) подставить численное значение постоянных, то получим:

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} = 4,9\cdot 10^{-4}\cdot\frac{g_2}{g_1}\cdot\frac{T^{5/2}}{p}\cdot e^{-\frac{1160\,U_i}{T}}. \qquad (2)$$

Формула показывает, что степень ионизации повышается с увеличением температуры и с увеличением давления. В случаях, встречающих на практике, обычно $\alpha << 1$; пренебрегая α^2 по сравнению с 1, находим

$$\alpha = 2,2\cdot 10^{-2}\sqrt{\frac{g_2}{g_1}}\cdot\frac{T^{5/4}}{\sqrt{p}}\cdot e^{-\frac{5800\,U_i}{T}}. \qquad (3)$$

Связь между степенью ионизации и концентрацией электронов

$$\alpha = \frac{n_e}{n_a + n_e}. \qquad (4)$$

Концентрация электронов в этом случае будет определяться формулой:

$$n_e = \frac{\alpha\cdot n_a}{1-\alpha}. \qquad (5)$$

Таким образом, для определения концентрации электронов в плазменном факеле нам необходимо знать степень ионизации плазмы, для чего нам необходимо экспериментально определить ее температуру. Температуру определим методом Орнштейна. На рисунке 1 представлена схема экспериментальной установки.

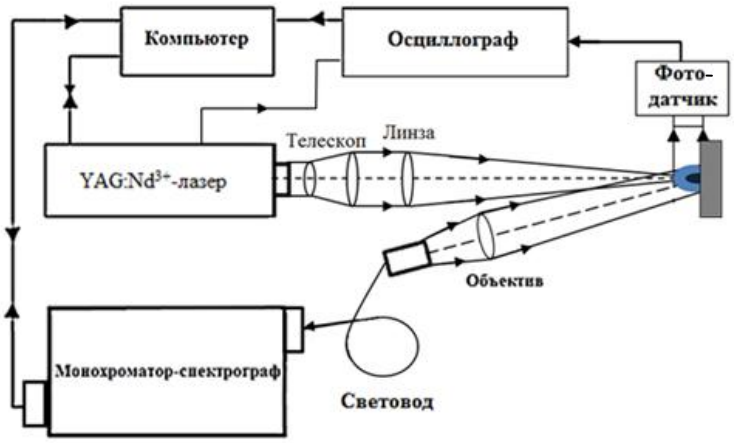


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Излучение YAG:Nd^{3+}-лазера (1,06 мкм) на поверхности алюминиевого сплава формировало лазерно-эмиссионную плазму. Регистрация излучения плазмы осуществлялась в обратном направлении по отношению к лазерному пучку, формирующему плазму. Излучение плазмы с помощью оптико-механического блока фокусировки и сбора излучения вводится в световод и направляется в монохроматор-спектрограф MS 2004i. Фокусное расстояние объектива, собирающего излучение плазмы, составляет 35 мм, его диаметр 30 мм. Рабочий спектральный диапазон MS 2004i составляет 190–1500 нм при использовании дифракционных решеток 3600, 1200 и 600 штр/мм. Регистрация эмиссионного спектра лазерной плазмы исследуемого объекта на выходе монохроматора-спектрографа осуществляется с помощью регистратора оптического излучения UC-16H10420-1106 на базе ПЗС-линеек с размером светочувствительной зоны $28,672\times 0,896$ мм^2 и количеством активных пикселей 2048×64.

Определялись интенсивности двух спектральных линий волн λ_1 = 308,215 нм и λ_2 = 309,279 нм. Проведя вычисления с помощью метода Орнштейна, температура лазерно-эмиссионной плазмы получилась равной 13700 К. Теперь, когда температура плазмы известна, подставляя численные значения в формулу (3), определим степень ионизации. Парциальное давление (находится из уравнения Менделеева – Клапейрона), g_1, g_2 – статистические веса ионов и тяжелых частиц, h – постоянная Планка и U_i – потенциал ионизации были взяты из справочника [10]. Из формул (3) и (4) следует заметить связь между степенью ионизации и концентрацией электронов, тогда концентрация электронов будет равна (5), концентрацию атомов будем принимать как $n_a = 10^{20}$ см$^{-3}$. Расчеты, произведённые в программе MathCad, показали, что концентрация электронов для плазмы на поверхности алюминиевого сплава составляет $n_e = 2,11\cdot 10^{17}$ см$^{-3}$.

Таким образом, используя уравнение Саха – Ленгмюра, была определена концентрация электронов в лазерно-эмиссионной плазме, образованной путем воздействия сдвоенных лазерных импульсов YAG:Nd^{3+}-лазера (1,06 мкм) на поверхность алюминиевого сплава, которая составила $n_e = 2{,}11 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$.

Список литературы

1. Ануфрик, С. С. Спектральный анализ элементного состава древесноволокнистой плиты / С С. Ануфрик, К. Ф. Зноско, Н. Н. Курьян // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2015. – № 3 (199). – С. 83–92.
2. Исследование химического состава глазурей керамических плиток / С. С. Ануфрик [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т. 83, № 5. – С. 724–730.
3. Ануфрик, С. С. Модификация химического состава и повышение износостойкости полуфриттовой глазури напольной керамической плитки путем добавления плавленого корунда / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, И. И. Жукова // Журнал Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 2. – С. 83–94.
4. Белаш, В. Ч. Температура и концентрация электронов импульсного разряда в смеси паров ртути с аргоном / В.Ч. Белаш, К.Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – № 3. – С. 83–92.
5. Биберман, Л. М. Низкотемпературная плазма с неравновесной ионизацией / Л. М. Биберман, В. С. Воробьев, И. Т. Якубов // Успехи физических наук. – 1979. – Т. 128, № 2. – С. 233.
6. Зноско, К. Ф. Распределение интенсивности излучения плазмы импульсно-периодического разряда в смеси паров ртути с аргоном / К. Ф. Зноско, В. Ч. Белаш // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2019. – № 1. – С. 78–89.
7. Интернет-портал Википедия [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/-Уравнение_Саха. – Дата доступа: 27.12.2018.
8. 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 Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – № 2. – С. 101–110.
9. Ануфрик, С. С. Влияние плотности мощности лазерного излучения на интенсивность спектральных линий основных компонентов лазерной плазмы глины / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, М. В. Бельков // Журнал прикладной спектроскопии. – 2018. – Т. 85, № 2. – С. 285–292.
10. Радциг, А. А. Параметры атомов и атомных ионов : справ. / А. А. Радциг, Б. М. Смирнов. – 2-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 382 с.

Using the Saha-Langmuir equation, the electron concentration in the laser emission plasma formed by the action of double laser pulses YAG:Nd3+-laser (1,06 μm) on the surface of the aluminum alloy was determined $n_e = 2{,}11 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}.

Анушкевич Илья Александрович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, anushkevich.1997@mail.ru.

Научный руководитель – *Зноско Казимир Францевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, znosko@grsu.by.

УДК 535.33

Н. В. БЕЛЬКО

ВЛИЯНИЕ pH И ИОННОЙ СИЛЫ ВОДНОЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕСС АГРЕГАЦИИ ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВОГО КРАСИТЕЛЯ

Приведены результаты исследований процесса агрегации индотрикарбоцианинового красителя в водных средах. Показано, что pH и ионная сила водной среды влияют на тип образующихся агрегатов и их стабильность во времени. В зависимости от параметров среды можно получать стабильные H*- или J-агрегаты индотрикарбоцианинового красителя.

Молекулярные агрегаты полиметиновых красителей могут найти применения в различных областях науки и техники [1]. Известно о влиянии pH и ионной силы водной среды на процесс агрегации ионных полиметиновых красителей [2]. Возможность управлять процессом агрегации красителя в водной среде имеет практическую значимость. Важным является определение условий, при которых образуются агрегаты красителя данного типа и каким образом их можно стабилизировать.

В данной работе исследуются процессы агрегации симметричного катионного индотрикарбоцианинового красителя (рисунок 1) в водных средах. Данное соединение было разработано и синтезировано в НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ, оно нерастворимо воде, но хорошо растворяется во многих органических растворителях. Введение красителя в водную среду осуществлялось через концентрированный этанольный раствор, концентрация этанола во всех исследуемых водных растворах составляла 5 об. %.

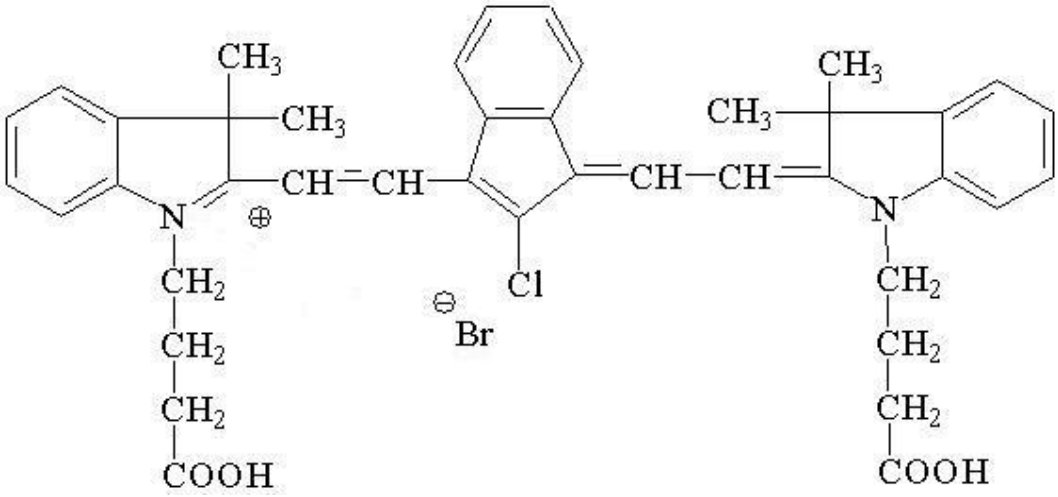


Рисунок 1 – Структурная формула индотрикарбоцианинового красителя

Как было показано ранее, в дистиллированной воде краситель образует молекулярные агрегаты, которые характеризуются узкой коротковолновой полосой поглощения [3]. Максимум данной полосы поглощения расположен при 515 нм, а ее полуширина составляет всего 22 нм. В спектре поглощения также проявляются полосы мономеров и димеров красителя с максимумами при 706 и 658 нм соответственно. Гипсохромный сдвиг узкой полосы поглощения относительно максимума поглощения мономеров красителя, ее малая полуширина, а также отсутствие люминесценции соответствующих поглощающих центров позволяют сделать вывод о том, что в водных растворах краситель образует H*-агрегаты [4].

Неорганические ионы валентности более 1 могут сильно влиять на агрегацию ионных полиметиновых красителей [2]. Такие ионы способны изменять pH водной среды, поэтому исследование спектральных свойств красителя в присутствии таких ионов целесообразно проводить в буферных растворах. В таком случае есть возможность создать достаточно высокую ионную силу и контролировать значение pH.

В нейтральном фосфатно-солевом буфере (ФСБ) с pH 7,0 и ионной силой 0,17 моль/л спектральные свойства красителя отличаются от тех, что наблюдаются в дистиллированной воде. Сразу после приготовления раствора в его спектре поглощения кроме полос мономеров и димеров проявляется интенсивная узкая полоса с максимумом при 777 нм. Положение данной полосы указывает на то, что в растворе образуются J-агрегаты красителя [4]. Концентрация всех перечисленных типов поглощающих центров убывает со временем. Одновременно с этим в спектре проявляется и постепенно становится более интенсивной H*-полоса с максимумом при 516 нм.

При сохранении pH 7,0 и уменьшении ионной силы ФСБ в 5 раз (до 34 ммоль/л) также наблюдается быстрое образование J-агрегатов с последующим более медленным их распадом и одновременным образованием H*-агрегатов. При более низком значении ионной силы спектральные трансформации идут значительно быстрее.

Исследованы спектральные свойства красителя в слабощелочном ФСБ (pH 7,2, ионная сила 0,17 моль/л). Сразу после приготовления раствора в спектре поглощения проявляются полосы мономеров, димеров и J-агрегатов, интенсивность которых уменьшается со временем (рисунок 2). H*-полоса постепенно проявляется в спектре, оптическая плотность в ее максимуме увеличивается со временем. Спектральные трансформации аналогичны тем, что происходят в нейтральном ФСБ, но отличаются скоростью. В слабощелочном ФСБ время образования H*-агрегатов более чем в 20 раз превышает значение данного параметра в нейтральном ФСБ. При уменьшении ионной силы буферной среды и сохранении pH 7,2 спектральные трансформации происходят аналогичным образом, а их скорость увеличивается.

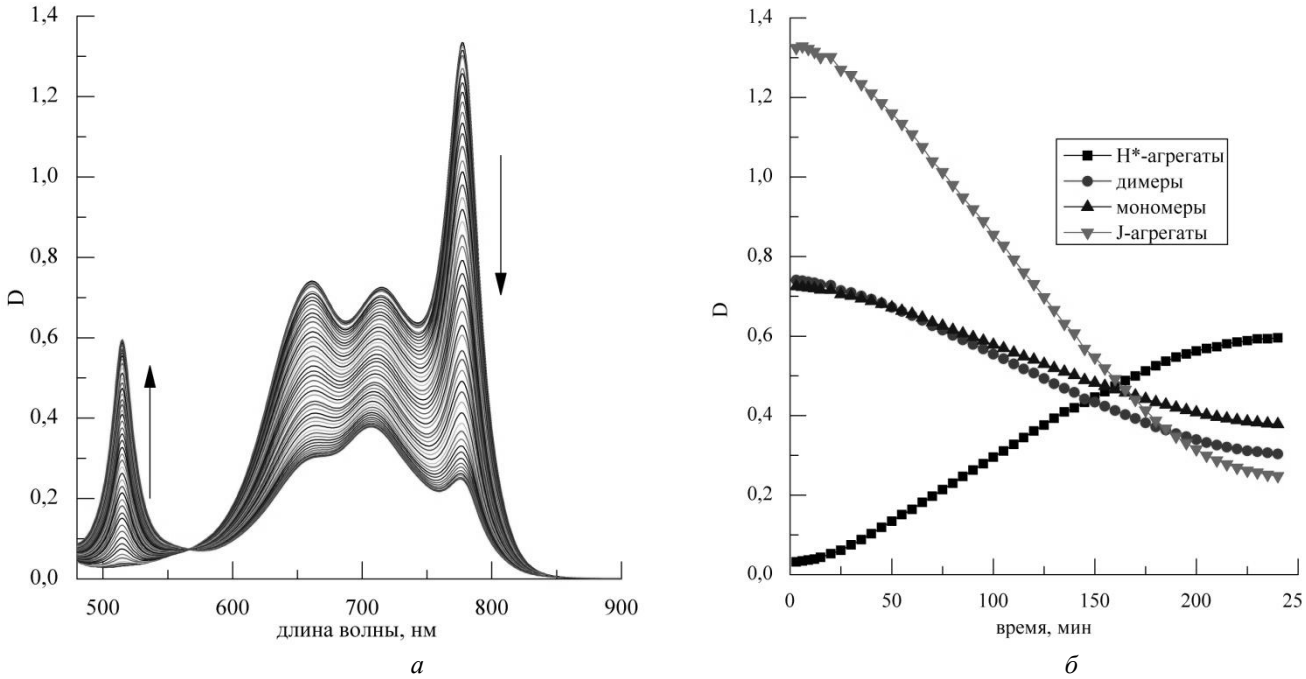


Рисунок 2 – Изменение спектра поглощения индотрикарбоцианинового красителя в ФСБ в течение 240 мин. после приготовления (а); кинетика изменения оптической плотности в основных максимумах поглощения (б). Концентрация красителя 25 мкмоль/л, pH 7,2, ионная сила 0,17 моль/л

При увеличении pH ФСБ до 7,4 (при ионной силе 0,17 моль/л) в спектре поглощения раствора красителя проявляются полосы мономеров, димеров и J-агрегатов. Форма спектра не меняется со временем. В ФСБ с pH 7,4, но уменьшенной в 5 раз ионной силой (34 ммоль/л) форма спектра нестабильна во времени. После приготовления раствора происходит постепенный распад J-агрегатов и построение H*-агрегатов.

Таким образом, на процесс агрегации индотрикарбоцианинового красителя влияет как pH, так и ионная сила. В исследованном диапазоне параметров стабилизирующее влияние неорганических ионов на J-агрегаты наблюдается только при pH 7,4 и ионной силе 0,17 моль/л. В остальных случаях происходит распад J- и возникновение H*-агрегатов, причем скорость этих процессов увеличивается при уменьшении как pH, так и ионной силы.

Таким образом, характер процесса агрегации индотрикарбоцианинового красителя существенно меняется в зависимости от состава водной среды. Путем введения соли в водную среду можно управлять агрегацией молекул красителя и получать агрегаты нужного типа.

Список литературы

1. Behera, G. B. Cyanine dyes: Self aggregation and behaviour in surfactants / G. B. Behera, P. K. Behera, B. K. Mishra // J. Surface Sci. Technol. – 2007. – Vol. 23, № 1–2. – P. 1–31.

2. Slavnova, T. D. Kinetics of salt-induced J-aggregation of cyanine dyes / T. D. Slavnova, A. K. Chibisov, H. Görner // J. Phys. Chem. A. – 2005. – Vol. 109, № 21. – P. 4758–4765.

3. Спектрально-люминесцентные свойства и морфология самоорганизованных наноструктур индотрикарбоцианинового красителя / Н. В. Белько [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2018. – Т. 85, № 6. – С. 868–878.

4. Herz, A. H. Aggregation of sensitizing dyes in solution and their adsorption onto silver halides / A. H. Herz // Adv. Coll. Interface Sci. – 1977. – Vol. 8, № 4. – P. 237–298.

Aggregation process of an indotricarbocyanine dye in aqueous media was studied. It was shown that pH and ionic strength of aqueous medium influence the type of aggregates formed and their stability. Depending on the medium parameters, stable H*- or J-aggregates of the indotricarbocyanine dye can be obtained.

Белько Никита Викторович, аспирант физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, nikita.belko@gmail.com.

Научный руководитель – *Самцов Михаил Петрович*, доктор физико-математических наук, доцент, Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, samtsov@mail.ru.

УДК 535.015

М. В. БОБКОВА, Е. А. МЕЛЬНИКОВА

ФОРМИРОВАНИЕ СИНГУЛЯРНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ С ЗАДАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫМИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Разработаны и созданы электрически управляемые жидкокристаллические элементы, позволяющие преобразовывать линейно поляризованный лазерный пучок в пучок с радиальной или азимутальной поляризацией и формировать сингулярные световые пучки с заданным топологическим зарядом.

В наши дни жидкокристаллические (ЖК) элементы получили широкое практическое применение в области производства индикаторов, дефлекторов, а так же модуляторов света. Наряду с традиционными сферами использования ЖК сред последнее время активно исследуются пути создания управляемых элементов, которые позволят формировать световые поля с необходимыми фазово-поляризационными характеристиками.

В данной работе экспериментально реализован метод создания ЖК элементов, которые преобразуют исходный линейно поляризованный световой пучок в пучок с радиальной или азимутальной поляризацией. Такие световые поля находят применение при лазерной обработке материалов, например, при лазерной резке, когда имеет место существенная зависимость эффективности воздействия лазерного излучения на материалы от поляризационной структуры светового поля [1].

При выполнении представленной работы были созданы и экспериментально исследованы два электрически управляемых ЖК элемента со сложной начальной топологией ориентации молекул жидкого кристалла. Известно, что направление оптической оси в планарно ориентированном слое нематического жидкого кристалла определяется направлением директора молекул ЖК и может изменяться путем воздействия внешнего электрического поля [2]. Каждый полученный элемент представляет собой электрически управляемую двулучепреломляющую ЖК пластинку с неоднородным распределением оптической оси. Топология ориентации ЖК директора в плоскости пластинки элементов представлена на рисунке 1*а*, *в*. Такие элементы при значениях набега фазы между обыкновенным и необыкновенным лучами, который соответствует $\Delta\Phi = \pi(2n+1)$, функционируют как полуволновая пластинка, формирующая радиальную (азимутальную) поляризацию светового пучка. Набег фазы контролируется внешним напряжением.

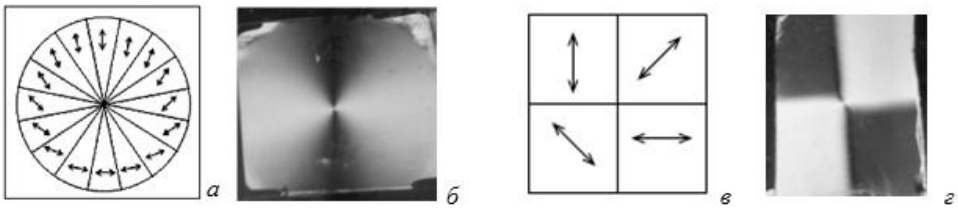


Рисунок 1 – Пространственное распределение директора жидкого кристалла для двух элементов (*а, в*) и фотографии прошедшего через ЖК ячеек излучения в скрещенных поляризаторах (*б, г*)

Ориентация молекул жидкого кристалла осуществлялась методом фотоориентации. В качестве ориентанта использовался азокраситель AtA-2, разработанный в институте химии новых материалов НАН Республики Беларусь [3], который характеризуется высокой энергией сцепления с ЖК молекулами, обладает термо- и фотостабильностью. В тонкой пленке этого материала формируется поверхностная анизотропия при воздействии на нее линейно поляризованным светом длиной волны 440 нм.

Для экспонирования ЖК ячеек с тонкой пленкой азокрасителя и формирования необходимой топологии ориентации ЖК директора была создана установка, состоящая из светодиода, двух компьютерно управляемых вращателей (с поляризатором и образцом) и щели, через которую происходила однородная засветка ячеек. Для создания первого элемента (рисунок 1*а, б*) щель представляла собой сектор в два градуса, а общее количество секторов засветки составило 180. Для второго элемента (рисунок 1*в, г*) было сокращено количество секторов до 4, а размер щели составил 90 градусов. Засветка одного сектора для двух элементов проводилась в течение 20 секунд линейно поляризованным излучением с длиной волны 440 нм и интенсивностью 15 мВт/см^2, при этом угловая скорость вращения образца была в два раза больше, чем угловая скорость вращения поляризатора.

Через центр полученных элементов пропускалось излучение гелий-неонового лазера длиной волны 632,8 нм и диаметром пучка 2 мм. Для управления анизотропией на ЖК ячейку подавалось внешнее напряжение,

величина которого изменялось от 0 до 8 В, что отвечало значениям напряженности электрического поля до 4 кВ/см при толщине слоя жидкого кристалла 20 мкм.

Первый элемент имеет 180 секторов, в каждом из которых молекулы ЖК повернуты на 1 градус относительно ориентации в предыдущем секторе, что позволяет получить более плавное изменение ориентации молекул жидкого кристалла от сектора к сектору. Как видно на рисунке 2*а*, при некоторых значениях внешнего напряжения в центре сечения пучка на выходе такого элемента появляется провал интенсивности. Как показали экспериментальные исследования зависимости величины двулучепреломления от приложенного на ЖК ячейку напряжения, эти значения соответствуют набегу фазы, удовлетворяющей условию полуволновой пластины. В свою очередь экспериментальные исследования фазовой структуры линейно поляризованных световых пучков на выходе элемента показали, что данные провалы интенсивности есть винтовые дислокации – особые точки на волновом фронте светового пучка, в которых амплитуда световой волны обращается в ноль, а фаза не определена. В этом случае эквифазная поверхность волнового фронта становится единой поверхностью с винтовой структурой, которая характеризуется топологическим зарядом l [4].

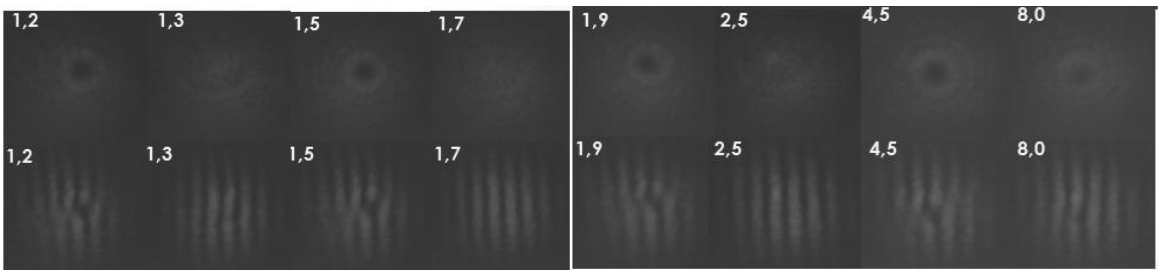


Рисунок 2 – Сечение профиля гауссова светового пучка после прохождения через первую ЖК пластинку (ряд *а*) и интерференционные картины исследуемого светового пучка и плоской волны (ряд *б*) при различных значениях приложенного к ЖК ячейке напряжения. Напряжение указано в вольтах

На рисунке 2*б* представлены экспериментальные данные получения картины интерференции исследуемых световых пучков и опорной плоской волны для разных значений внешнего напряжения на ЖК ячейке. Как видно из полученных результатов, при значениях напряжения, которые соответствуют формированию провала интенсивности в центре пучка, интерференционные полосы имеют «вилко»-подобную структуру, которая характерна для сингулярных световых полей [4]. Расщепление интерференционной линии на большее число линий происходит в месте образования винтовой дислокации. Топологический заряд формирующегося оптического вихря составляет $l = +1$.

В свою очередь второй элемент (рисунок 1*в*) имеет лишь 4 сектора, в каждом из которых молекулы повернуты на 45 градусов относительно молекул соседнего сектора. Как видно из приведенных на рисунке 3 экспериментальных результатов, для второго элемента так же характерно формирование винтовых дислокаций при значениях напряжения на пластинке, соответствующих набегу фазы между обыкновенным и необыкновенным лучом $\Delta\Phi = \pi(2n+1)$. Следовательно, при сокращении количества секторов в элементе не теряется функциональный потенциал ЖК пластины.

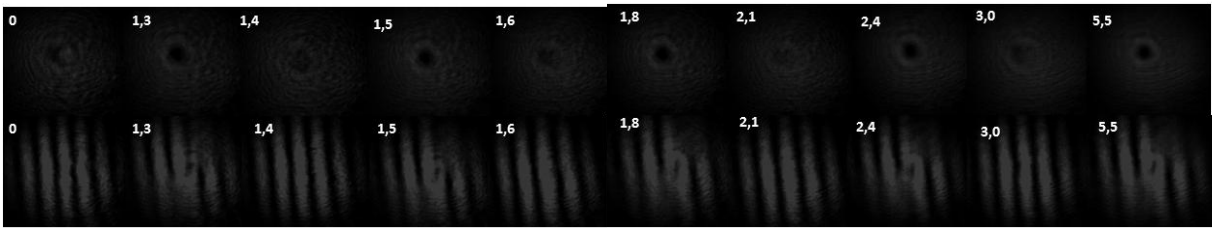


Рисунок 3 – Сечение профиля гауссова светового пучка после прохождения через второй ЖК элемент (верхний ряд), интерференционные картины исследуемого светового пучка и плоской волны (нижний ряд) при различных значениях приложенного к ЖК ячейке напряжения. Напряжение указано в вольтах

Таким образом, разработанные жидкокристаллические элементы позволяют осуществлять электрически контролируемое преобразование фазово-поляризационного состояния лазерного излучения.

Список литературы

1. Niziev, V. G. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency / V. G. Niziev, A.V. Nesterov // J. Phys. – 1999. – Vol. 32. – P. 1455–1461.

2. Блинов, Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов / Л. М. Блинов. – М. : Наука, 1928. – 384 с.
3. Mikulich, V. S. Influence of Methyl Substituents on Azo-Dye Photoalignment in Thin Films / V. S. Mikulich, An. A. Murauski, Al. A. Muravsky, V. E. Agabekov // J. Appl. Spectr. – 2016. – Vol. 83, No. 1. – P. 115–120.
4. Короленко, П. В. Оптические вихри / П. В. Короленко // Соросовский образоват. журн. – 1998. – № 6. – С. 94–99.

Electrically controlled liquid crystal elements have been developed and created. They allow transforming a linearly polarized laser beam into a beam with radial or azimuthal polarization and forming vortex beams with a given topological charge.

Бобкова Мария Владимировна, магистрант Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.
Научный руководитель – *Мельникова Елена Александровна*, кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, melnikova@bsu.by.

УДК 669.717:539.21:621.785.6

И. А. БУШКЕВИЧ

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Mg-Li, ЛЕГИРОВАННОГО СКАНДИЕМ И ЦИРКОНИЕМ

Исследовано изменение микротвердости фольг алюминиевого сплава 1421, полученных методом сверхбыстрой закалки из расплава (СБЗР), при изотермическом отжиге в интервале температур от 80 °С до 450 °С. Обнаружено, что в низкотемпературной области отжига прочностные свойства изменяются по кривым с максимумом. Максимальное упрочнение фольг сплава наблюдается при температурах 350 °С и 400 °С. Анализ микрофотографий показал, что хрупкое разрушение вокруг отпечатков пирамиды Виккерса при индентировании отожженных фольг сплава 1421 не наблюдается. Форма отпечатков указывает на достаточно высокую пластичность материала после отжига.

Перспективы применения алюминиевых сплавов с литием в машиностроении и авиации связаны с тем, что комплекс уникальных свойств, которыми они обладают, можно существенно повысить за счет легирования редкоземельными и переходными металлами. Повышенный интерес к ряду сплавов системы Al-Mg-Li обусловлен также тем, что при определенных условиях нагрева и деформации мелкозернистые материалы, полученные методами равноканального углового прессования и высокоскоростной кристаллизации, обладают эффектом сверхпластичности [1; 2] и могут применяться для изготовления деталей сложной формы. К достоинствам СБЗР относится то, что значительное повышение растворимости легирующих элементов в матрице при сверхвысоких скоростях охлаждения существенно влияет на размер зерен, кинетику распада пересыщенного твердого раствора и процесс рекристаллизации, позволяя модифицировать технологические свойства сплавов.

В данной работе исследованы вопросы упрочнения быстрозатвердевшего (БЗ) сплава 1421 системы Al-Mg-Li, дополнительно легированной скандием и цирконием, при термической обработке. При изучении термической стабильности фольг сплава 1421 была исследована их микротвердость. Микротвердость, являясь одной из физико-химических характеристик металлов, представляет сопротивление материала пластическим деформациям при вдавливании индентора и коррелирует с такими характеристиками прочности как предел прочности, предел текучести и др. В настоящее время микротвердость рассматривается как усредненное сопротивление пластическим сдвигам. При вдавливании в отличие от других видов деформации, таких как растяжение, сжатие и изгиб, пластически деформирующийся объем окружен массой недеформированного материала, создающего условия, аналогичные всестороннему сжатию. Разработанная в [3] методика позволяет определять пластичность сплавов методом измерения микротвердости по Виккерсу.

Фольги авиакосмического сплава 1421 (Al – 5,5 % Mg – 2,2 % Li – 0,12 % Zr – 0,2 % Sc) (мас. %) были получены сверхбыстрой закалкой из жидкой фазы методом одностороннего охлаждения [4]. Скорость охлаждения расплава составляла 10^6 К/с. Микротвёрдость H_μ по Виккерсу измерялась с помощью прибора MVD 402 Wolpert Wilson Instruments с использованием нагрузки 50 г с временем выдержки 30 секунд. Изотермический отжиг фольг проводился при температурах 80 °С, 130 °С, 220 °С, 350 °С, 450 °С. Погрешность измерения микротвёрдости составила 4 %.

На рисунке 1*а* видно, что при низкотемпературном отжиге присутствует максимум упрочнения (1073,0 МПа при 80 °С, 1046,0 МПа при 130 °С), который вырождается с ростом температуры отжига, принимая вид площадки при отжиге при 220 °С в течение 60 мин. (H_μ = 1010,5–1031,9 МПа при отжиге). Отжиг при 350 °С приводит к значительному упрочнению сплава, когда микротвердость фольг резко возрастает до 1376,0 МПа за 20 мин. отжига (рисунок 1*б*). При дальнейшем отжиге микротвердость образца остается почти неизменной. При повышении температуры отжига до 400 °С для свежезакаленной фольги аналогично наблюдается рост микротвердости в течение 20 мин. отжига. В среднем величина H_μ составляет около 1264,0 МПа, незначительно

изменяясь в течение 110 мин. отжига (рисунок 1*в*). Таким образом, нагрев фольг до 400 °С приводит к снижению их микротвердости на 8 %, а при более высоких температурах она резко уменьшается. В результате нагрева до 450 °С в течение 40 мин. микротвердость образца снижается до 1076,0 МПа (рисунок 1*б*). Выдержка при 450 °С до 100 мин. не приводит к дальнейшему разупрочнению.

На рисунке 1*г* показаны микрофотографии поверхности отожженных фольг сплава 1421 после вдавливании индентора. Отпечатки преимущественно имеют форму правильного квадрата с диагоналями равными по величине. Получено, что в изученном интервале температур отжига при использованной нагрузке 50 г переход «пластичность – хрупкость» не наблюдается. Можно сделать вывод о том, что фольги сплава 1421, полученные СБЗР, не являются хрупкими. Отсутствие видимого наращивания у границ отпечатков свидетельствует о высокой способности материала в отожженном состоянии к пластическому деформированию.

Рост микротвердости БЗ сплава 1421 при 80 °С на рисунке 1*а* можно объяснить выделением метастабильной β′-фазы, начиная с 47 °С (до 277 °С [4]), а также эффектом влияния кластеров легирующих элементов на микротвёрдость БЗ сплавов системы Al-Mg. С увеличением продолжительности низкотемпературного отжига размер кластеров возрастает, что, по-видимому, приводит к снижению микротвердости в интервале времени отжига от 20 до 60 мин. Повторное увеличение микротвердости при повышении температуры отжига до 130 °С на рисунке 1*а* может быть объяснено продолжением процесса выделения β′-фазы, а также образованием метастабильной δ′-фазы (Al_3Li), количество выделений которой, как известно, растет в интервале температур отжига 110–190 ºС [4]. Отметим, что фаза δ′ служит упрочнителем при низкотемпературном старении сплавов системы Al-Mg-Li. По мере увеличения времени старения количество частиц δ′ растет, а также происходит их укрупнение. Процесс образования и роста частиц фазы S_1 (Al_2LiMg) в процессе низкотемпературного отжига приводит к обеднению матрицы литием и магнием, а также растворению фазы δ′, что вызывает при перестаривании разупрочнение сплавов системы. Площадка на кривой зависимости микротвердости от времени отжига при 220 °С свидетельствует о стабильности структуры фольг в исследованном интервале времени отжига.

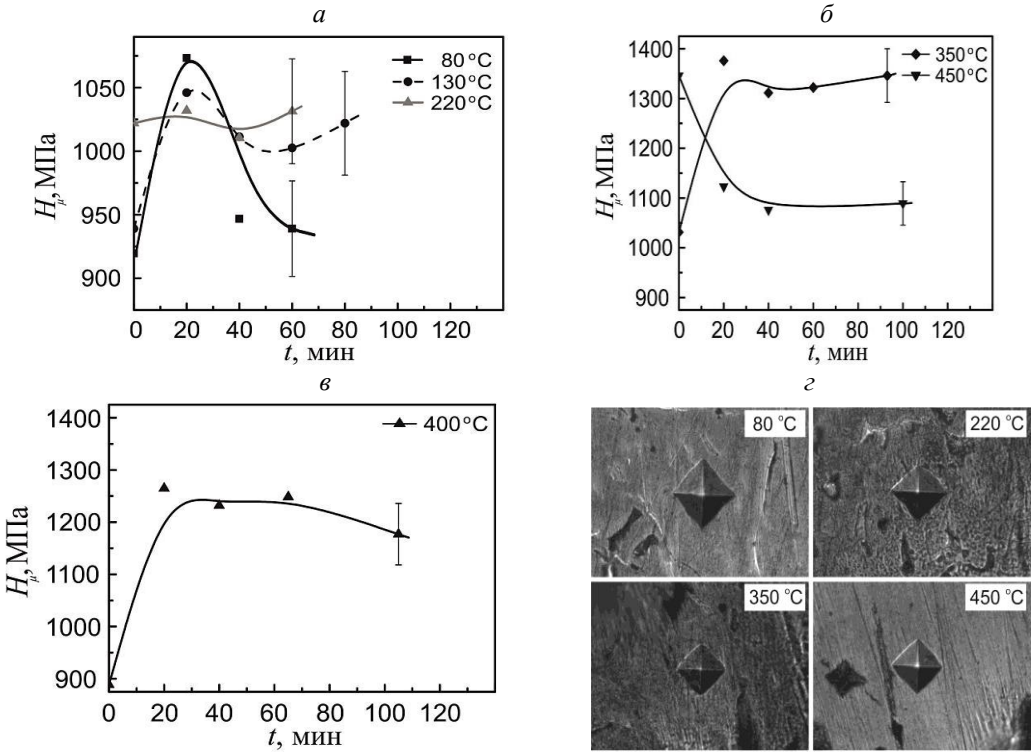


Рисунок 1 – Зависимость микротвердости фольг сплава 1421 от продолжительности изотермического отжига при 80 °С, 130 °С и 220 °С (а), 350 °С и 450 °С (б), 400 °С (в); вид отпечатков индентора Виккерса после изотермического отжига при 80 °С, 220 °С, 350 °С, 450 °С (г)

Причиной обнаруженного после отжига при 350 °С упрочнения БЗ сплава, по-видимому, является торможение дислокаций дисперсными частицами (Sc, Zr)-содержащей фазы, β-фазы и фазы S_1. Исследование образцов сплава 1421, полученных методом равноканального углового прессования, показало, что распад твердого раствора с выделением частиц фазы $Al(Mg, Sc, Zr)_x$ происходит в интервале 340–410 °С [4]. В последующих работах [5] состав данной метастабильной фазы был уточнен и определен как $Al(Mg, Sc, Zr, Li)_x$.

Наибольшая плотность выделений фазы S_1, как известно, наблюдается в диапазоне 270–370 °С. Отметим, что обнаруженное разупрочнение фольг сплава 1421 при 450 °С хорошо согласуется с результатами растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа, полученными нами ранее для фольг, отожженных при 480 °С, и объясняется растворением частиц (Sc, Zr)-содержащей фазы, β-фазы, частичным растворение частиц S_1-фазы, а также процессами рекристаллизации. Тот факт, что при 450 °С не зафиксировано полное разупрочнение сплава, мы полагаем, обусловлен тем, что часть частиц фазы S_1 сохраняется до 500 °С.

Список литературы

1. Valiev, R. Z. Studies on the superplasticity effect in UFA: history and development / R. Z. Valiev, G. A. Salishchev, F. Z. Utyashev, T. G. Langdon // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2018. – № 6. – P. 14–24.

2. Фридляндер, И. Н. Порошковые алюминиевые сплавы с пониженной плотностью / И. Н. Фриндляндер, Б. И. Матвеев, Е. Н. Малышева, В. С. Сандлер // Авиационная промышленность. – 1982. – № 8. – С. 41–43.

3. Григорович, В. К. Твердость и микротвердость металлов / В. К. Григорович. – М. : Наука, 1976. – 230 с.

4. Бушкевич, И. А. Термическая стабильность микроструктуры быстрозатвердевшего сплава Al-Mg-Li-Sc-Zr / И. А. Бушкевич, А. В. Бородын, Ю. Э. Фишкина, И. И. Ташлыкова-Бушкевич // Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. VIII междунар. науч. конф., Минск, 24–28 сент. 2018 г. В 3 т. Т. 1. – Минск : Ковчег, 2018. – С. 134–136.

5. Кикин, П. Ю. Влияние низкоэнергетического импульсного лазерного излучения на свойства ультрамелкозернистого алюминиевого сплава 1421 / П. Ю. Кикин, А. И. Пчелинцев, Е. Е. Русин, Н. В. Землякова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 8. – С. 23–26.

Change of foil microhardness of aluminium 1421 alloy produced by means of rapid solidification processing has been studied at isothermal annealing in temperature range from 80 °C to 450 °C. It was found that mechanical properties are changed along curves with maximum in low-temperature annealing. Maximal hardening of foils is observed at 350 °C and 400 °C. Analysis of microphotographies showed that there is no brittle fracture around microhardness indentation of Vickers pyramid for annealed foils of 1421 alloy. Shape of the Vickers indentations demonstrates that the material has rather high plasticity after annealing.

Бушкевич Иулиана Алексеевна, студентка 5 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, uyluana@gmail.com.

Научный руководитель – *Шепелевич Василий Григорьевич*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, shepelevich@bsu.by.

УДК 537.311.322

А. М. ВЕЛИЧКО

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОЛОСЫ ПОГЛОЩЕНИЯ МЕЖДОУЗЕЛЬНОГО КИСЛОРОДА В ГЕРМАНИИ

Исследуется температурная зависимость положения и формы полосы поглощения локальной колебательной моды междоузельного кислорода в кристаллическом германии, обогащенном кислородом до концентрации $1{,}65 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$. Показано, что максимум полосы поглощения кислорода линейно зависит от температуры измерения.

Кислород в германии является основной технологической примесью и одним из основных элементов активно участвующим в термическом дефектообразовании. Однако экспериментальные данные о свойствх кислорода, особенно, в германии остаются до настоящего времени невыясненными [1; 2], который является основным материалом в оптоэлектронике.

В настоящей работе исследовались кристаллы Ge (удельное сопротивление ρ = 4,3 Ом · см) с концентрацией междоузельного кислорода (Oi) $1{,}65 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$, который вводился при росте кристаллов в атмосфере паров воды. Для сравнительного анализа использовались образцы Ge (ρ = 10 Ом · см) с низким ($\leq 5 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$) содержанием O_i. Междоузельный кислород (O_i) в германии (Ge) обуславливает появление локальных колебательных мод (ЛКМ) с частотами выше граничных частот фононов (306 см$^{-1}$ для Ge). В настоящей работе приводятся результаты исследования температурных зависимостей положения полосы антисимметричного валентного колебания молекулы ν_3 Ge_2O (855 см$^{-1}$ при комнатной температуре) в Ge. Концентрация O_i определялась из измерений коэффициента поглощения в максимуме полосы 855 см$^{-1}$ с использованием

калибровочного множителя $0{,}95 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$ [2]. Однако до сих пор не установлена точно температурная зависимость смещения полосы ν_3.

С этой целью были проведены измерения спектров ИК-поглощения на фурье-спектрометре Brucker IFS-113v со спектральным разрешением ≈0,5 см$^{-1}$ в температурном интервале (12–300) К.

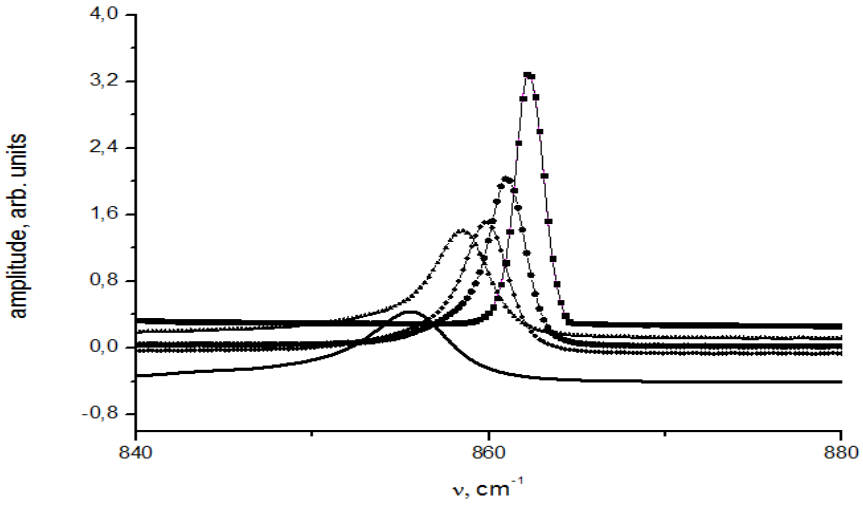


Рисунок 1 – Спектр поглощения антисимметричной колебательной моды междоузельного кислорода ν_3 в Ge как функция температуры

На рисунке представлены спектры ЛКМ O_i в Ge при различных температурах. Из анализа рисунка видно, что полоса поглощения с увеличением температуры измерения смещается в область более низких значений волнового числа.

На рисунке 2 представлена зависимость волнового числа в максимуме полосы поглощения ν_3 междоузельного кислорода O_i от температуры. Сплошной линией на этом рисунке представлена линейная аппроксимация полученной зависимости:

$$\nu_3 = 864 - 0{,}03T\ .$$

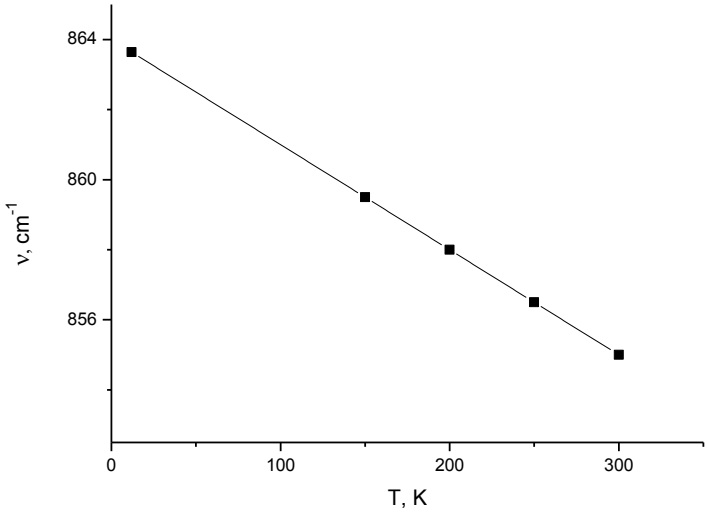


Рисунок 2 – Зависимость частоты ν максимума пика от температуры T

Таким образом, показано, что полоса антисимметричного валентного колебания молекулы ν_3 Ge_2O (855 см$^{-1}$ при комнатной температуре) смещается с уменьшением температуры в область более высоких значений волновых чисел. Значение волнового числа в максимуме полосы описывается линейной зависимостью. По нашему мнению, наблюдаемый эффект обусловлен деформацией структуры решетки германия с изменением температуры, что в рамках модели ангармонического кристалла [3] приводит к изменению упругой постоянной в молекуле Ge_2O.

Список литературы

1. Хируненко, Л. И. Структура ИК поглощения в германии / Л. И. Хируненко // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 24, № 6. – С. 1051–1055.
2. Calibration Factor for Determination of Interstitial Oxygen Concentration in Germanium by Infrared Absorption / V. V. Litvinov [et al.] // Solid State Phenomena. – 2005. – Vol. 108–109. – P. 735–740.
3. Ансельм, А. И. Введение в теорию полупроводников : моногр. / А. И. Ансельм. – М. : Наука, 1978. – 453 с.

In this work, the temperature dependence of the position and shape of the absorption band of the local vibrational mode of interstitial oxygen in crystalline germanium enriched with oxygen to a concentration of $1{,}65 \cdot 10^{17}$ cm^{-3} is investigated. It is shown that the maximum of the oxygen absorption band linearly depends on the measurement temperature.

Величко Анна Михайловна, студентка физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, annavelicko@mail.ru.

Научные руководители – *Покотило Юрий Мефодьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры энергофизики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, pokotilo@bsu.by.

Смирнова Ольга Юрьевна, старший преподаватель кафедры физической оптики и прикладной информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

УДК 544.18

С. Д. ГОГОЛЕВА

КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ОСНОВНОГО И ВОЗБУЖДЁННОГО СОСТОЯНИЙ КАТИОНА МОЛЕКУЛЫ 2-[4’-(ДИМЕТИЛАМИНО)ФЕНИЛ]-6-МЕТИЛ-БЕНЗТИАЗОЛА

Приведены результаты квантово-химических расчётов энергии основного и возбужденного состояний тиофлавина Т и катиона 6-Me-BTA-2 в зависимости от двугранного угла между плоскостями их фрагментов. Производится сравнение поверхностей их потенциальной энергии в основном и возбуждённом состоянии, а также обсуждается возможность протекания TICT-процесса в возбужденном состоянии 6-Me-BTA-2.

На сегодняшний день наблюдается рост числа работ, посвящённых созданию сенсоров вязкости микроокружения. Для этих целей могут подойти такие молекулы как флуоресцентные молекулярные роторы (ФМР), в которых после фотовозбуждения протекает реакция переноса заряда, сопровождающаяся взаимным вращением фрагментов молекулы друг относительно друга (TICT-процесс) с образованием нефлуоресцирующего состояния. Ярким примером ФМР может послужить молекула тиофлавина Т (ThT) [1]. Целью данной работы являлось изучение структуры и электронных свойств катиона 2-[4'-(диметиламино) фенил]-6-метил-бензтиазола (6-Me-BTA-2) (производного ThT) (рисунок 1) и оценка возможности протекания TICT-процесса в возбуждённом состоянии.

В данной работе рассчитывались и исследовались поверхности потенциальной энергии основного и возбужденного состояний ThT и катиона 6-Me-BTA-2 (рисунок 2).

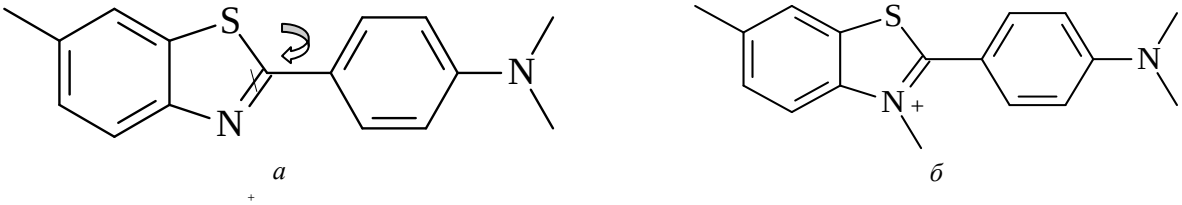


Рисунок 1 – Структурные формулы катиона 6-Me-BTA-2 (а) и ThT (б)

С помощью программы FireFly 8.0.1 [2; 3] были рассчитаны значения энергии молекул 6-Me-BTA-2 и ThT в зависимости от угла φ между плоскостями бензтиазола и анилина (рисунок 1) в состояниях S_0 и S_1 (рисунок 2*а*), а также зависимость силы осциллятора перехода S_0-S_1 для 6-Me-BTA-2 от угла φ (рисунок 2*б*) методом функционала матрицы плотности TDDFT/DFT B3LYP с использованием базиса 6-31G(d).

Из рисунка 2*а* видно, что в отличие от ThT, где минимум энергии основного состояния приходится для конформаций с углом φ ≈ 37°, катион 6-Me-BTA-2 принимает плоскую конформацию в основном состоянии S_0 с минимумами энергии при φ = 0° и 180°.

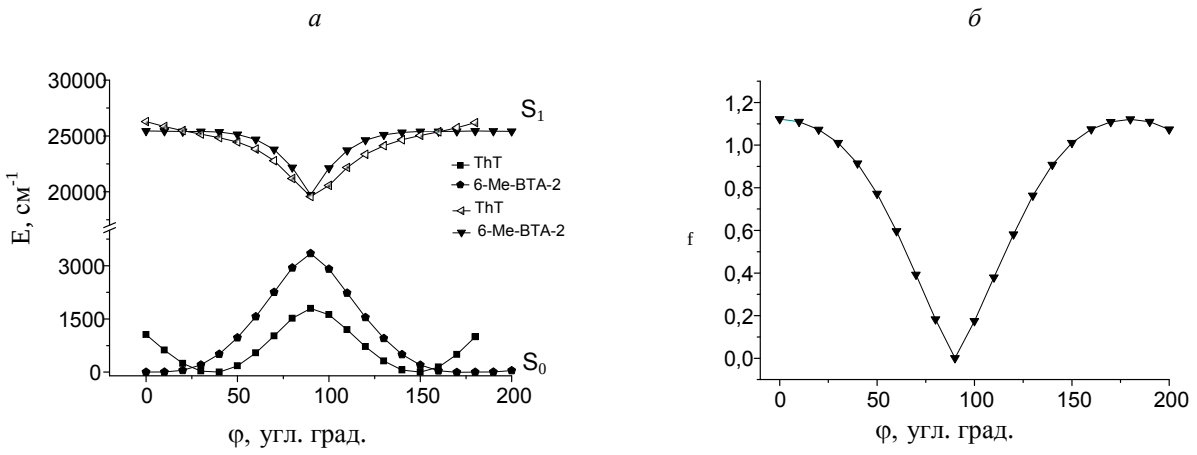


Рисунок 2 – Энергия ThT и катиона 6-Me-BTA-2 в зависимости от угла φ в состояниях S_0 (метод DFT B3LYP/6-31G(d)) и S_1 (метод TDDFT//B3LYP/6-31G (d)) (*а*) и зависимость силы осциллятора *f* оптического перехода $S_0 \rightarrow S_1$ для 6-Me-BTA-2 от угла φ (метод TDDFT//B3LYP/6-31G(d)) (*б*)

При облучении светом переход в первое возбужденное состояние S_1 (рисунок 2*а*) для 6-Me-BTA-2 будет наиболее вероятен для молекул с конформациями при φ ~ 0° и 180° (для копланарных конформаций $f \sim 1$) и практически запрещен при φ ~ 90° и 270° ($f \sim 0$) (рисунок 2*б*). Снижение силы осциллятора дипольного перехода $S_0 \rightarrow S_1$ с $f \sim 1$ при углах φ в диапазоне 0°–30° до $f \sim 0$ при φ ~ 90°, может свидетельствовать об изменении природы S_1 состояния, т. е. о переходе между флуоресцентным LE- и нефлуоресцентным TICT-состояниями [4; 5].

Как видно из рисунка 2*а*, существует энергетический барьер для вращения фрагментов ThT и 6-Me-BTA-2 в состоянии S_0, численные значения которого достигают E (S_0, φ = 90°) – E(S_0, φ = 37°) = 1760 см$^{-1}$ для ThT и E (S_0, φ = 90°) – E(S_0, φ = 0°) = 3347 см$^{-1}$ для 6-Me-BTA-2. Различия в значениях энергии барьера обусловлены стерическими взаимодействиями CH_3 группы с атомами водорода бензола в ThT. Принимая во внимание, что при T ~ 300 K величина k_BT составляет порядка 210 см$^{-1}$, можно сделать вывод, что при нормальных условиях в ThT и 6-Me-BTA-2 свободное вращение фрагментов вдоль C-C связи не реализуется и в состоянии S_0 могут наблюдаться лишь конформеры с углами φ ~ 0° и ~ 180° для 6-Me-BTA-2 и φ ~ 37° (180°±37°) для ThT [4; 5].

Произведен расчет формы граничных молекулярных орбиталей 6-Me-BTA-2 при двух углах φ (0° и 90°) (рисунок 3). Как видно из рисунка 3, в отличие от конформаций с углом φ = 0°, в случае конформации с углом φ = 90° не происходит перекрывание высшей занятой (HOMO) и низшей свободной (LUMO) молекулярных орбиталей, что объясняет причину нулевого значения силы осциллятора перехода $S_0 \rightarrow S_1$ при φ = 90°.

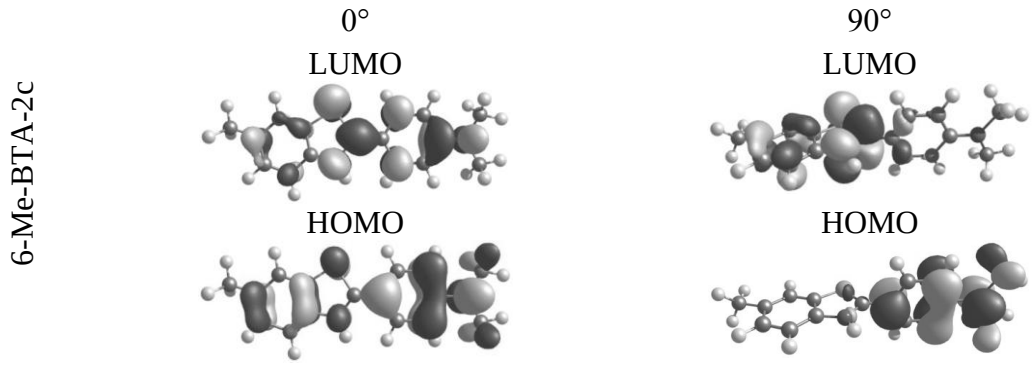


Рисунок 3 – Форма орбиталей катиона 6-Me-BTA-2 при торсионных углах φ = 0° и 90°

Кроме того, как видно из рисунка 3, если предположить, что форма HOMO и LUMO орбиталей для структур, оптимизированных в состояниях S_0 и S_1, не сильно изменяется, можно видеть, что при повороте фрагментов молекул в состоянии S_1 меняется характер локализации LUMO орбитали, что иллюстрирует факт переноса заряда между двумя фрагментами 6-Me-BTA-2.

Таким образом, результаты расчетов (рисунки 2 и 3) позволяют предположить, что после перевода молекул 6-Me-BTA-2 в локально возбужденное состояние LE (S_1) происходит внутримолекулярный перенос

заряда, сопровождаемый структурной релаксацией с изменением угла φ от 0° до ±90°, что позволяет отнести изучаемую молекулу к классу ФМР.

Список литературы

1. Thioflavin T as a molecular rotor: fluorescent properties of thioflavin T in solvents with different viscosity / V. I. Stsiapura [et al.] // The Journal of Physical Chemistry B. – 2008. – Vol. 112, №. 49. – P. 15893–15902.

2. Firefly (formerly PC GAMESS) Home Page [Electronic resource]. – Mode of access: http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html. – Data of access: 12.02.2016.

3. General atomic and molecular electronic structure system / M. W. Schmidt [et al.] // Journal of computational chemistry. – 1993. – Vol. 14 (11). – P. 1347–1363.

4. Гоголева, С. Д. Квантово-химические расчеты производных тиофлавина Т (ВТА-0, ВТА-1, ВТА-2) / С. Д. Гоголева, В. И. Степуро // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 1. – С. 96–104.

5. Neutral derivatives of Thioflavin T do not exhibit viscosity-dependent fluorescence / S. D. Gogoleva [et al.] // Journal of Photochemistry and Photobiology. A : Chemistry. – 2018. – Vol. 358. – P. 76–91.

The paper presents results of quantum-chemical calculations of energy of the ground and excited states of thioflavin T and 6-Me-BTA-2, depending on the dihedral angle between their fragments. A comparison of their potential energy surfaces in the ground and excited states is made, and the possibility of assigning 6-Me-BTA-2 to the class of fluorescent molecular rotors is discussed.

Гоголева Светлана Дмитриевна, аспирант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, gogoleva.svetlana1@mail.ru.

Научный руководитель – *Степуро Виталий Иванович*, кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИЧ Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, stsiapura@gmail.com.

УДК 535.391

И. К. ГУБАРЕВИЧ

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ПАРОПЛАЗМЕННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕТАЛЛЫ

Показано, что при изменении напряженности внешнего электрического поля различной полярности от 0 до 10^6 В/м в ходе воздействия лазерного излучения со средней плотностью потока ~ 10^6 Вт/см^2 на поверхность металлов, изменение особенностей эволюции плазменного факела на ранних стадиях носит количественный, а не качественный характер.

В связи с постоянным расширением сферы технологических применений лазеров возникают новые задачи, для решения которых необходимо изучение процессов, происходящих при воздействии световых потоков на поверхность твёрдого тела. Подобные исследования особенно важны для выбора наиболее эффективных режимов лазерной обработки материалов, включая лазерный раскрой, перфорацию, сварку материалов, модификацию свойств их поверхности, лазерное напыление пленок, а также для разработки новых методов контроля лазерных технологических процессов.

Большой интерес вызывает изучение процессов в образующемся у поверхности облучаемого образца пароплазменном облаке, т. к. они самым существенным образом влияют на ход обработки материала, его структуру, химические, механические, термодинамические и другие характеристики обрабатываемого вещества. Актуальным является изучение закономерностей изменения рельефа твёрдых тел в процессе их облучения импульсным лазерным излучением в различных внешних условиях, в частности при наличии внешних электрических полей.

Целью данной работы является исследование влияния электрических полей различной напряженности (от 0 до 10^6 В/м) на пространственную и временную эволюцию лазерной плазмы, возникающей при воздействии миллисекундных лазерных импульсов на поверхности металлов (медь, алюминий, олово, свинец)

Схема экспериментальной установки, использовавшейся в работе, была следующей [1]. Излучение рубинового лазера ГОР-100М, работавшего в режиме свободной генерации (длительность импульса $\tau \sim 1{,}2$ мс, $\lambda = 0{,}694$ мкм; временная форма импульса излучения приведена на рисунке 1), пройдя через фокусирующую систему, направлялось через отверстие в электроде на образец, который сам являлся вторым электродом. Образец располагался в воздухе при давлении 10^5 Па. Диаметр D полученного таким образом пятна излучения с резкими краями варьировался в ходе экспериментов от 1 до 2 мм.

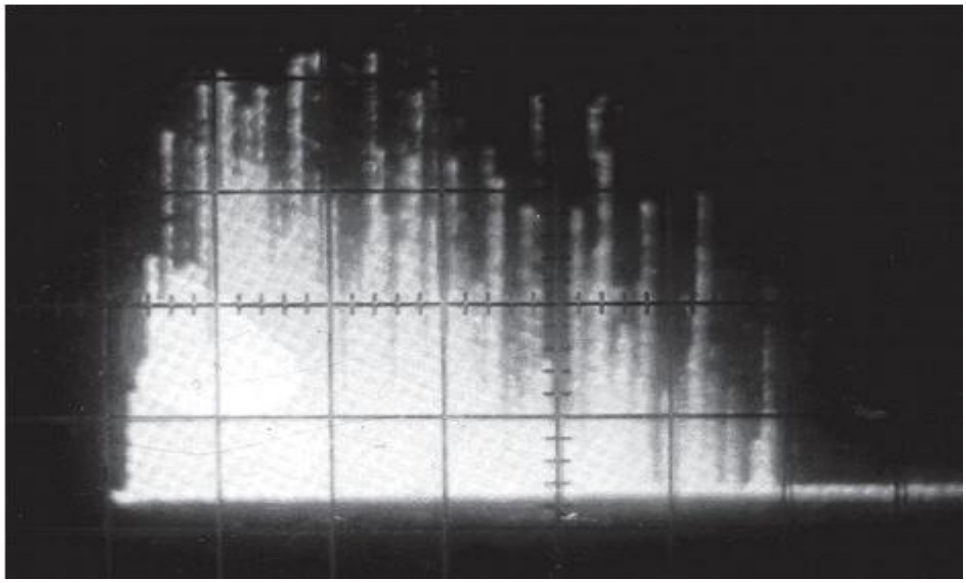


Рисунок 1 – Временная форма лазерного импульса

Часть (~ 4 %) лазерного излучения (далее – ЛИ) направлялась передней гранью стеклянного клина в измеритель энергии ИМО-2Н. Энергия лазерных импульсов E_0 варьировалась в пределах от 5 до 60 Дж. Коаксиальный фотоэлемент ФЭК-14, сигнал с которого подавался на вход осциллографа С8-13, использовался для регистрации временной формы лазерного импульса. Напряжение на электроды подавалось от источника, созданного на базе умножителя напряжения УН 9/27-13 блока ТВС-110. Источник позволял изменять напряжение в пределах до 25 кВ и при этом поддерживать его стабильным во время проведения эксперимента.

Для изучения пространственной и временной эволюции лазерного факела в ходе воздействия ЛИ на образец использовался метод скоростной голографической киносъемки. Межэлектродный промежуток помещался в одно из плеч интерферометра Маха – Цендера. Интерферометр освещался излучением рубинового лазера (λ = 0,694 мкм), работавшего в режиме свободной генерации. Длительность импульса излучения зондирующего лазера составляла ~ 400 мкс. Селекция поперечных мод зондирующего лазера осуществлялась диафрагмой, помещенной внутрь резонатора, а продольных – эталоном Фабри – Перо, использовавшимся в качестве выходного зеркала. Зондирующее излучение направлялось в коллиматор, позволявший получать параллельный световой пучок диаметром до 3 см, что позволило наблюдать за развитием пароплазменного облака.

Интерферометр был состыкован со скоростной фоторегистрирующей камерой СФР-1М, плоскость фотопленки в которой была сопряжена с меридиональным сечением воздействующего на образец лазерного луча при помощи объектива. Скоростная камера работала в режиме лупы времени. Описанная схема позволяла регистрировать развернутые во времени голограммы сфокусированного изображения лазерного факела. Полученные отдельные кадры голограмм обеспечивали временное разрешение не хуже 1 мкс (время экспозиции одного кадра) и пространственное разрешение по полю объекта ≈ 50 мкм.

На рисунке 2 (*а*, *б*, *в*) приведены интерферограммы, восстановленные с голограмм, зарегистрированных в различные моменты времени в ходе скоростной голографической киносъемки. Рисунок наглядно иллюстрирует как начальный этап развития лазерного факела, так и обтекание плазмой электрода *3* при различных направлениях вектора напряженности внешнего электрического поля.

На рисунке 2 (*г*, *д*, *е*) приведены полученные на основании обработки интерферограмм данные по распределению плотности свободных электронов плазмы испаренного металла в различные моменты времени. Несмотря на то, что распределение энергии по пятну фокусировки ЛИ неравномерно, линии равной концентрации электронов имеют практически гладкий вид, что свидетельствует об относительно однородной ионизации паров эродированного вещества. Существенно, что, несмотря на значительное увеличение во времени объема плазменного образования, средняя плотность электронов в факеле остается практически неизменной и даже несколько увеличивается, что может быть связана как с постоянным увеличением массы вынесенного вещества, так и с вторичной ионизацией плазмы ЛИ. Отметим, что наличие внешнего электрического поля слабо влияет на концентрацию электронов в лазерном факеле.

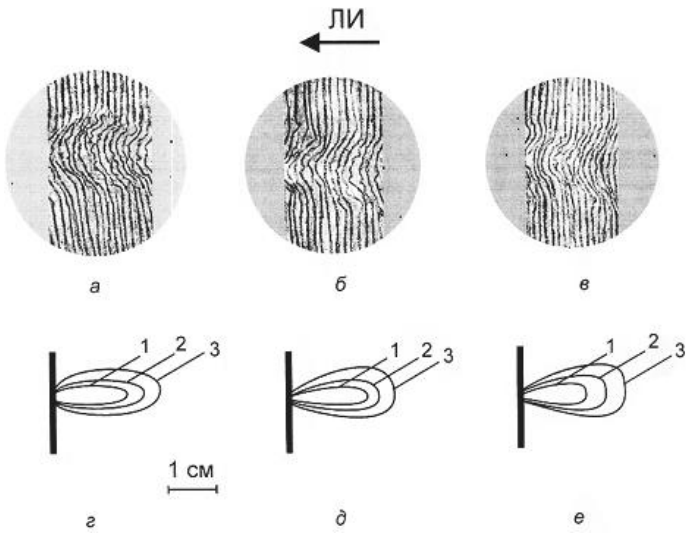


Рисунок 2 – Интерферограммы (*а, б, в*) и изолинии полей электронной плотности плазменного факела (*г, д, е*) при отрицательном потенциале мишени (*а, г*), без электрического поля (*б, д*) и при положительном потенциале мишени (*в, е*) в момент времени 72 мкс после начала воздействия ЛИ (3 соответствует концентрации электронов 10^{18}; 2 – 2,5 · 10^{18}; 1 – 5 · 10^{18})

При расстоянии между электродами 2 см максимальный поперечный размер пароплазменного облака на поверхности электрода составлял 2 см при отрицательном напряжении на мишени, 1,7 см без внешнего электрического поля и 1,5 см при положительном напряжении на мишени. Это можно наблюдать как на интерферограммах, так и по ожогу на защищающей второй электрод полиэтиленовой пленке. Как видно из интерферограмм, достигнув второго электрода через 56, 64 и 72 мкс соответственно, пароплазменное облако практически не увеличивается в своих поперечных размерах. Возможно, это связано с вытеканием плазмы из межэлектродного промежутка через отверстие в электроде, которое используется для прохождения лазерного излучения к мишени (диаметр отверстия 1 см). Быстрому разлету плазменного образования препятствует противодавление воздуха [2], факел затухает постепенно, существуя еще некоторое время после окончания лазерного импульса, а давление плазмы способствует образованию гладкой внутренней поверхности кратера.

Список литературы

1. 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.

2. Влияние давления фонового газа на качество лазерной обработки металлов / С. В. Васильев [и др.] // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 89–100.

On varying of different directed electric field tension from 0 to 10^6 V/m on treating of metal surfaces (Cu, Al, Sn, Pb) by laser radiation with average intensity ~ 10^6 W/cm^2 the changes of laser plasma evolution nature are quantitative but not qualitative.

Губаревич Игорь Константинович, аспирант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, i.gubarevich@grsu.by.

Научный руководитель – *Васильев Сергей Валерьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, s.vasilijev@grsu.by.

УДК 539.21

А. Ю. ЕВДОКИМОВ

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОМ СИЛУМИНЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

Рассматривается воздействие компрессионного плазменного потока на поверхность заэвтектического силумина.

Силумин является сплавом алюминия и кремния. Особенно перспективным сплавом является заэвтектический силумин – это силумин с содержанием кремния более 12 %. Но его недостатком является высокая пористость вследствие ликвации первичного кремния [1]. В данной работе используется образец, характеризующийся высокой пористостью. Снижение пористости может быть достигнуто путём модифицирования поверхности высокоэнергетическим потоком, которое приводит к перераспределению элементов сплава и изменению структурно-фазового состояния. Поэтому целю данной работы являлось изучение изменений структуры заэвтектического силумина при обработке компрессионным плазменным потоком (КПП).

В данной работе использовался силумин с содержанием кремния 22 %, изготовленный в виде пластинок толщиной 5 мм. Образец обрабатывался КПП в остаточной атмосфере азота при давлении в 400 Па последовательными импульсами. Длительность интервалов между импульсами составляла 20 с, а длительность самого импульса – 100 мкс. В экспериментах изменялась плотность энергии, поглощаемая образцом, за счёт изменения расстояния между ним и электродами.

С помощью рентгеноструктурного анализа исследовался фазовый состав модифицированных слоев. Измерение проводилось на дифрактометре Rigaku Ultima IV в медном излучении. Морфология поверхности изучалась с помощью оптического микроскопа (рисунки 1, 2).

В работе устанавливалось влияние структурных изменений в заэвтектическом силумине на механические свойства сплава, что определялось при измерении микротвёрдости по методике Виккерса (при нагрузке в 50 грамм).

На рисунке 3 представлена рентгенограмма заэвтектического силумина до воздействия КПП. На рентгенограмме присутствует совокупность дифракционных максимумов, соответствующих алюминию и кремнию. Алюминий имеет параметр кубической решётки –3,26, для кремния данный парамет –4,37.

В результате воздействия КПП поверхностный слой образца оплавился, о чём свидетельствует морфология поверхности (рисунок 2). Так же после воздействия КПП микротвёрдость сплава изменилась с 12 ГПа до 4 ГПа. Изменение микротвёрдости может быть связано с перераспределением элементов в сплаве [2].

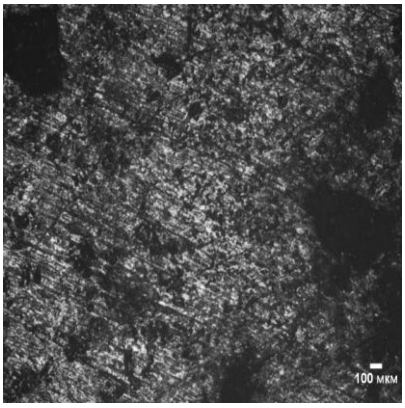


Рисунок 1

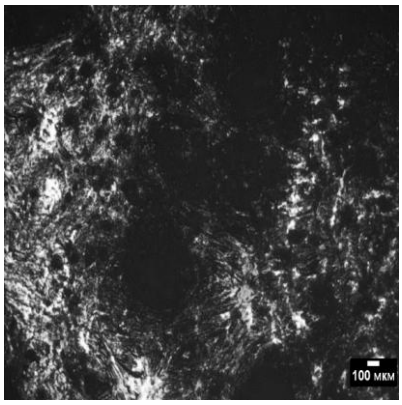


Рисунок 2

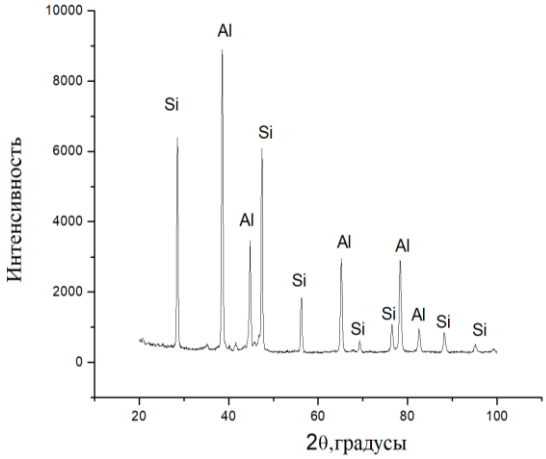


Рисунок 3

В данной работе был изучен образец заэвтектического силумина до и после воздействия КПП. Была снята рентгенограмма и посчитаны параметры решётки кремния и алюминия. Также в данной работе наблюдалось изменение морфологии поверхности. Было определенно, что при воздействии КПП на заэвтектический силумин микротвёрдость изменяется.

Список литературы

1. Марукович, Е. И. Получение отливок из заэвтектического силумина методом литья закалочным затвердеванием / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Литьё и металлургия. – 2005. – № 2. – С. 142–144.

2. Применение высокоинтенсивных электронных пучков для модификации структуры и свойств силумина / Ю. Ф. Иванов [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2014. – № 3. – С. 149–152.

In this work, we will consider the effect of compression plasma flow on the surface of the Al-Si alloy with high Si content.

Евдокимов Антон Юрьевич, студент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, jevdokimovanton@gmail.com.

Научный руководитель – *Шиманский Виталий Игоревич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, shymanskiv@mail.ru.

УДК 541.15

В. П. ЕВСТИГНЕЕВА, K. CZARNECKA

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ СПЛАВОВ CoNiFe, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлены результаты исследования температурной зависимости удельного сопротивления в магнитном переменном поле покрытий CoNiFe, электроосажденных при воздействии рентгеновского излучения. Температурные зависимости для данных покрытий обнаружены при нулевом магнитном поле, а также при частоте внешнего переменного поля 5 МГц.

Гальванические сплавы CoNiFe относятся к материалам, которые сохраняют свою магнитную проницаемость в слабых магнитных полях, благодаря чему широко используются в промышленности. В первую очередь данные сплавы применяются для создания магнитных элементов, которые имеют большой магнитный поток, в частности в трансформаторах тока и измерительных приборах. Одним из недостатков покрытий CoNiFe является их незначительное удельное электрическое сопротивление, которое приводит к большим потерям на вихревой ток, если работа осуществляется в переменных магнитных полях. Известно, что магнитосопротивление зависит от ориентации магнитного поля, что связано с тем, что магнитное поле не изменяет проекцию скорости частиц на направление магнитного поля, но благодаря силе Лоренца закручивает траектории в плоскости, перпендикулярной магнитному полю [1]. Поэтому актуальным является разработка новых способов осаждения магнитных сплавов CoNiFe, которые обладали бы улучшенными магнитными и электрическими свойствами.

Согласно [2–3] метод электроосаждения покрытий при воздействии рентгеновского излучения на электролит позволяет модифицировать структуру и свойства получаемых покрытий, вследствие радиационно-химических реакций, протекающих в облучаемых электролитах. Представляло интерес исследовать магнитосопротивление магнитных сплавов CoNiFe, сформированных в поле рентгеновского излучения при различных температурах. Покрытия осаждались из сульфатных электролитов, при плотности тока 2 А/дм^2, при температуре 299 К в поле рентгеновского излучения ($P_{экс}$ = 100 кР/ч). Исследования удельного электрического сопротивления в магнитном поле в температурном интервале от 293 К до 648 К на кафедре электротехнических устройств и высоких напряжений Люблинского политехнического института (Польша).

Зависимости удельного сопротивления от частоты внешнего магнитного поля при различных температурах представлены на рисунке 1.

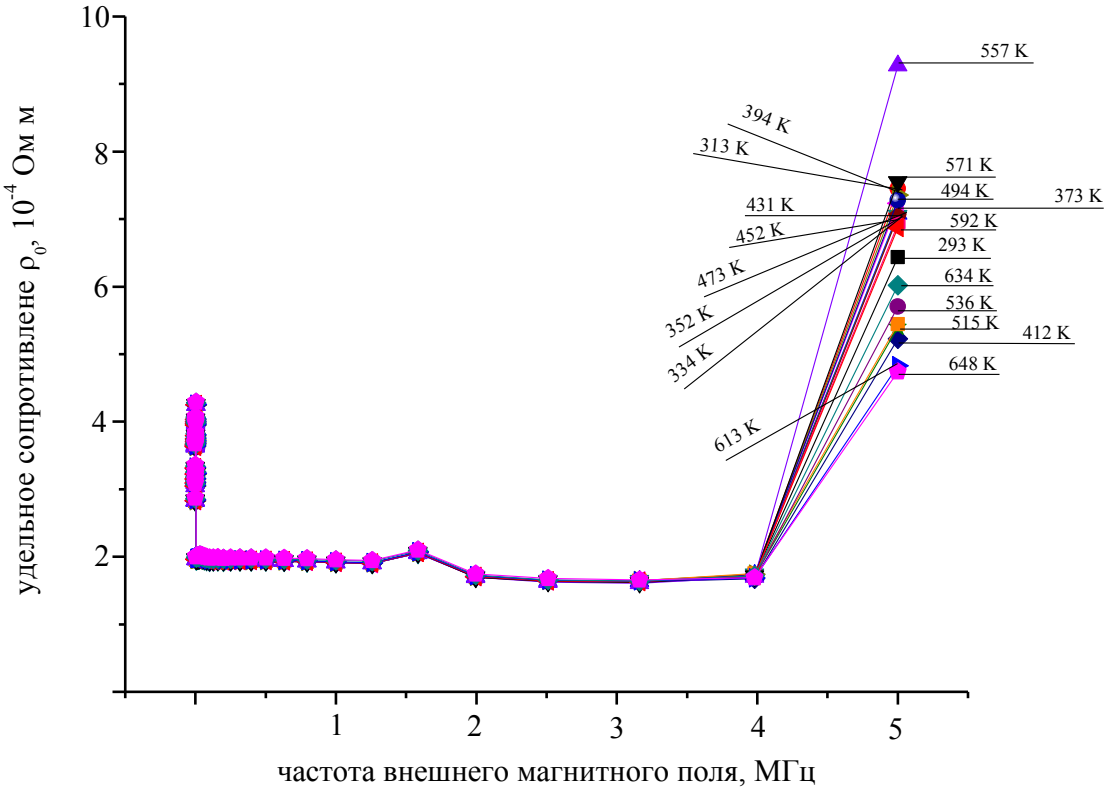


Рисунок 1 – Зависимость удельного сопротивления покрытий CoNiFe от частоты внешнего переменного магнитного поля при различных температурах

Как видно на рисунке 1, в нулевом внешнем магнитном поле удельное сопротивление заметно снижается с уменьшением температуры, а при температуре 20 К достигает значения менее, чем $2 \cdot 10^{-4}$ Ом·м. Уменьшение удельного сопротивления с понижением температуры связано с уменьшением амплитуды и частоты тепловых колебаний атомов сплава, а также связанных с ними флуктуаций периодического поля решетки. При наложении переменного магнитного поля происходит закономерное изменение электрического сопротивления и уменьшение эффекта воздействия температуры, который наблюдается в нулевом магнитном поле. Из рисунка 1 видно, что удельное сопротивление не зависит от температуры в магнитном переменном поле с частотой, не превышающей 4 МГц. При частоте переменного поля выше данного значения наблюдается увеличение удельного сопротивления, однако явной температурной зависимости для контрольных CoNiFe не наблюдается.

Самое большое значение удельного сопротивления CoNiFe наблюдается при частоте 5 МГц и температуре 557 К.

На рисунке 2 показана зависимость удельного сопротивления от частоты внешнего переменного магнитного поля покрытий CoNiFe, сформированных в поле рентгеновского излучения. Видно, что удельное сопротивление практически постоянное только до 1,5 МГц. В отличие от контрольных покрытий, у покрытий, сформированных в поле рентгеновского излучения, наблюдается четкая температурная зависимость при частоте переменного магнитного поля 5 МГц: с увеличением температуры удельное электросопротивление растет.

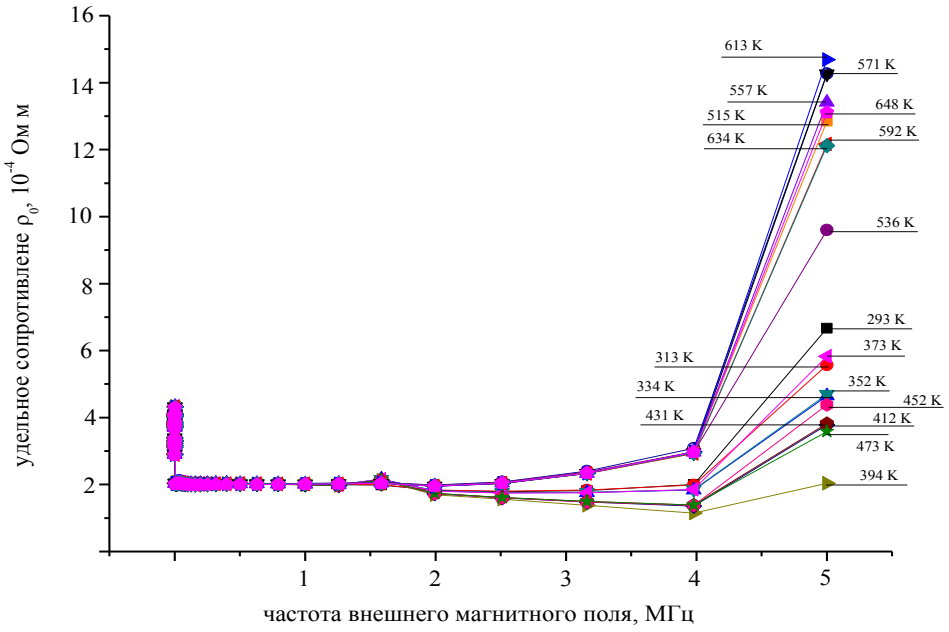


Рисунок 2 – Зависимость удельного сопротивления покрытий CoNiFe, сформированных в поле рентгеновского излучения, от частоты внешнего переменного магнитного поля при различных температурах

Список литературы

1. Магнитосопротивление [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/-Магнитосопротивление. – Дата доступа: 26.02.2019.

2. Valko, N. Forming a structure of the CoNiFe alloys by X-ray irradiation / N. Valko, A. Kasperovich, T. N. Koltunowicz // Functional Materials Letters. – 2018. – Т. 11, № 2. – 1850044 (4 pages).

3. Valko, N. Electrodeposition of CoNiFe coatings in the presence of the X-rays / N. Valko, A. Kasperovich // Procedings of international conference. Nanomaterials: Applications and properties. Nap. – 2016. – Vol. 5, № 1. – 01NTF15 (3pp).

The paper presents the results of a study of the temperature dependence of resistivity of CoNiFe coatings in the magnetic field electrodeposited under effect of x-rays. Temperature dependences for these coatings were found without the magnetic field, and for the frequency of magnetic field equaled 5 MHz.

Евстигнеева Виктория Павловна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, vviikkaa41@gmail.com.

Czarnecka Karolina, аспирант кафедры электротехнических устройств и высоких напряжений Люблинского политехнического университета, Люблин, Польша, t.koltunowicz@pollub.pl.

Научные руководители – *Валько Наталья Георгиевна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, n.valko@grsu.by.

Koltunowicz Tomasz, доктор физико-математических наук, кафедра электротехнических устройств и высоких напряжений Люблинского политехнического университета, Люблин, Польша, t.koltunowicz@pollub.pl.

УДК 537.311.322

Д. С. ЁРШ, А. И. ПРОТАСЕНЯ

ДЕФЕКТЫ В КРЕМНИИ *n*-ТИПА, ИМПЛАНТИРОВАННОМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ ВОДОРОДА

Методом DLTS исследован энергетический спектр уровней радиационных дефектов в эпитаксиальном кремнии *n*-типа, облученном ионами водорода с энергией 300 кэВ. В облученных образцах наблюдаются точечные A-, E-центры и водородосодержащий дефект с уровнем E_c-0,31 эВ. Показано, что комплексы с уровнем E_c-0,31 образуются путем присоединения к A-центру атомов водорода. При T > 150 °C этот дефект начинает отжигаться, и одновременно восстанавливается A-центр.

При облучении кремния *n*-типа частицами (протоны, электроны, ©-кванты) образуются пары Френкеля (вакансия – междоузельный атом), часть из которых рекомбинирует, а остальные участвуют в формировании таких основных устойчивых дефектов, как дивакансия, комплекс кислород-вакансия (А-центр) и легирующая примесь-вакансия (Е-центр) [1]. Однако, облучение ионами H^+ вследствие высокой реакционной способности атомарного водорода обуславливает следующие особенности. С одной стороны, водород сам выступает в качестве эффективной ловушки для компонент пар Френкеля, существенно понижая скорость введения радиационных дефектов (РД). С другой стороны, при взаимодействии с РД водород либо полностью пассивирует, либо частично изменяет их электрические свойства [2].

Целью настоящей работы являлось сравнительное исследование методом DLTS процессов образования РД в кремнии, облученном ионами H^+ и ©-квантами ^{60}Co.

Исследования спектров DLTS проводились на (Mo-Si) диодах Шоттки, где активным базовым слоем являлся эпитаксиальный кремний, легированный фосфором, с удельным сопротивлением ρ = 1,2 Ом·см и толщиной *x* = 5 мкм.

На рисунке 1 приведены спектры DLTS для диодов Шоттки, облученных ©-квантами ^{60}Co и ионами H^+, нормированные по амплитуде самого высокотемпературного пика. Значения параметров дефектов и их идентификация, согласно зависимостям Аррениуса и литературным данным [2], в таблице. На рисунке 2 приведены данные изохронного отжига исследуемых дефектов. Из анализа полученных результатов следует, что при обоих видах облучения вводятся А-центры (1), Е-центры (4) и незначительное количество дивакансий $W^{=/-}$ (2). Более глубокое состояние дивакансии $W^{-/0}$ маскируется, по нашему мнению, мощным пиком (4), который мы, исходя главным образом из температуры его отжига ~150 °С (см. таблицу), идентифицировали как Е-центр. К особенностям протонного облучения, как следует из рисунка 2, можно отнести, во-первых, появление нового дефекта с уровнем E_c-0,31 эВ и, во-вторых, более низкий относительный вклад А-центра, который при ©-квантах (рисунок 2, кривая 1) и электронном облучении доминирует в спектре DLTS.

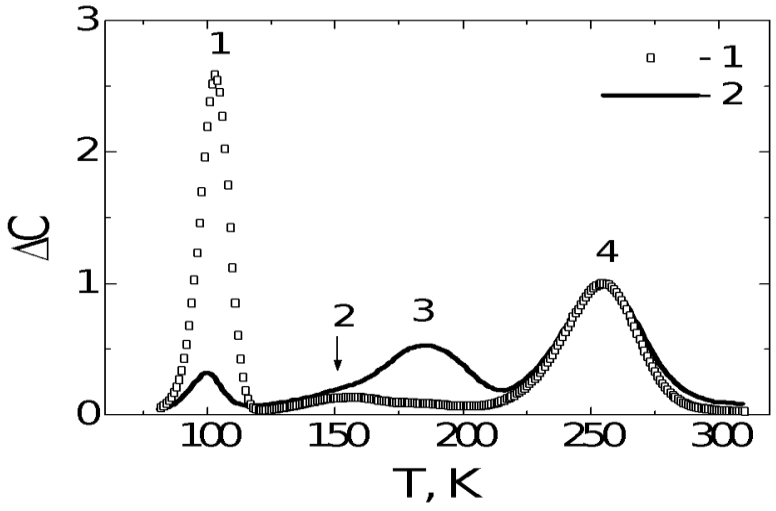


Рисунок 1 – Спектры DLTS (| = 0,52 мс) для диодов Шоттки, облучённых ©-квантами (1) и ионами водорода (2)

Таблица 1 – Основные параметры уровней радиационных дефектов в кремнии, облучённом ионами H^+ и ©-квантами

Номер пика	Энергия уровня, эВ	Сечение захвата, 10^{-15} см^2	Температура отжига, °С	Идентификация
1	E_c-(0,165±0,05)	5×2	350	$(V\text{-}O)^{0/-}$, А-центр
2	E_c-0,21	0,1	–	$W^{-/=}$, дивакансия
3	E_c-0,31	1,6	250	Н-центр
4	E_c-(0,42±0,01)	1×0,3	150	$(P\text{-}V)^{-/0}$, Е-центр

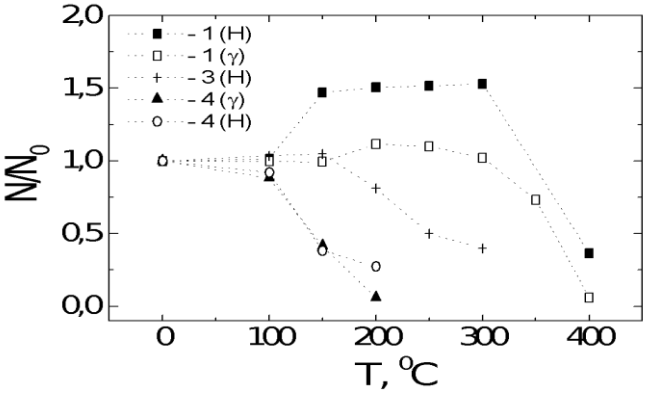


Рисунок 2 – Изохронный (20 мин.) отжиг соответствующих пиков DLTS, представленных на рисунке 1. Вид облучения указан в скобках

Образование водородосодержащего дефекта с уровнем E_c-0,31 эВ происходит за счет А-центра. Действительно, в работах [2; 3] показано, что низкотемпературное введение водорода в процессе химической полировки кремния, предварительно облученного электронами, приводит к сокращению А-центров за счет присоединения к ним атома водорода и образования нового дефекта с уровнем E_c-0,31 эВ, идентифицированного, как VOH-комплекс. В пользу механизма пассивации А-центра свидетельствуют и наши данные по изохронному отжигу, приведенные на рисунке 2. Видно, что отжиг VOH-комплекса сопровождается восстановлением А-центра. В то же время отжиг А-центра в образце, облученном ©-квантами, протекает без увеличения его концентрации. Показано, что этот дефект образуется путем присоединения атома водорода к А-центру, так как при его отжиге происходит восстановление последнего.

Список литературы

1. Watkins G. D., Corbett J. W. // Phys. Rew. – 1965. – Vol. 138. – P. A543.
2. Hydrogen in Crystalline Semiconductors / S. J. Pearton [et al.]. – Springer, Berlin, 1992. – 363 c.
3. Бургуэн, Ж. Точечные дефекты в полупроводниках / Ж. Бургуэн, М. Лаппо. – М. : Мир, 1985. – 304 с.

Using the DLTS method, researchers of the energy spectrum of the levels of radiation defects in *n*-type epitaxial silicon with hydrogen ions and an energy of 300 keV. In the irradiated samples, point A-, E-centers and a hydrogen-containing defect with a level of Ec-0.31 eV are observed. It is shown that the complexes with the level of Ec-0.31. At T > 150 °C, this defect begins to anneal, and at the same time the A-center is restored.

Ёрш Дмитрий Сергеевич, студент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, asmonzevs@gmail.com.

Протасеня Артур Игоревич, студент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, aprotasenya797@gmail.com.

Научный руководитель – *Покотило Юрий Мефодьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры атомной физики и физической информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, pokotilo@bsu.by.

УДК 539.2/669(2-8)

Д. А. ЗЕРНИЦА

ВЛИЯНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ФОЛЬГ Sn – 20 мас. % Zn, ПОЛУЧЕННЫХ СВЕРХБЫСТРЫМ ЗАТВЕРДЕВАНИЕМ

Исследовано влияние изотермического отжига на фазовый состав бинарных оловянно-цинковых сплавов, полученных методом сверхбыстрой кристаллизации из расплава. Определена объёмная доля фазы сплавов, величина удельной поверхности межфазной границы и средний диаметр частиц.

Припои, содержащие в своём составе свинец и соединения на его основе, являются политропными ядами, и негативно влияют на организм человека [1]. В настоящее время ведутся исследования по их замене

безопасными соединениями, а с целью улучшения свойств и характеристик бессвинцовых припоев используется метод сверхбыстрого затвердевания из расплава. Одним из альтернатив замены свинцосодержащих припоев является сплав Sn – 20 мас. % Zn, прошедший сверхбыстрое затвердевание из расплава со скоростью охлаждения не менее 10^5 К/с. Ранее исследователями было установлено, что сверхбыстрое затвердевание приводит к более равномерному распределению компонентов и измельчению структуры в бинарном сплаве, содержащем 11 % цинка, однако сплавы, содержащие более высокую концентрацию цинка, мало изучены [2; 3; 4].

В работе представлены результаты исследования фольг Sn – 20 мас. % Zn, прошедших быстроскоростное затвердевание в кристаллизаторе. Фольги изготавливались путём расплавления жидкого состава Sn – 20 мас. % Zn, последующего инжектирования капли расплава (0,2 г) на вращающийся со скоростью 15 м/с медный цилиндр диаметром 20 см.

На рисунке 1 (*а*, *б*, *в*, *г*, *д*) представлены фотографии, полученные с помощью электронной микроскопии для разного времени отжига.

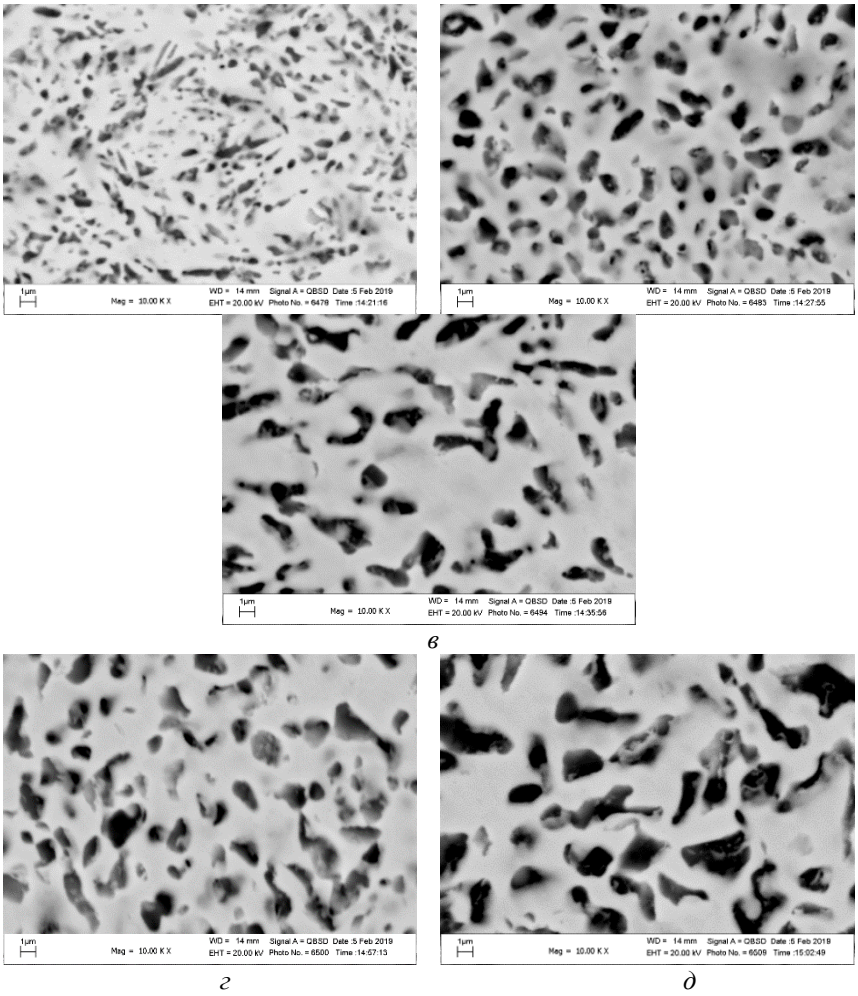


Рисунок 1 – Фотографии быстрозатвердевшего сплава Sn – 20 мас. % Zn:
а) без отжига; б) 20 мин. при 150 °С; в) 60 мин. при 150 °С; г) 90 мин. при 150 °С; д) 120 мин. при 150 °С

По результатам анализа снимков, используя метод секущих, был определён фазовый состав сплава. На рисунке 1 (*а*, *б*, *в*, *г*, *д*) черным цветом выделена фаза цинка, а светлые участки включают в себя фазу олова и растворённые мелкодисперсные включения цинка, обнаруженные при более высоком увеличении.

Был проведён изотермический отжиг при температуре 150 °С и выдержкой в печи в течение от 20 мин. до 120 мин. Результаты изменения объёмной доли фазы для разного времени отжига от расстояния представлены на рисунке 2. В процессе отжига формируются однородные дисперсные выделения второй фазы цинка в фольге.

Из графика следует, что с увеличением времени отжига объёмная доля цинка в фольге возрастает, и достигает максимального значения (20 %). Таким образом, сверхбыстрое затвердевание с увеличением времени отжига оказывает влияние на фазовый состав, и в результате коалесценции, контролируемой объёмной

диффузией при переходе атомов через межфазную границу, распределение компонентов в бинарном сплаве становится более равномерным.

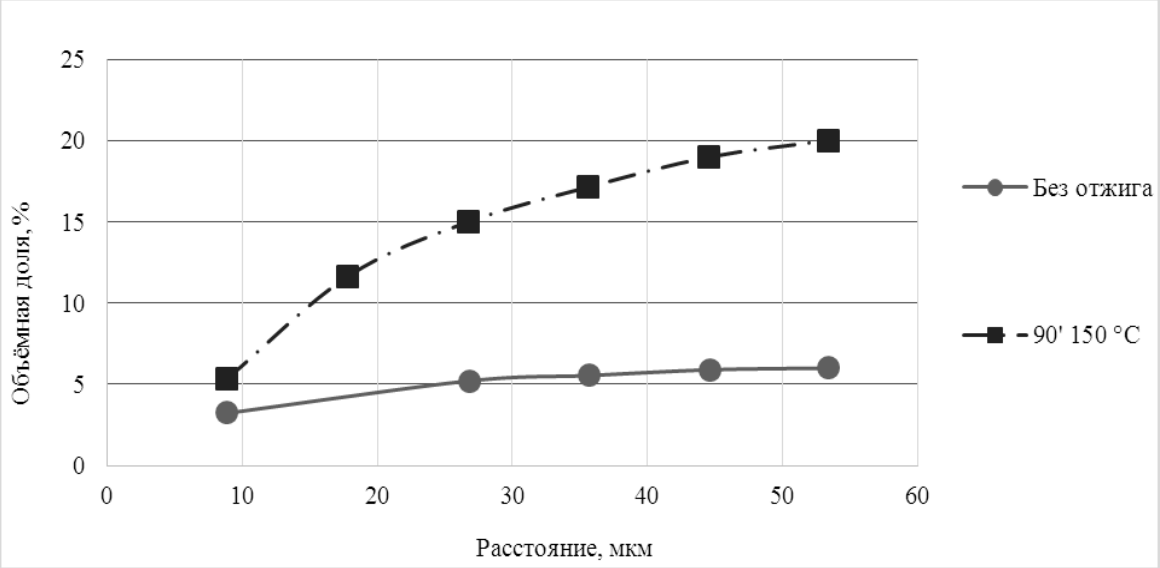


Рисунок 2 – Зависимость объёмной доли от расстояния при изотермическом отжиге

Ниже представлена таблица 1 с данными средней величины диаметра частиц и удельной поверхности межфазной границы. По сравнению с образцом, не прошедшим изотермический отжиг, средний диаметр частиц меньше почти в 2 раза, и с увеличением времени отжига диаметр плавно возрастает. Также с увеличением времени отжига происходит снижение удельной поверхности межфазных границ.

Таблица 1 – Средняя величина диаметра частиц и удельной поверхности межфазной границы фольг системы Sn – 20 мас. % Zn

Условия отжига	Удельная поверхность S, мкм$^{-1}$	Средний диаметр частиц D, мкм
Без отжига	0,7	0,3
150 °C, 20 мин.	1,2	0,6
150 °C, 60 мин.	0,9	0,7
150 °C, 90 мин.	0,9	0,8
150° C, 120 мин.	0,8	0,9

Список литературы

1. Хамидулина, Х. Х. Международное регулирование свинца и его соединений / Х. Х. Хамидулина, Ю. О. Давыдова // Гигиена и санитария. – 2013. – № 6. – С. 57–59.

2. Influence of rapid solidification on Sn–8Zn–3Bi alloy characteristics and microstructural evolution of solder/Cu joints during elevated temperature aging / ed.: G. Zhao, G. Sheng, G. Wen. – Chongqing : Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017. – XXVII, pp. 234–240.

3. Мирошниченко, И. С. Закалка из жидкого состояния / И. С. Мирошниченко. – М. : Металлургия, 1982. – 168 с.

4. Shepelevich, V. G. Structure and Properties of Ultrafast-Quenched Foils of Sn–Zn System Alloys / V. G. Shepelevich, O. V. Gusakova // Neorg. Mater. – 2008. – Vol. 44, no. 4. – P. 560–565.

The effect of annealing time on the phase composition of binary tin-zinc alloys, obtained by the rapid solidification of their melt, is investigated. The volume fraction of the phase of the alloys and the value of the specific surface area of the interface were determined. The structure of the photographs of alloys, the results are presented in the table.

Зерница Денис Александрович, аспирант Мозырского государственного педагогического университета имени И. П. Шамякина, Мозырь, Беларусь, dzernitsa@mail.ru.

Научный руководитель – *Шепелевич Василий Григорьевич*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, shepelevich@bsu.by.

УДК 539.1:535.34:535.37

П. В. КАРПАЧ

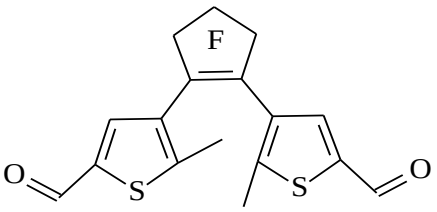
МОДУЛЯЦИЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ФОТОХРОМНОГО НАНОКОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК[1]

Исследованы нанокомпозитные системы на основе полупроводниковых квантовых точек и фотохромного диарилэтена. Зарегистрирована фотоиндуцированная модуляция интенсивности флуоресценции и электронного поглощения, управляемая фотохромными превращениями.

В настоящее время в оптических микроэлектронных устройствах перспективно применение элементов с фотоуправляемыми свойствами (поглощением, люминесценцией, проводимостью и т. д.) [1].

В частности, большой интерес представляют нанокомпозитные системы на основе полупроводниковых квантовых точек (КТ) и органических фотохромных молекул [2].

В настоящей работе методами спектрофотометрии и флуоресцентной спектроскопии исследованы такие нанокомпозиты с фотохромным диарилэтеном ДАЭ 2:



Использовались КТ CdSe/ZnS (λ_{fl} = 600 нм) фирмы Evident technologies. В качестве растворителя применяли толуол фирмы Aldrich.

Для регистрации спектров поглощения в УФ и видимой областях спектра применяли спектрофотометр SPECORD 200 (Carl Zeiss, Германия), обеспечивающий измерение спектров поглощения в диапазоне 200–900 нм с шагом дискретизации 1 нм. При регистрации спектров поглощения не учитывалось возможное рассеяние и отражение от образца.

Спектры флуоресценции регистрировали с помощью спектрофлуориметра СМ2203 (Солар, Беларусь).

Для облучения использовались светодиоды с длиной волны в максимуме полосы излучения λ = 365, 514 и 627 нм.

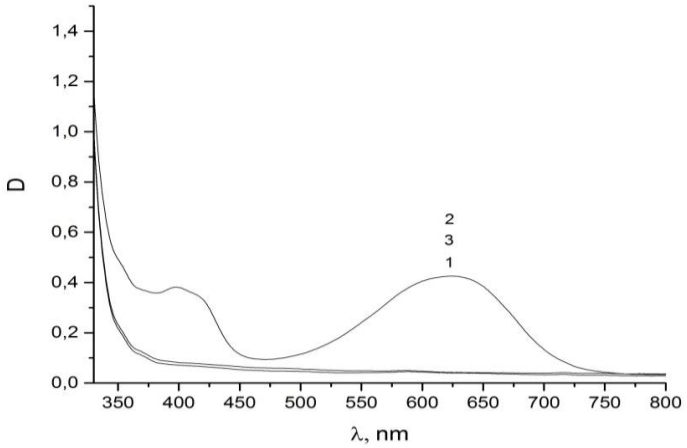


Рисунок 1 – Спектры поглощения КТ (флуоресценция КТ λ = 600 нм) в толуоле в присутствии ДАЭ2 при молярном соотношении ДАЭ2:КТ = 11000:1. 1 – до УФ облучения; 2 – после УФ (λ = 365 нм) облучения в течение 240 с; 3 – после обучения светом λ = 627 нм в течение 120 с

[1]Работа выполнена в рамках совместного проекта № Ф18Р-074/1 «Структура и спектральные свойства фотохромных систем на основе полупроводниковых квантовых точек» Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Российского фонда фундаментальных исследований.

Зарегистрированы спектры электронного поглощения (например, рисунок 1) и флуоресценции (например, рисунок 2) фотохромных нанокомпозитов на основе КТ (λ_{fl} = 600 нм) и ДАЭ2 при различных молярных соотношениях ДАЭ1:КТ до и после облучения активирующим излучением.

В спектрах поглощения под действием УФ света появляется полоса поглощения циклического изомера в видимой области спектра (при 630 нм), исчезающая после облучения раствора видимым светом (рисунок 1).

Интенсивность излучения КТ (рисунок 2) обратимо снижается и восстанавливается при попеременном облучении УФ и видимым светом, что возможно свидетельствует о модуляции излучения КТ вследствие индуктивно-резонансного переноса энергии возбуждения от КТ к фотоиндуцированной циклической форме диарилэтена ДАЭ 2 (либо по другому механизму, например, переноса заряда). Однако обратимость превращений неполная. При этом небольшая глубина модуляции вызвана, по-видимому, малой эффективностью фотохромных превращений молекул ДАЭ2.

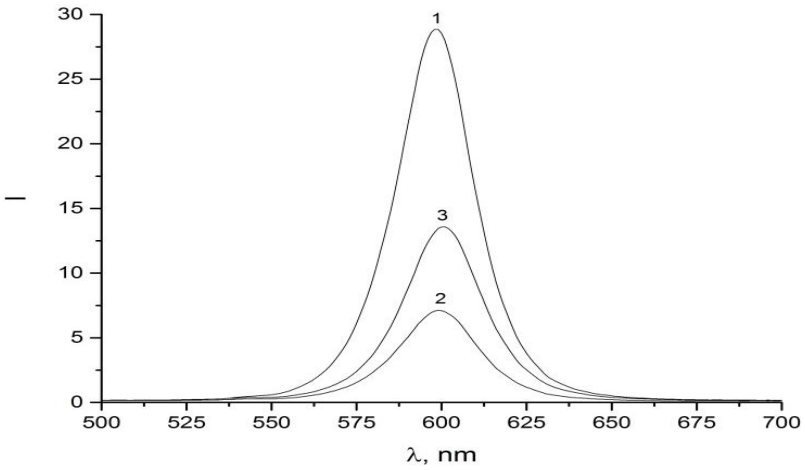


Рисунок 2 – Спектры флуоресценции КТ (флуоресценция КТ λ = 600 нм) в толуоле в присутствии ДАЭ2 при молярном соотношении ДАЭ2:КТ = 11000:1. 1 – до УФ облучения; 2 – после УФ (λ = 365 нм) облучения в течение 240 с; 3 – после обучения светом λ = 627 нм в течение 120 с

Список литературы

1. Optical polymer materials with photocontrolled fluorescence / V. A. Barachevsky [et al.] // Opt. Mater. – 2013. – Vol. 35. – P. 1805–1809.

2. Фотоиндуцированная модуляция излучения квантовых точек CdSe/ZnS фотохромными превращениями диарилэтенов / В. А. Барачевский [и др.] // Кристаллография. – 2019. – № 4.

In this work, nanocomposite systems based on semiconductor quantum dots and photochromic diaryletene are investigated. A photoinduced modulation of the fluorescence intensity and electron absorption, controlled by photochromic transformations, was registered.

Карпач Павел Викторович, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, pavel_karpach@mail.ru.

Научный руководитель – *Василюк Геннадий Тимофеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, vasilyuk@grsu.by.

УДК 538.9

М. Д. КАЧАН

СУПЕРЯЧЕЙКА ОБРАТНОЙ РЕШЁТКИ КРИСТАЛЛОВ

Показано что кристаллы с ячейками Бравэ непримитивного типа в обратной решетке описываются ячейкой небазисными ($\boldsymbol{a}^*$, $\boldsymbol{b}^*$, $\boldsymbol{c}^*$, $\boldsymbol{\alpha}^*$, $\boldsymbol{\beta}^*$, $\boldsymbol{\gamma}^*$) формально связанными (a, b, c, α, β, γ), так как в этом случае в вершинах будут узлы с нулевым «весом». Проанализированы суперячейки для кристаллов с ячейками Бравэ P-, C-типа и алмаза.

Ячейке кристалла с параметрами $(\boldsymbol{a},\boldsymbol{b},\boldsymbol{c},\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\beta},\boldsymbol{\gamma}) = (a_j^0\alpha_j^0)_{j=1,2,3}$ сопоставляется ячейка, которая описывает обратную решетку кристалла с параметрами $(\boldsymbol{a}^*,\ \boldsymbol{b}^*,\ \boldsymbol{c}^*,\boldsymbol{\alpha}^*,\boldsymbol{\beta}^*,\boldsymbol{\gamma}^*) = (a_j^*\alpha_j^*)_{j=1,2,3}$. Параметры этих ячеек:

$$a_j^{*(0)}=\frac{a_{j+1}^{0(*)}\ a_{j+2}^{0(*)}\ \sin\alpha_j^{0(*)}}{V^{0(*)}}, \tag{1}$$

$$\sin\alpha_j^{0(*)}=\frac{r^{0(*)}}{\sin\alpha_{j+1}^{0(*)}\ \sin\alpha_{j+2}^{0(*)}}, \tag{2}$$

где $r^{0(*)} = (1 - \cos^2\alpha^{0(*)} - \cos^2\beta^{0(*)} - \cos^2\gamma^{0(*)} + 2\cos^2\alpha^{0(*)}\cos^2\beta^{0(*)}\cos^2\gamma^{0(*)})^{1/2}$, (3)

$\mathbf{V}^{0(*)}$ – объемы прямой (обратной) ячейки, определяемые по формуле:

$$\mathbf{V}^{0(*)}=\mathbf{a}^{*(0)}\mathbf{b}^{*(0)}\mathbf{c}^{*(0)}\mathbf{r}^{*(0)}. \tag{4}$$

«Вес» узла обратной решетки описывается значением структурной амплитуды, которая рассчитывается по формуле:

$$F(hkl)=\sum_{j=1}^{N} f_j \exp 2\pi i(hx_i+ky_j+lz_j), \tag{5}$$

где $\boldsymbol{f}_j$ – атомная амплитуда рассеяния j-го атома (табличная величина). N – число атомов в ячейке.

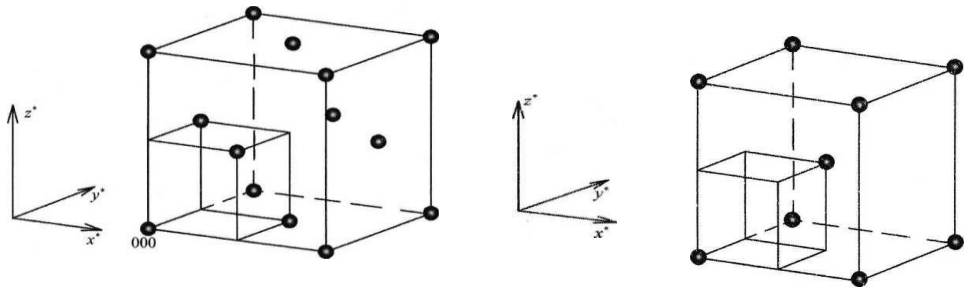
Базисом ячейки I типа является параллелепипед, которому принадлежат узлы (000); $(\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2})$, то есть для любой точки (любого атома) с координатами (xyz) обязательно имеется гомологичная точка (атом) с координатами $(x + {}^1/_2,\ y + {}^1/_2,\ z + {}^1/_2)$. Следовательно, структурная амплитуда для I типа решетки примет вид:

$$F(hkl) = 1 + \exp\pi i(\mathbf{h}+\mathbf{k}+\mathbf{l})\sum_{j=1}^{\frac{N}{2}} \boldsymbol{f}_j \exp 2\pi i(h\mathbf{x}_j + k\mathbf{y}_j + l\mathbf{z}_j). \tag{6}$$

Постоянное целое число $\mathbf{h}+\mathbf{k}+\mathbf{l}$ может принять два значения: $\mathbf{h}+\mathbf{k}+\mathbf{l} = 2n$ (четное), $\mathbf{h}+\mathbf{k}+\mathbf{l} = 2n + 1$ (нечетное).

Все узлы обратной решетки I типа с нечетной суммой индексов имеют нулевой «вес». Обратная решетка в таком случае имеет вид, показанный на рисунке 1*а*. На этом рисунке приведена ячейка с базисом a^*, b^*, c^*, из которого видно, что в этой ячейке практически все узлы имеют нулевой «вес» и поэтому необходимо прийти в суперячейке.

Решетка, обратная обратной решётке [1], является прямой решёткой. Следовательно, обратная решетка гранецентрированного кристалла описывается объемно-центрированной ячейкой (рисунок 1*б*).



а *б*

Рисунок 1 – Ячейки обратной (*а*) и прямой (*б*) решёток

Базис Бравэ ячеек С-типа имеет значение 000, $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$. Следовательно, структурная амплитуда таких кристаллов имеет вид:

$$F(hkl) = 1 + e^{\pi i(h+k)}\sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} f_i \exp 2\pi i(hx_i + ky_i + lz_i). \tag{7}$$

Тогда $F(hkl) \neq 0$ только для четной суммы индексов hk, на l ограничения не накладываются.

Следовательно, по координатным осям $\mathbf{x}^*$ $\mathbf{y}^*$ $\mathbf{z}^*$ ненулевые узлы будут иметь вид (для объемно- и гранецентрированного кристалла): 200, 020, 002, то есть ячейка, построенная на этих узлах, будет иметь объем в 8 раз больше, чем ячейка с узлами 100, 010, 001, то есть действительно необходимо говорить о суперячейке обратной решетки. Для ячейки С-типа прямого пространства суперячейка обратной решетки имеет узлы 000, 200, 020, 001. Кроме рассмотренных I, F, C решеток Бравэ возьмем в качестве примера более сложную структуру алмаза.

Ячейка алмаза представляет собой два гранецентрированных куба, сдвинутых друг относительно друга по телесной диагонали куба на трансляцию ($^1/_4\,^1/_4\,^1/_4$) (рисунок 2).

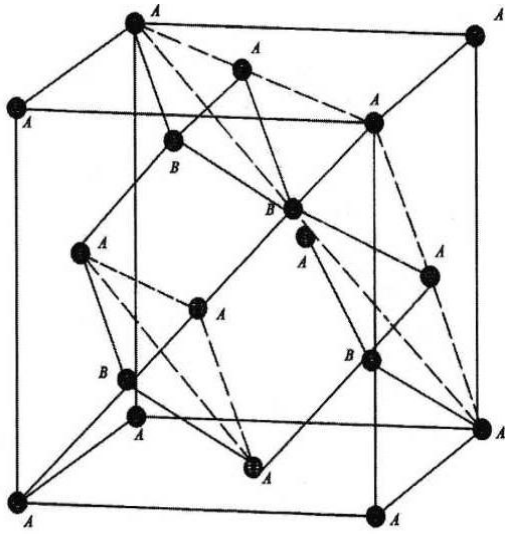


Рисунок 2 – Ячейка решётки кристалла алмаза [2]

Структурная амплитуда с учетом координат атомов после преобразования примет вид:

$$F(hkl) = f_c[1 + \exp\pi i(h + k) + \exp\pi i(h + l) + \exp\pi i(k + l)\{1 + \exp[\frac{\pi i(h+k+l)}{2}]\}. \quad (8)$$

Первая скобка в этом выражении не равна нулю для индексов с одинаковой четностью. Если индексы четные, но их сумма равна $4n + 2$, то $F(h, k, l) = 0$. Как следует из анализа второй скобки, первые ненулевые узлы для суперячейки алмаза следующие: 400; 040; 004. Индексы (h, k, l) в координатной системе $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ все нечетные, то $F(hkl) \neq 0$. Если индексы четные, то их сумма должна делиться на 4 без остатка. Объем этой ячейки в 64 раза больше объема ячейки, построенной на узлах 100, 010, 001.

В результате анализа связей между параметрами прямой и обратной решетки установлено, что формальные соотношения между ними для решёток с непримитивными ячейками Бравэ не могут быть использованы при решении многих задач кристаллофизики, поэтому в результате исследования было предложено для ячеек I, F, C (A, B) типов ввести понятие суперячейки. При анализе, например дисперсионных свойств в обратном пространстве, необходимо учитывать не периодичность a_j^*, а периодичность в базисе суперячейки.

Список литературы

1. Вайнштейн, Б. Современная кристаллография / Б. Вайнштейн. – М. : Наука, 1979. – Т. 1. – 384 с.
2. Брэгг, У. Кристаллическая структура минералов / У. Брэгг, Г. Кларинбул. – М. : Мир, 1967. – 389 с.

Unequal lattice cells of a crystal of various Bravais types (I, P, C) with parameters $\vec{a}^*$, $\vec{b}^*$, $\vec{c}^*$ are impossible, since the vertices of these cells have «zero weight». The supercells of the non-primitive cells of Bravais and diamonds have been terminated.

Качан Михаил Дмитриевич, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kachan.mixail@bk.ru.

Научный руководитель – *Лиопо Валерий Александрович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоритической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, liopo@grsu.by.

УДК 537.311.322

А. А. КОВАЛЁНОК

ТРАНСФОРМАЦИЯ СПЕКТРА КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В ТВЁРДЫХ РАСТВОРАХ *КРЕМНИЙ-ГЕРМАНИЙ* ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИХ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА[2]

Методами комбинационного рассеяния света (КРС) и рентгеноструктурного анализа исследованы дефекты структуры в монокристаллах твердых растворов $Si_{1-x}Ge_x$, выращенных методом вытягивания из расплава и электронно-лучевой плавки, а также в пленках, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Показано, что смещения пиков КРС, обусловленных колебаниями связей *Si-Si*, *Si-Ge* и *Ge-Ge*, определяются уменьшением параметра решетки при возрастании доли германия в твердом растворе.

Интерес к получению и исследованию бездефектных пленок твердых растворов $Si_{1-x}Ge_x$ на подложках из кремния связан с практической значимостью таких структур для создания приборов оптоэлектроники на основе кремниевой технологии. Метод комбинационного рассеяния света (КРС) является наиболее перспективным для контроля состава и деформаций пленок твердых растворов [1; 2]. Целью настоящей работы являлось описание зависимостей положения пиков КРС от состава и механических напряжений в пленках твердых растворов $Si_{1-x}Ge_x$.

В работе приводятся результаты исследования зависимостей положения полос КРС в твердых растворах $Si_{1-x}Ge_x$ ($0{,}006 \le x \le 0{,}5$) от компонентного состава x. Для экспериментов использовались пленки твердых растворов толщиной (1–2) мкм, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на кремниевой подложке с использованием переходного слоя [3].

Спектры КРС записывались при комнатной температуре с помощью микрорамановского спектрометра *Nanofinder HE* (*Lotis TII*). Регистрация спектров осуществлялась по схеме обратного рассеяния, разрешение спектрометра составляло 0,8 см$^{-1}$. Подводимая к образцу мощность составляла 2 мВт, а диаметр возбуждающего пучка – около 1 мкм. Использовалось возбуждение излучением твердотельного лазера с длиной волны 532 нм.

Постоянная решетки $Si_{1-x}Ge_x$ определялась методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре *Ultima*-IV с использованием медного излучения (1,54059 Å).

Результаты и обсуждение. На рисунке 1 представлены спектры КРС твердого раствора $Si_{1-x}Ge_x$, на которых видно три полосы, обусловленные колебаниями связей *Si-Si*, *Si-Ge* и *Ge-Ge*. Видно, что максимумы полос *Si-Si* и *Ge-Ge* смещены в область более низких частот по сравнению с таковыми в чистом кремнии и германии.

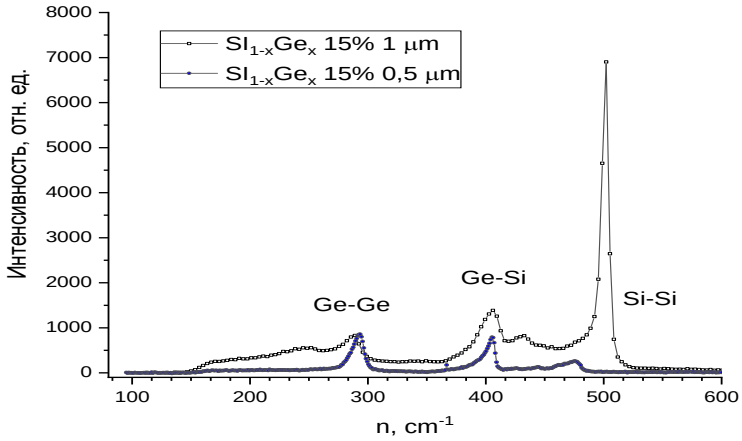


Рисунок 1 – Спектры КРС твёрдого раствора $Si_{1-x}Ge_x$ (x = 0,5)

Смещения максимумов полос представлены на рисунке 2. Механические напряжения растяжения связей *Si-Si* из-за присутствия в растворе атомов германия [1], вследствие ангармонизма, приводят к снижению частоты колебаний.

[2]Исследования проводились при частичной финансовой поддержке БРФФИ в рамках проекта № Т18Р-190.

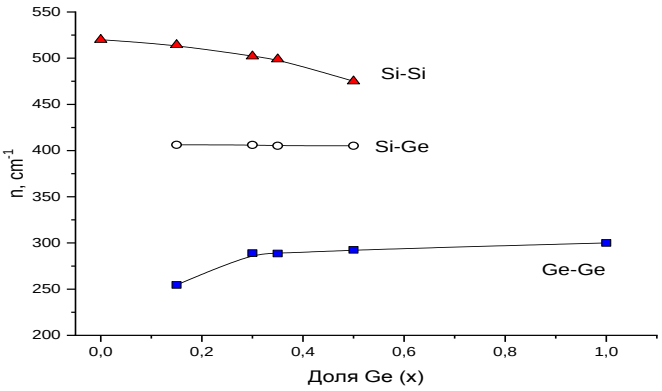


Рисунок 2 – Зависимости смещения максимумов полос КРС в $Si_{1-x}Ge_x$ от содержания германия

Увеличение параметра решетки (a), найденное измерением дифракции рентгеновских лучей, хорошо описывается выражением: a = 5,44 + 0,18 x Å. Для расчета величины a можно использовать соотношение Грюнайзена [2]:

$$\left(\omega^0_{Si-Si}/\omega_{Si-Si}\right)=\left(V/V_0\right)\gamma_{Si}\ ,$$

где V_0 – объем недеформированной элементарной ячейки, V – объем элементарной ячейки в твердом растворе, γ_{Si} – параметр Грюнайзена.

Для кремния эти параметры имеют следующие значения: постоянная решетки a_{Si} = 5,43 Å [3], параметр Грюнайзена для связи *Si-Si* в диапазоне 0,0 < x < 0,3 γ_{Si} = (1,05–1,2), ν_0 = 520 см$^{-1}$.

Таким образом, измерение частоты максимума полосы *Si-Si* позволяет определить, используя приведенные соотношения, состав твердых растворов $Si_{1-x}Ge_x$.

Список литературы

1. Определение состава и механических деформаций в $Si_{1-x}Ge_x$-гетероструктурах из данных спектроскопии комбинационного рассеяния света: уточнение параметров модели / В. А. Володин [и др.] // ФТП. – 2006. – Т. 40, № 11. – С. 1349–1355.

2. Расчет спектров комбинационного рассеяния света сплава $Si_{1-x}Ge_x$ / А. В. Васин [и др.] // Вестн. Нижегор. ун-та им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 5 (1). – С. 62–68.

3. Strain-relaxed SiGe/Si heteroepitaxial structures of low threading-dislocation density / P. I. Gaiduk [et al.] // Thin Solid Films. – 2000. – Vol. 40, № 367. – P. 120–125.

The structural defects both in single crystals of $Si_{1-x}Ge_x$ solid solutions grown by the melt-drawing and electron-beam melting method, and in films obtained by molecular beam epitaxy, were studied by Raman scattering and *X*-ray diffraction methods. It is shown that the shift in the Raman peak due to the vibrations of the *Si-Si, Si-Ge,* and *Ge-Ge* bonds is determined by the decrease in the lattice parameter as the share of germanium in the solid solution increases.

Ковалёнок Андрей Александрович, магистрант 1 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, dusvich@gmail.com.

Научный руководитель – *Покотило Юрий Мифодьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, Pokotilo@bsu.by.

УДК 535.338.3:691.542

А. С. КОПАТЬ

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ АЛЮМИНИЯ ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ

Экспериментально установлено влияние параметров лазерного излучения на интенсивность спектральных линий алюминия лазерно-эмиссионной плазмы. Показано, что оптимальными частотами ее возбуждения являются 4 и 7 Гц, оптимальными задержками сдвоенных импульсов – 1 и 7 мкс, а расфокусировка не должна превышать ±0,5 мм.

Лазерно-эмиссионный спектральный анализ является одним из важнейших методов исследования элементного состава вещества [1–3]. Анализ эмиссионных спектров позволяет получить актуальную качественную и количественную информацию об элементном составе исследуемого образца. Суть эмиссионного спектрального анализа, заключается в том, что с помощью источника возбуждения вещество пробы переводится в частично ионизированное парогазовое состояние, которое в процессе рекомбинации излучает. Это излучение, проходя через входную щель спектрографа, с помощью призмы или дифракционной решетки разлагается на отдельные спектральные линии, которые затем регистрируются фотоприемником. Качественный эмиссионный спектральный анализ основан на установлении наличия или отсутствия в полученном спектре линий искомых элементов, количественный – на измерении интенсивности спектральных линий, которые пропорциональны концентрациям элементов в пробе [4]. Метод LIBS основан на использовании эмиссионных спектров излучающей плазмы, которая возбуждается сфокусированным на исследуемом образце излучением лазера.

Несмотря на бурное развитие и широкое применение лазерно-эмиссионной спектроскопии метод LIBS еще далек от совершенства. До настоящего времени существует необходимость разработки новых и оптимизации уже существующих аналитических методик количественного анализа, дающих возможность снизить погрешность измерений путем увеличения интенсивности спектральных линий исследуемого вещества. Использование в качестве источника формирования лазерно-эмиссионной плазмы сдвоенных лазерных импульсов имеет ряд преимуществ по сравнению с моноимпульсным возбуждением. При этом в несколько раз возрастает относительная интенсивность спектральных линий элементов без увеличения уровня фона. До сих пор недостаточно хорошо изучено влияние «третьих» элементов на относительную интенсивность линий в лазерной плазме, связанную с неравномерностью поступления элементов сплавов в парогазовое облако при изменении параметров лазерного излучения [5].

Влияние параметров лазерного излучения на интенсивность аналитических линий исследовалось в работах [6–7]. Рассматривая процессы поступления элементов в лазерную плазму, необходимо принимать во внимание тот факт, что мощное лазерное излучение, воздействующее на исследуемый образец, приводит к разогреву приповерхностных областей до критических температур. В результате увеличивается скорость диффузии элементов. Особенно важно при разработке методик количественного анализа учитывать влияние изменения параметров лазерного излучения (плотности мощности излучения, числа импульсов в одну точку, временного интервала между сдвоенными лазерными импульсами и др.) на относительные интенсивности спектральных линий различных элементов. Изменяя параметры импульсов возбуждения, можно в определенных пределах управлять такими характеристиками плазмы, как температура и концентрация электронов, распределение интенсивности излучения плазмы по объему и тем самым влиять на скорости протекающих в плазме процессов и интенсивность спектральных линий [8–9].

Целью настоящей работы является изучение влияния параметров лазерных импульсов и временной задержки между ними на интенсивность спектральных линий алюминия лазерно-эмиссионной плазмы алюминиевого сплава.

Исследования проводились на установке, описанной в работе [10]. Объектом исследования являлся образец алюминиевого сплава АЛ2Д. На рисунке 1 представлены зависимости интенсивности излучения лазерной плазмы, при изменении задержки между импульсами в диапазоне 0–10 мкс (при t = 0 мкс (*а*) лазер работал в одноимпульсном режиме и при изменении задержки между импульсами в диапазоне 10–300 мкс (*б*)). При задержке в 1 мкс мы наблюдаем максимум интенсивности: для спектральных линий алюминия λ = 309,4 нм – 63568 отн. ед. и λ = 358,7 нм – 50437 отн. ед. При задержке в 7 мкс интенсивности были равны 62900 и 49639 соответственно. С ростом задержки между импульсами до 40 мкс интенсивность падает примерно в 4 раза и составляет для λ = 309,4 нм – 15100 отн. ед. и λ = 358,7 нм – 9891 отн. ед. По мере увеличения задержки до 200 мкс, интенсивность анализируемых спектральных линий практически не изменялась. Минимальное их значение составляло для λ = 309,4 нм – 10353 отн. ед. а для λ = 358,7 нм – 6750 отн. ед. Максимальное их значение составило для λ = 309,4 нм – 19161 отн. ед., а для λ = 358,7 нм – 12821 отн. ед. Далее, при задержке между импульсами 200 мкс, снова наблюдается максимум интенсивности для обеих линий. Интенсивность излучения на длине волны λ = 309,4 нм составила 30900 отн. ед., а на длине волны λ = 358,7 нм – 20795 отн. ед.

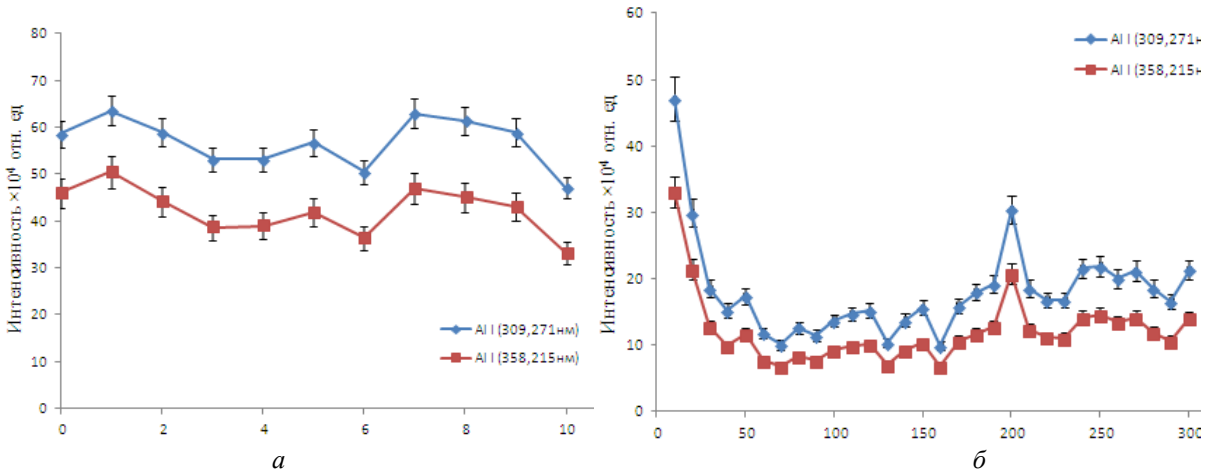


Рисунок 1 – Зависимость интенсивности спектральных линий алюминия от задержки между импульсами

На рисунке 2 представлена зависимость интенсивности аналитических линий λ = 309,4 нм, λ = 358,7 нм алюминия от частоты следования сдвоенных лазерных импульсов YAG:Nd^{3+}-лазера (1,06 мкм), излучение которого формировало лазерно-эмиссионную плазму на поверхности алюминиевого сплава. Видно, что при частоте, равной 4 Гц, наблюдается максимум интенсивности, равный для λ = 309,4 нм – 62561 отн. ед., для λ = 358,7 нм – 49753. Зафиксировано незначительное падение интенсивности при частотах 5 и 6 Гц. Дальше наблюдался медленный рост интенсивности по мере увеличения частоты. В итоге можно сказать, что частота следования формирующих плазму импульсов лазера не оказывает существенного влияния на интенсивность спектральных линий.

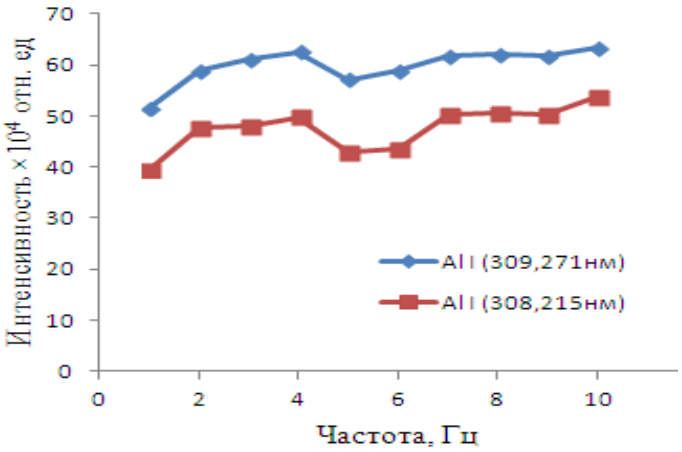


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности спектральных линий алюминия от частоты

Важное значение с точки зрения практической LIBS спектроскопии имеет расположение исследуемого образца относительно фокуса фокусирующей лазерное излучение оптической системы. При удалении от фокуса в ту или иную сторону увеличивается площадь пятна, в которое фокусируется лазерное излучение и тем самым уменьшается его плотность мощности. Соответственно при удалении от фокуса исследуемого образца наблюдается падение интенсивности спектральных линий. На рисунке 3 представлены зависимости интенсивности спектральных линий алюминия от расстояния исследуемого объекта до фокуса оптической системы. Так в фокусе для λ = 309,4 нм интенсивность составляет 62504 отн. ед., для λ = 358,7 нм – 49169 отн. ед. На расстоянии ±0,5 мм – 60055 отн. ед. и 44600 отн. ед. соответственно. Значения интенсивности спектральных линий были примерно одинаковыми как для положительной расфокусировки, так и для отрицательной. Наблюдается статистическая и приборная погрешность, находящаяся в диапазоне (±123)–(±720) отн. ед.

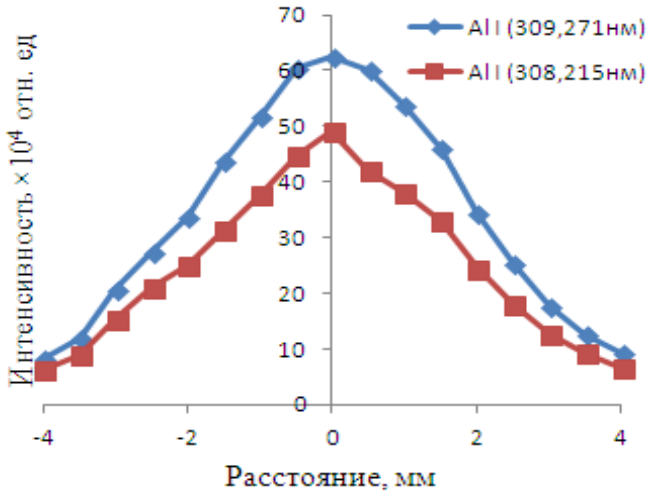


Рисунок 3 – Зависимости интенсивности спектральных линий алюминия от положения относительно фокуса оптической системы

Таким образом, экспериментально определено влияние параметров лазерного излучения на интенсивность аналитических линий лазерно-эмиссионной плазмы. Оптимальными частотами работы спектрометра являются 4 Гц и 7 Гц, оптимальными задержками сдвоенных импульсов 1 мкс и 7 мкс, а расфокусировка не должна превышать ±0,5 мм.

Список литературы

1. Ануфрик, С. С. Спектральный анализ элементного состава древесноволокнистой плиты / С. С. Ануфрик, К. Ф. Зноско, Н. Н. Курьян // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2015. – № 3(199). – С. 83–92.

2. Исследование химического состава глазурей керамических плиток / С. С. Ануфрик [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т. 83, № 5. – С. 724–730.

3. Аполлонов, В. В. Применение импульсно-периодического режима для повышения эффективности лазерной обработки / В. В. Аполлонов, О. Г. Девойно, А. С. Калиниченко // Наука и техника. – 2014. – № 4. – С. 37–41.

4. Ермалицкая, К.Ф. Двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия сталей / К. Ф. Ермалицкая // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2010. – № 2. – С. 16–20.

5. Чумаков, А. Н. Влияние интервала между лазерными импульсами на эффективность лазерного воздействия на двух длинах волн / А. Н. Чумаков // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2010. – № 2. – С. 168.

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 Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 101–110.

7. Ануфрик, С. С. Влияние плотности мощности лазерного излучения на интенсивность спектральных линий основных компонентов лазерной плазмы глины / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, М. В. Бельков // Журнал прикладной спектроскопии. – 2018. – Т. 85, № 2. – С. 285–292.

8. Белаш, В. Ч. Температура и концентрация электронов импульсного разряда в смеси паров ртути с аргоном / В. Ч. Белаш, К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 3. – С. 83–92.

9. Зноско, К. Ф. Распределение интенсивности излучения плазмы импульсно-периодического разряда в смеси паров ртути с аргоном / К. Ф. Зноско, В. Ч. Белаш // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 78–89.

10. Ануфрик, С. С. Модификация химического состава и повышение износостойкости полуфриттовой глазури напольной керамической плитки путем добавления плавленого корунда / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, И. И. Жукова // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 2. – С. 83–94.

The results of a qualitative and quantitative study of the influence of the parameters of the frequency, delay and defocusing of laser radiation on the intensity of the spectral lines of aluminum by the laser-emission method (LIBS) are presented.

Копать Александр Светославович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, lexus070198@mail.ru.

Научный руководитель – *Зноско Казимир Францевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, znosko@grsu.by.

УДК 535.338.3:691.542

А. С. КОПАТЬ

ВЛИЯНИЕ МЕЖИМПУЛЬСНОГО ИНТЕРВАЛА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ БЕЛОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ГЛИНЫ ПРИ ДВУХИМПУЛЬСНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ

Проведено экспериментальное исследование влияния межимпульсного интервала на интенсивность спектральных линий белой технологической глины при двухимпульсном возбуждении лазерно-эмиссионной плазмы. Установлено, что оптимальными частотами формирования лазерно-эмиссионной плазмы являются 5 Гц, а оптимальными задержками сдвоенных импульсов 150–180 мкс.

Спектральный анализ представляет собой физический метод анализа химического состава вещества, основанный на исследовании спектров испускания и поглощения атомов или молекул. Эти спектры определяются свойствами электронных оболочек атомов и молекул, колебаниями атомных ядер в молекулах и вращением молекул, а также воздействием массы и структуры атомных ядер на положение энергетических уровней. Кроме того, они зависят от взаимодействия атомов и молекул с окружающей средой. В соответствии с этим спектральный анализ использует широкий интервал длин волн – от рентгеновских до микрорадиоволн. Лазерно-эмиссионный анализ ограничивается пределами оптических спектров. Однако и эта область достаточно широка, она охватывает вакуумную область ультрафиолетовых излучений, ультрафиолетовую, видимую и инфракрасную области спектра. На практике современный спектральный анализ использует излучения с длиной волны примерно от 0,15 до 40–50 нм [1–3]. Анализ ряда литературных источников показывает, что спектральный анализ применяется для определения оптимальных технологических параметров производства [4–5].

В работах [6–7] рассмотрена временная динамика свечения лазерно-эмиссионного факела глины и влияние плотности мощности лазерного излучения на интенсивность спектральных линий основных компонентов лазерной плазмы глины. Также было показано увеличение абляции материала при применении сдвоенных импульсов, приходящих с некоторой задержкой друг относительно друга по сравнению с использованием одиночного импульса с энергией, равной сумме энергий сдвоенных импульсов. Также указывалось, что помимо увеличения эмиссии за счет поступления атомов, испарившихся в результате попадания второго импульса в область с высокой температурой, необходимо также принимать во внимание увеличение абляции за счет разогрева поверхности объекта первым лазерным импульсом и ударной волной расширяющейся плазмы. В работах [8–9] показано, что температура и концентрация электронов в плазменном образовании, а также распределение интенсивности излучения плазмы зависят от энерговклада в плазму и определяют ее эмиссионные характеристики.

В лазерно-эмиссионном спектральном анализе для формирования плазмы используется, как правило, одноимпульсное возбуждение. Однако существенно расширились возможности лазерно-эмиссионного спектрального анализа с использованием двухимпульсного возбуждения, при котором наблюдается резкое увеличение интенсивности спектральных линий химических элементов. Усиление интенсивности спектральных линий химических элементов в спектрах лазерно-эмиссионной плазмы, достигаемое при ее формировании сдвоенными лазерными импульсами, позволяет реализоваться методу LIBS спектроскопии как средству быстрого дистанционного многокомпонентного экспресс анализа [10].

Анализ литературных источников показывает, что при проведении исследований, в качестве исследуемых образцов использовались преимущественно металлы и сплавы, имеющие однородный состав и гладкую поверхность. Кроме того, в данных работах не полностью описаны процессы, протекающие в лазерной плазме при возбуждении ее сдвоенными лазерными импульсами с различными задержками между ними. До сих пор имеются лишь общие представления о причинах значительного увеличения относительной интенсивности спектральных линий химических элементов [2–3; 4; 7; 10]. Понимание процессов, происходящих при двухимпульсном возбуждении лазерно-эмиссионной плазмы, и факторов, влияющих на интенсивность спектральных линий ее излучения, будет способствовать развитию и внедрению LIBS спектроскопии. Несмотря на широко ведущиеся разработки LIBS методов элементного анализа вещества, еще существует значительный разрыв между потребностями практики и достигнутыми ею возможностями.

В данной работе применялся лазерно-эмиссионный спектральный анализ. Этот метод позволяет получить качественные и количественные данные по элементному и химическому составу в течение короткого промежутка времени без изменения физико-химических параметров свойств и существенного разрушения исследуемого материала. Использовался маломощный импульсный лазер Nd^{3+} с модуляцией добротности. Часть излучения лазерной плазмы собиралась и направлялась в спектрометр, который разлагал свет, испускаемый возбужденными атомами и ионами в плазме, регистрировался эмиссионный сигнал, оцифровка и вывод результатов сигнала проводилась программой QspClient [6–7].

Объектом исследования являлся образец белой технологической глины, используемый для производства керамической облицовочной плитки и посуды.

На рисунке 1 представлена зависимость интенсивности выбранных спектральных линий химических элементов, входящих в состав технологической глины от задержки между импульсами в диапазоне 10–300 мкс при мощности лазерного излучения 36,4 мДж и при мощности лазерного излучения 27 мДж. Из рисунка 1*а* видно, что линия Al II (λ = 358,7 нм) ведет себя стабильно (средняя интенсивность равна 12535 отн. ед., при стандартном отклонении 980 отн. ед.). Спектральная линия Mg II (λ = 279,6 нм) при 10 и 190 мкс имеет максимумы интенсивности, значения которых равны при 10 мкс – 31572 отн. ед., а при 190 мкс – 31203 отн. ед. Минимум наблюдается при 150 мкс (24865 отн. ед.). Значение интенсивности линии Ti II (λ = 323,6 нм) практически не изменяется при изменении величины задержки, среднее значение интенсивности равно примерно 24635 отн. ед., при стандартном отклонении 1405 отн. ед. При мощности 27 мДж зависимость интенсивности спектральных линий от задержки принимает похожий вид, наблюдается лишь падение показателей на 7–10 тысяч отн. ед.

Наблюдается уменьшение интенсивности аналитических линий по сравнению с данными на рисунке 1*а*. При 70 мкс наблюдается минимум интенсивности для линий Mg II (λ = 279,6 нм), Al I (λ = 309,4 нм), Ti II (λ = 323,6 нм), Al II (λ = 358,7 нм) которые равны 17079, 15647, 26015, 6909 отн. ед. соответственно. Линия Al II, как и в предыдущем случае, является стабильной, не смотря на изменение задержки. Среднее значениеее интенсивности около 7700 отн. ед., минимум – 6990 отн. ед., максимум – 9036 отн. ед. При задержке от 150 до 210 мкс, у линии титана наблюдается максимум, равный порядка 21279 отн. ед.

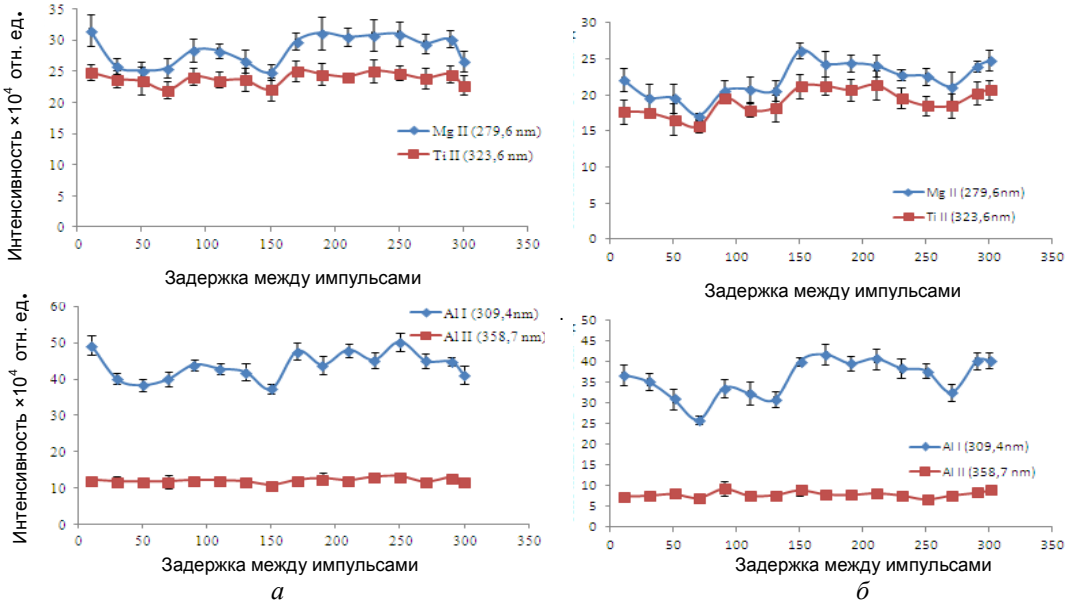


Рисунок 1 – Зависимости интенсивности спектральных линий основных химических элементов глины от задержки между лазерными импульсами

Зависимости интенсивности спектральных линий белой технологической глины от частоты следования лазерных импульсов, показаны на рисунке 2. Видно, что интенсивности спектральных линий имеют максимальное значение при частоте 5 Гц. Также видно, что зависимость интенсивности спектральных линий белой технологической глины от частоты следования лазерных импульсов слабая. Максимальные значения интенсивности, к примеру, наблюдаются у линии титана (λ = 323,6 нм), при частоте 5 Гц порядка 30000 отн. ед., а минимальные значения при частоте 4 и 8 Гц – 26872 отн. ед. (падение на 3000 отн. ед.).

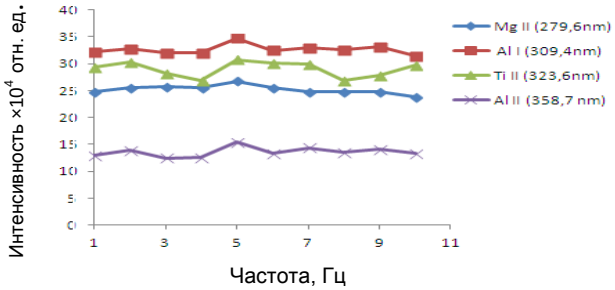


Рисунок 2 – Зависимости интенсивности спектральных линий белой глины от частоты возбуждения

Таким образом, экспериментально определено влияние параметров лазерного излучения на интенсивность аналитических линий лазерно-эмиссионной плазмы белой технологической глины. Оптимальными частотами формирования плазмы являются 5 Гц, оптимальными задержками сдвоенных импульсов 150–180 мкс.

Список литературы

1. Исследование химического состава глазурей керамических плиток / С. С. Ануфрик [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т. 83, № 5. – С. 724–730.

2. Аполлонов, В. В. Применение импульсно-периодического режима для повышения эффективности лазерной обработки / В. В. Аполлонов, О. Г. Девойно, А. С. Калиниченко // Наука и техника – 2014. – № 4. – С. 37–41.

3. Ермалицкая, К. Ф. Двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия сталей / К. Ф. Ермалицкая // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2010. – № 2. – С. 16–20.

4. Ануфрик, С. С. Спектральный анализ элементного состава древесноволокнистой плиты / С. С. Ануфрик, К. Ф. Зноско, Н. Н. Курьян // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2015. – № 3(199). – С. 83–92.

5. Ануфрик, С. С. Модификация химического состава и повышение износостойкости полуфриттовой глазури напольной керамической плитки путем добавления плавленого корунда / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, И. И. Жукова // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 2. – С. 83–94.

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 Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 101–110.

7. Ануфрик, С. С. Влияние плотности мощности лазерного излучения на интенсивность спектральных линий основных компонентов лазерной плазмы глины / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, М. В. Бельков // Журнал прикладной спектроскопии. – 2018. – Т. 85, № 2. – С. 285–292.

8. Белаш, В. Ч. Температура и концентрация электронов импульсного разряда в смеси паров ртути с аргоном / В. Ч. Белаш, К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 3. – С. 83–92.

9. Зноско, К. Ф. Распределение интенсивности излучения плазмы импульсно-периодического разряда в смеси паров ртути с аргоном / К. Ф. Зноско, В. Ч. Белаш // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 78–89.

10. Чумаков, А. Н. Влияние интервала между лазерными импульсами на эффективность лазерного воздействия на двух длинах волн / А. Н. Чумаков // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2010. – № 2. – С. 168.

An experimental study of the effect of the interpulse interval on the intensity of the spectral lines of white technological clay under the two-pulse excitation of a laser-emission plasma has been carried out. It is established that the optimal frequency of formation of a laser-emission plasma is 5 Hz, and the optimal delay of the double pulses 150–180 μs.

Копать Александр Светославович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, lexus070198@mail.ru.

Научный руководитель – *Зноско Казимир Францевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, znosko@grsu.by.

УДК 549.5+537.31/.32+665.654

А. В. КРИЩУК

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПРЕДЫСТОРИИ НА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛОИСТОГО КОБАЛЬТИТА КАЛЬЦИЯ[3]

Твердофазным методом синтезирована керамика состава $Ca_3Co_4O_{9+\delta}$ и $Ca_{2,8}Dy_{0,2}Co_4O_{9+\delta}$, изучено влияние термической предыстории на ее термоэлектрические свойства. Установлено, что спекание керамики при температуре выше температуры перитектоидного распада с последующим длительным низкотемпературным отжигом приводит к значительному снижению пористости керамики и, как следствие, улучшению ее термоэлектрических характеристик.

Работа промышленных предприятий и автотранспорта сопровождается выделением значительного количества «паразитного» тепла, которое может быть непосредственно преобразовано в электрическую энергию при помощи термоэлектрогенераторов (ТЭГ). Для создания ТЭГ необходимы термоэлектрики – материалы, характеризующиеся одновременно высокой электропроводностью и термо-ЭДС и низкой

[3]Работа выполнена в рамках ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограммы «Материаловедение и технологии материалов».

теплопроводностью [1]. В последние годы высокая термоэлектрическая эффективность была обнаружена у оксидных соединений различных классов. В настоящее время в качестве наиболее перспективной основы для разработки оксидных термоэлектриков *p*-типа рассматриваются слоистые кобальтиты натрия Na_xCoO_2, кальция $Ca_3Co_4O_{9+\delta}$ и висмута-кальция, поскольку их производные характеризуются высокими термоэлектрическими показателями и относительно низкой стоимостью.

Целью настоящей работы являлось повышение термоэлектрических характеристик керамики на основе слоистого кобальтита кальция $Ca_3Co_4O_{9+\delta}$ и твердого раствора $Ca_{2,8}Dy_{0,2}Co_4O_{9+\delta}$ за счет получения более плотных образцов. Для достижения поставленной цели керамическим методом из оксидов кобальта (II, III), диспрозия и карбоната кальция на воздухе при температуре 1073 К в течение 12 часов были синтезированы образцы $Ca_3Co_4O_{9+\delta}$ и твердого раствора $Ca_{2,8}Dy_{0,2}Co_4O_{9+\delta}$. Схема синтеза и спекания образцов представлена на рисунке 1.

Величину кажущейся плотности ($\rho_{эксп}$) находили по размерам и массе образцов, а пористость (П) спеченной керамики определяли по формуле $\Pi = (1 - \rho_{эксп} / \rho_{рент})$, где $\rho_{рент}$ – рентгенографическая плотность образцов (для $Ca_3Co_4O_{9+\delta}$ $\rho_{рент}$ = 4,677 г/см^3 [2]). Электропроводность и термо-ЭДС материалов определяли на воздухе в интервале температур 300–1100 К. Перед измерениями электрических свойств на поверхности образцов формировали Ag-электроды путем вжигания серебряной пасты при 1100 К в течение 15 мин. Найденные экспериментально значения удельной электропроводности керамики σ пересчитывали на нулевую пористость ($\sigma_{\Pi=0}$), используя соотношение $\sigma_{\Pi=0} = \sigma\left(1+\frac{\Pi}{1+\Pi^{2/3}}\right)$ [3]. Значения фактора мощности термоэлектрических материалов вычисляли по формуле $P = S^2 \cdot \sigma$, где S – коэффициент термо-ЭДС, а σ – электропроводность. Как видно из таблицы, после спекания в режиме III (по сравнению с режимом I) заметно возрастает кажущая плотность образцов $Ca_3Co_4O_{9+\delta}$ и $Ca_{2,8}Dy_{0,2}Co_4O_{9+\delta}$ (в 1,25 раза и 1,46 раза соответственно).

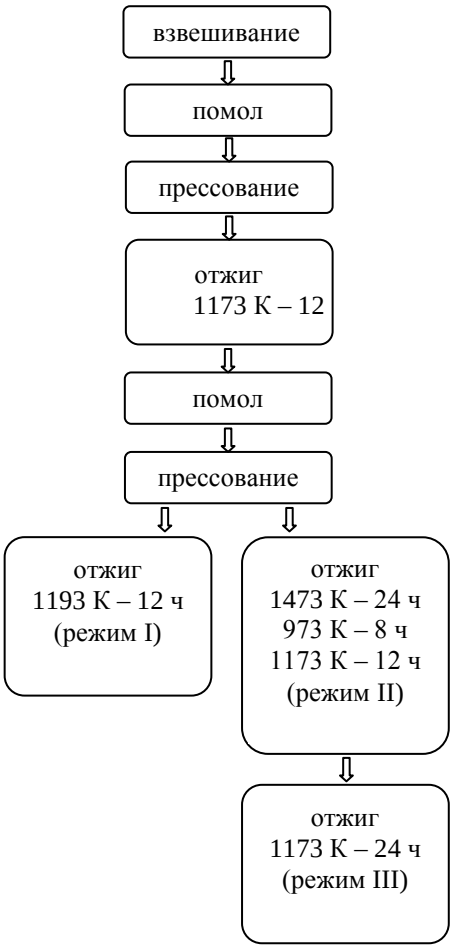


Рисунок 1 – Схема получения образцов

Таблица – Значения кажущейся плотности, удельной электропроводности, коэффициента термо-ЭДС и фактора мощности образцов керамики $Ca_3Co_4O_{9+\delta}$ и $Ca_{2,8}Dy_{0,2}Co_4O_{9+\delta}$, отожженных в различных режимах

	$Ca_3Co_4O_{9+\delta}$		$Ca_{2,8}Dy_{0,2}Co_4O_{9+\delta}$	
	Режим I	Режим III	Режим I	Режим III
$\rho_{эксп}$, г/см^3	3,23	4,04	3,09	4,51
П	0,31	0,14	0,34	0,04
σ_{1050}, См/см	38,5	82,9	24,4	57,0
$\sigma_{1050,\Pi=0}$, См/см	46,7	92,0	30,0	59,0
S_{1050}, мкВ/К	190,8	189,0	285,0	279,0
P_{1050}, мкВт/(м·К^2)	140,1	296,1	198,7	443,7

Ожидаемое снижение пористости образцов происходит за счет высокой температуры спекания. Однако при нагревании выше 1199 К кобальтит кальция $Ca_3Co_4O_{9+\delta}$ подвергается перитектоидному распаду [4], а затем при температуре выше 1299 К происходит перитектоидный распад продукта первичного распада [2]. Таким образом, керамика, спеченная при температуре 1473 К получается более плотной, но содержит значительное количество низкопроводящих фаз [5]. Поэтому для восстановления фазы $Ca_3Co_4O_{9+\delta}$ образцы подвергаются длительному низкотемпературному отжигу [5].

Как видно из рисунка 2, удельная электропроводность незамещенного кобальтита кальция после отжига в режиме II уменьшилась по сравнению с образцами, отожженными в режиме I. Это объясняется тем, что в образцах, отожженных в режиме II, не до конца прошло восстановление фазы $Ca_3Co_4O_{9+\delta}$ и в них в заметном количестве присутствуют низкопроводящие фазы. А после отжига в режиме III удельная электропроводность образцов как незамещенного кобальтита кальция, так и твердого раствора на его основе по

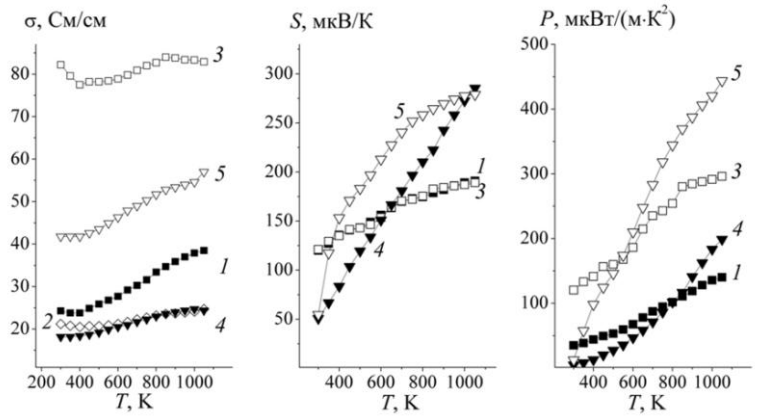


Рисунок 2 – Температурные зависимости удельной электропроводности (σ), коэффициента термо-ЭДС (*S*), фактора мощности (*P*) керамики состава $Ca_3Co_4O_{9+\delta}$ (*1–3*) и $Ca_{2,8}Dy_{0,2}Co_4O_{9+\delta}$ (*4, 5*), спеченных в режиме I (*1, 4*), II (*2*) и III (*3, 5*)

сравнению с образцами, спеченными в режиме I, резко выросла. Учитывая, что при этом выросла и удельная электропроводность, пересчитанная на нулевую пористость, можно предположить, что рост электропроводности связан не только с увеличением площади межзеренных границ, но и с изменением их состояния, что в свою очередь, приводит к уменьшению электросопротивления межзеренных контактов. Изменение режима спекания, как и ожидалось, практически не отразилось на значениях коэффициента термо-ЭДС, поэтому увеличение фактора мощности образцов связано только с соответствующим ростом удельной электропроводности.

Таким образом, достигнуто значительное улучшение термоэлектрических характеристик образцов кобальтита кальция и твердого раствора на его основе (фактор мощности образцов возрос более чем в 2 раза) за счет увеличения плотности (снижения пористости) керамики путем спекания образцов в условиях перитектоидного распада, что позволяет избежать длительных энергозатратных отжигов.

Список литературы

1. Oxide Thermoelectrics / ed. by K. Koumoto, I. Terasaki, N. Murayama // Research Signpost. Trivandrum. – India, 2002. – 255 p.

2. Preparation of high-performance $Ca_3Co_4O_9$ thermoelectric ceramics produced by a new two-step method / M. A. Madre [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. – 2013. – Vol. 33, № 10. – P. 1747–1754.

3. Клындюк, А. И. Влияние дефицита катионов на структуру и свойства слоистого феррокупрата лантана-бария / А. И. Клындюк, Е. А. Чижова // Журнал неорганической химии. – 2008. – Т. 53, № 4. – С. 1–6.

4. Woermann, E. Phase equilibria in the system CaO-cobalt oxide in air / E. Woermann, A. Muan // J. Inorg. Nucl. Chem. – 1970. – Vol. 32. – P. 1455–1459.

5. Post-calcination, a novel method to synthesize cobalt oxide-based thermoelectric materials / M.-G. Kang [et al.] // Acta Materialia. – 2014. – Vol. 73. – P. 251–258.

The ceramics of the composition $Ca_3Co_4O_{9+\delta}$ and $Ca_{2,8}Dy_{0,2}Co_4O_{9+\delta}$ was synthesized by the solid phase method, the influence of thermal prehistory on its thermoelectric properties was studied. It has been established that sintering of ceramics at a temperature above the temperature of its peritectoid decomposition, followed by prolonged low-temperature annealing, leads to a significant decrease in the porosity of ceramics and, as a consequence, to the improvement in its thermoelectric characteristics.

Крищук Анастасия Васильевна, студентка 4 курса факультета химической технологии и техники Белорусского государственного технологического университета, Минск, Беларусь, nastya.Krischuk@mail.ru.

Научный руководитель – *Чижова Екатерина Анатольевна*, кандидат химических наук, доцент кафедры физической, коллоидной и аналитической химии Белорусского государственного технологического университета, Минск, Беларусь, kato_@rambler.ru.

УДК 537.9

С. И. ЛАТУШКО, Д. В. ЖЕЛУДКЕВИЧ

ЭВОЛЮЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КЕРАМИЧЕСКИХ СОСТАВОВ $BiFeO_3$, ЗАМЕЩЁННЫХ ИОНАМИ Ba И Ti

Проведено исследование кристаллической структуры твердых растворов $(1-x)BiFeO_3 - xBaTiO_3$ ($x = 0.15 - 0.25$) при изменении концентрации $BaTiO_3$, а также при увеличении температуры. Установлено, что увеличение концентрации ионов бария и титана приводит к уменьшению ромбоэдрического искажения элементарной ячейки и стабилизации псевдокубической фазы при $x = 0.2$. Повышение температуры также приводит к постепенному уменьшению ромбоэдрического искажения, что ведет к формированию кубической фазы.

В последнее десятилетие материалы на основе феррита висмута являются предметом интенсивных исследований ввиду большого разнообразия структурных и магнитных фазовых переходов. Однофазные соединения на основе $BiFeO_3$ не обладают заметной магнитоэлектрической связью, большой поляризацией или остаточной намагниченностью по сравнению с соответствующими композитными материалами [1; 2], в то время как некоторые схемы химического замещения [3; 4] могут привести к значительному улучшению функциональных свойств составов наряду с модификацией их кристаллической структуры.

Твердые растворы на основе феррита висмута являются перспективными функциональными материалами для применения в электротехнических устройствах.

Экспериментальная часть.

Синтез керамических образцов $(1–x)BiFeO_3 – xBaTiO_3$ проводился методом двухступенчатого твердофазного синтеза из исходных оксидов Bi_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2 и карбоната бария $BaCO_3$. Предварительный синтез проводился при 900 °C, после измельчения образцы окончательно синтезировались при температурах 900–980 °C (температура синтеза постепенно увеличивалась с увеличением концентрации замещающих примесей). Рентгенограммы регистрировались в диапазоне 20°–80° с шагом 0,02° с использованием дифрактометров Bruker D8 Advance и Rigaku D / MAX-B с Cu-Kα-излучением. Измерения методом нейтронной порошковой дифракции (NPD) проводились с использованием нейтронного дифрактометра высокого разрешения FIREPOD (λ = 1,7977Å, инструмент E9, HZB).

Результаты и обсуждение.

По результатам дифракционных измерений составы с $x < 0,2$ характеризуются однофазной ромбоэдрической структурой (рисунок 1*а*). Химическое замещение ионами Ba и Ti приводит к постепенному увеличению параметров элементарной ячейки, что коррелирует с бо́льшими ионными радиусами замещающих ионов по сравнению с радиусами ионов Bi и Fe (рисунок 1*б*). Химическое замещение вызывает уменьшение структурных искажений, которые характеризуются рефлексом $(113)_R$, связанным с искажением октаэдров кислорода в плоскости *ab* ромбоэдрической решетки, интенсивность даного рефлекса постепенно уменьшается с концентрацией *x* и почти пропадает для состава $x = 0,2$. Расщепление рефлексов $(202)_R$ и $(006)_R$, связанное с тетрагональным искажением решетки, сохраняется для составов вдоль межфазной границы (рис. 1*а*, вставка), в то же время расщепление быстро уменьшается с ростом ионов заместителей. Рентгенограммы соединений с $x \geq 0,25$ могут быть успешно описаны с использованием псевдокубической структуры, в то время как дифракционные пики, связаные с ромбоэдрическим искажением – $(202)_R$ и $(006)_R$ (2Θ = 39,1°) и $(024)_R$ и $(200)_R$ (2Θ = 45,5°), достаточно широкие, что может указывать на присутствие небольшой части ромбоэдрической фазы.

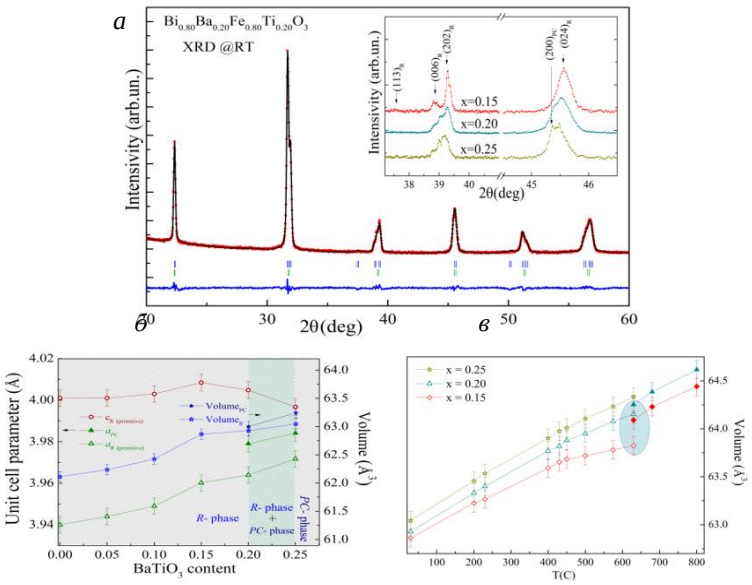


Рисунок 1 – Дифракционные данные (а), полученные при комнатной температуре, для соединения $Bi_{0,8}Ba_{0,2}Fe_{0,8}Ti_{0,2}O_3$. На вставке показано изменение дифракционных пиков по концентрации, характерных для ромбоэдрического искажения; (б) эволюция параметров примитивной ячейки и объёма ячейки, управляемая концентрацией, рассчитанных для ромбоэдрической и псевдокубической фазы; (в) температурная эволюция объёма первичной ячейки в области межфазной границы – *x* = 0,15, 0,2, 0,25

Тщательный анализ дифракционных спектров, зарегистрированных для составов в области фазовой границы при повышенных температурах, выявил неожиданное усиление ромбоэдрического искажения – повышение температуры приводит к быстрому снижению интенсивности пика, характерного для ромбоэдрической фазы – $(113)_R$ (рисунок 2). Данные XRD, полученные для состава $x = 0,15$ в интервале температур 450–550 °C, свидетельствуют о неожиданном увеличении интенсивности упомянутого рефлекса $(113)_R$, расщепление рефлексов $(202)_R$ и $(006)_R$ также становится более выраженным.

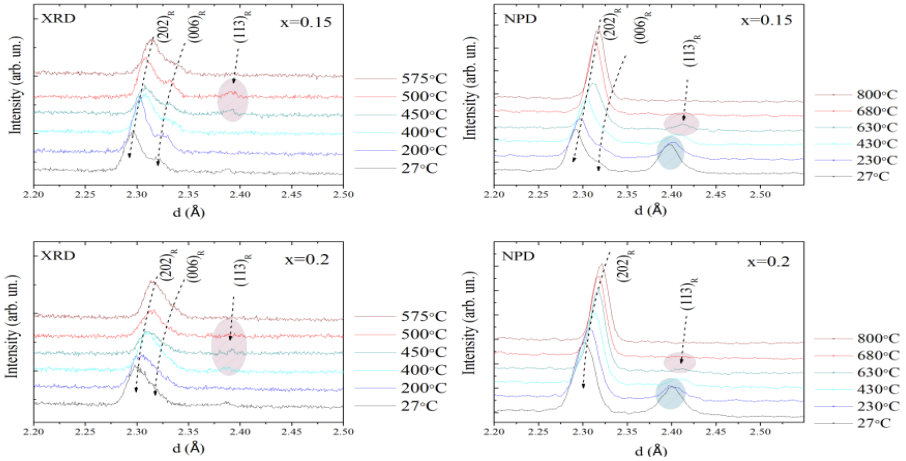


Рисунок 2 – Температурная эволюция характерных дифракционных пиков, полученных рентгеновскими и нейтронографическими методами, соединений $Bi_{1-x}Ba_xFe_{1-x}Ti_xO_3$ (x = 0,15; 0,2)

Отмеченное усиление ромбоэдрического искажения наблюдается при температурах, значительно меньших, чем температура, связанная со структурным переходом в кубическую фазу (рисунок 2). Следует отметить, что фазовый переход в кубическую фазу сопровождается заметным уменьшением объема элементарной ячейки. Аналогичное явление, связанное с усилением ромбоэдрической фазы, наблюдается для состава x = 0,20, в то время как изменения структуры не столь выражены, а аномалия наблюдается при более низких температурах (~450 °C). Дифракционные данные, полученные для составов, имеющих псевдокубическую структуру при комнатной температуре ($x \geq 0{,}25$), не показывают какой-либо температурной аномалии, связанной с ромбоэдрической фазой. Соединения с большей концентрацией замещающих примесей характеризуются температурным фазовым переходом непосредственно в однофазную кубическую структуру**.**

В данной работе была исследована эволюция кристаллической структуры составов $Bi_{1-x}Ba_xFe_{1-x}Ti_xO_3$, в зависимости от концентрации ионов заместителей и температуры, с составами вблизи морфотропной фазовой границы между ромбоэдрической и псевдокубической фазами. Увеличение концентрации ионов заместителей вызывает уменьшение искажений элементарной ячейки и вызывает ее расширение, что приводит к образованию однофазной псевдокубической структуры в диапазоне концентраций x = 0,2–0,25. Повышение температуры приводит к стабилизации однофазной кубической структуры в соединениях, имеющих доминирующую псевдокубическую фазу при комнатной температуре. Составы, имеющие доминирующую ромбоэдрическую фазу при комнатной температуре, характеризуются неожиданным усилением ромбоэдрических искажений при повышенных температурах, дальнейшее повышение температуры вызывает фазовое превращение в однофазную кубическую структуру.

Список литературы

1. Wang K. F., Liu J. M., and Ren Z. F., Adv. Phys. 58, 321 (2009).
2. Yang C.-H., Kan D., Takeuchi I., Nagarajan V., and Seidel J., Phys. Chem. Chem. Phys. 14, 15953 (2012).
3. Karpinsky D. V., Troyanchuk I. O., Tovar M., Sikolenko V., Efimov V., Efimova E., Shur V. Ya., and Kholkin A. L., J. Am. Ceram. Soc. 97, 2631 (2014).
4. Lee J.-H., Oak M.-Ae, Choi H. J., Son J. Y., and Jang H. M., A 22, 1667 (2012).

Crystal structure of $BiFeO_3$ ceramics co-doped with Ba and Ti ions of the compositions across the phase boundary region between the polar rhombohedral and pseudo-cubic phases has been investigated by means of X-ray and neutron diffraction measurements. Structural measurements have determined a decrease in the rhombohedral distortion upon increase in the dopants content, stabilization of the pseudo-cubic phase occurs in the compounds already at the dopant content $x \geq 0{,}20$. Temperature increase also leads to a gradual reduction of the rhombohedral distortion which is followed by the cubic phase in the compounds within the phase boundary region wherein an unpredictable strengthening of the rhombohedral distortion occurs for these compounds at elevated temperatures.

Латушко Сергей Игоревич, аспирант Института подготовки научных кадров Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь, smer444@mail.ru.

Желудкевич Дмитрий Викторович, магистрант Института подготовки научных кадров Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь, geludkevichdima@mail.ru.

Научный руководитель – *Карпинский Дмитрий Владимирович*, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь, dmitry.karpinsky@gmail.com.

УДК 547.867.6+616.155.34

В. Е. ЛУЦЕНКО, Д. В. ГРИГОРЬЕВА

ВЛИЯНИЕ ПРОТИВОВОСПАЛИТЕЛЬНЫХ И АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ ПРЕПАРАТОВ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ОТВЕТ НЕЙТРОФИЛОВ[4]

Флуоресцентным методом с использованием галлоцианина и скополетина показана возможность избирательной модуляции функций нейтрофилов N-ацетилцистеином, дапсоном и изониазидом. Полученные результаты позволяют предположить, что N-ацетилцистеин проявляет прямое антиоксидантное действие, в то время как дапсон ингибирует активацию G-белков, а изониазид ингибирует каталитическую активность пероксидаз.

Одной из наиболее важных областей медицинской биофизики является поиск соединений, способных корректировать развитие окислительного/галогенирующего стресса. Важным источником активных форм кислорода (АФК) и галогенов (АФГ), инициирующих развитие окислительного/галогенирующего стресса, являются нейтрофилы – самые распространенные лейкоциты в крови, которые составляют первую линию защиты организма от многочисленных инфекционных патогенов [1]. АФК и АФГ играют решающую роль в физиологических и патофизиологических процессах, протекающих в организме. Однако длительное воздействие высоких концентраций активных форм может привести к развитию патологий (например, сердечно-сосудистым, нейродегенеративным, заболеваниям легких и др.) или усугубить их протекание [2]. Поскольку нейтрофилы участвуют в воспалительных реакциях, связанных с развитием указанных заболеваний, актуальным направлением остается поиск препаратов, оказывающих ингибиторный эффект на продукцию АФК и АФГ нейтрофилами. Целью данной работы явилось изучение действия противовоспалительных и антибактериальных препаратов (N-ацетилцистеина, дапсона и изониазида) на функциональный ответ нейтрофилов с помощью методов флуоресцентного анализа с использованием галлоцианина и скополетина.

В работе использовали следующие реактивы: цитрат натрия, форбол 12-миристат 13-ацетат (PMA), N-формил-метил-лейцил-фенилаланин (fMLP), галлоцианин (GC), N-ацетилцистеин (NAC), дапсон и изониазид от фирмы «Sigma», США; декстран T70 – фирмы «Roth» (Германия); гистопак, скополетин (SP), пероксидаза хрена, азид натрия – фирмы «Nycomed» (Норвегия). Остальные реактивы – от заводов «Реахим» (Россия) и «Белмедпрепараты» (Беларусь).

Нейтрофилы были выделены из венозной крови здоровых доноров, как описано в [3]. Клетки ($1 \cdot 10^6$ кл/мл) ресуспендировали в фосфатно-солевом буфере (PBS), содержащем 10 мМ Na_2HPO_4/KH_2PO_4, 137 мМ NaCl, 2,7 мМ KCl, 5 мМ D-глюкозы (pH 7,4) и хранили при 4 °C. Продукцию $^{\bullet}O_2^-$ нейтрофилами оценивали по увеличению интенсивности флуоресценции раствора, содержащего GC (5 мкМ в PBS, $\lambda_{ex} = 360$ нм, $\lambda_{em} = 490$ нм) как описано в [4]. Продукцию H_2O_2 нейтрофилами оценивали флуоресцентным методом с использованием SP ($\lambda_{ex} = 350$ нм, $\lambda_{em} = 460$ нм). SP является субстратом пероксидазы хена и в присутствии H_2O_2, продуцируемой нейтрофилами, происходит его окисление, в результате чего его интенсивность флуоресценции снижается в суспензии клеток, к которым был добавлен «коктейль» реакционной смеси, содержащий 1 мкМ SP, 20 мкг/мл пероксидазы хрена и 1 мМ NaN_3. Регистрацию проводили на компьютеризированном спектрофлуориметре «Solar» СМ 2203 (Минск, Беларусь). Для активации нейтрофилов использовали PMA (50 нМ) или fMLP (0,5 мкМ). Для характеристики изменения интенсивности флуоресценции была выбрана скорость реакции соответствующего красителя с АФК (v), определяемая как тангенс угла наклона начального линейного участка кривой изменения интенсивности флуоресценции.

Выявлено, что NAC (100 и 750 мкМ) уменьшает скорость реакции GC с $^{\bullet}O_2^-$ (рисунок 1*а*). Следовательно, NAC проявляет прямое антиоксидантное действие, что подтверждается данными литературы, где описывается преимущественно прямое действие NAC как перехватчика АФК [5].

Как видно из рисунка 1*б*, изониазид не влияет на продукцию $^{\bullet}O_2^-$ PMA-активированными нейтрофилами, однако дозозависимым образом уменьшает продукцию H_2O_2 при активации клеток fMLP. Следовательно, действие изониазида может быть обусловлено либо селективным перехватыванием H_2O_2, либо неспецифическим влиянием на компоненты скополетинового «коктейля». В пользу последнего утверждения свидетельствуют данные литературы о том, что изониазид [6] является субстратом миелопероксидазы нейтрофилов, а также окисляется пероксидазой хрена в присутствии H_2O_2 [7].

Установлено, что дапсон также оказывает дозозависимый ингибирующий эффект на продукцию H_2O_2, однако не влияет на генерацию $^{\bullet}O_2^-$ активированными нейтрофилами (рисунок 1*в*). Отсутствие ингибирующего действия дапсона на функции нейтрофилов в ответ на PMA и наличие ингибирующего эффекта при добавлении fMLP, вероятно, ассоциировано с тем, что форболовый эфир стимулирует нейтрофилы посредством прямой

[4]Работа поддержана грантами БРФФИ (Б18Р-058) и РФФИ (18-515-00004).

активации протеинкиназы С, а fMLP – посредством связывания с рецепторами, ассоциированными с G-белками, ингибитором которых, согласно литературным данным [8], является дапсон.

Таким образом, установлено, что N-ацетилцистеин, дапсон и изониазид могут быть использованы в условиях окислительного и галогенирующего стресса для модуляции функционального ответа нейтрофилов.

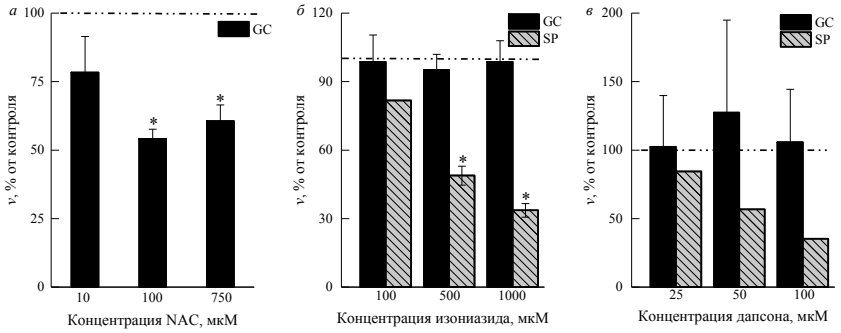


Рисунок 1 – Влияние NAC (*а*), изониазида (*б*) и дапсона (*в*) на изменение скоростей реакции GC с $^{\bullet}O_2^-$ (активация 50 нМ PMA) и скорость окисления SP в присутствии H_2O_2 (активация 0,5 мкМ fMLP). За 100 % принята скорость изменения флуоресценции при активации нейтрофилов в отсутствие анализируемых веществ. *p<0,05 по сравнению с контролем

Список литературы

1. Neutrophils: Their role in innate and adaptive immunity / C. Rosales [et al.] // Journal of Immunology Research. – 2016. – Vol. 26. – 2 p.
2. Reactive oxygen species: from health to disease / K. Brieger [et al.] // Swiss medical weekly. – 2012. – Vol. 142. – P. 1–14.
3. Lectin-induced activation of plasma membrane NADPH oxidase in cholesterol-depleted human neutrophils / I. V. Gorudko [et al.] // Archives of biochemistry and biophysics. – 2011. – Vol. 516. – P. 173–181.
4. Флуоресцентный метод оценки функциональной активности нейтрофилов / В. Е. Луценко [и др.] // Актуальные вопросы биологической физики и химии. – 2018. – Т. 3, № 3. – С. 612–618.
5. Inhibitory effects of N'acetylcysteine on superoxide anion generation in human polymorphonuclear leukocytes / V. Villagrasa [et al.] // Journal of pharmacy and pharmacology. – 1997. – Vol. 49, № 5. – P. 525–529.
6. Isoniazid as a substrate and inhibitor of myeloperoxidase: identification of amine adducts and the influence of superoxide dismutase on their formation / L. V. Forbes [et al.] // Biochemical pharmacology. – 2012. – Vol. 84, № 7. – P. 949–960.
7. Hillar, A. Comparison of isoniazid oxidation catalyzed by bacterial catalase-peroxidases and horseradish peroxidase / A. Hillar, P. C. Loewen // Archives of biochemistry and biophysics. – 1995. – Vol. 323, № 2. – P. 438–446.
8. Debol, S. M. Anti-inflammatory action of dapsone: inhibition of neutrophil adherence is associated with inhibition of chemoattractant-induced signal transduction / S. M. Debol, M. J. Herron, R. D. Nelson // Journal of leukocyte biology. – 1997. – Vol. 62, № 6. – P. 827–836.

In this work the possibility of selective modulation of neutrophils functions by N-acetylcysteine, dapsone and isoniazid using gallocyanine and scopoletin-based fluorescence methods has been shown. The direct antioxidant effect of N-acetylcysteine, the G-protein inhibitory activity of dapsone and the peroxidase- inhibitory action of isoniazid have been demonstrated.

Луценко Вероника Евгеньевна, аспирант Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, nika.lutsenko@tut.by.

Григорьева Дарья Владимировна, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь. dargr@tut.by.

Научный руководитель – *Горудко Ирина Владимировна*, кандидат биологических наук, доцент, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь. irinagorudko@gmail.com.

УДК 543.55;543.552;543.552.08

И. Д. ЛЫТНЕВ, Я. ФИЛИП

ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ

Представленная работа является результатом экспериментальных измерений с использованием вольтамперометрии. Цель работы – создание дешевого, удобного в использовании, надежного, быстрого в приготовлении состава для

акселерации детектирования ионов тяжелых металлов (в данном случае – свинца), основывающегося на методе ионного импринтинга оксида графита.

Объектом исследований является создание раствора для увеличения чувствительности электродов, используемых при качественном анализе образцов воды.

Исследования были выполнены с использованием потенциостат-гальваностата Autolab PGSTAT101. В качестве рабочих электродов использовались полированные графитовые электроды, электрод сравнения и вспомогательный электрод – серебряный и платиновый соответственно. Для электролитов использовались водные растворы хлорида калия и азотной кислоты в малых концентрациях (0,1 моль/л). Все измерения и подготовка проводились при комнатной температуре.

Экспериментальный раствор наносился на активную площадку электродов в количестве 5–10 мкл, после чего электроды подвергались сушке в течение 1 часа при помощи азота для ускорения процесса.

Методика измерений.

В электролитическую ячейку наливалось 50 мл электролита – водного раствора хлорида калия или азотной кислоты с концентрацией 0,1 моль/л, после чего в раствор помещались предварительно промытые дистиллированной водой сравнительный и вспомогательный электроды. Рабочие электроды погружались в последнюю очередь.

Рассмотрим один из экспериментов: в качестве электролита использовался раствор хлорида калия (0,1 моль/л) с добавлением 10 мкл сульфида свинца с концентрацией 20 мг/л. Использовался рабочий электрод без нанесения на него акселерационного раствора.

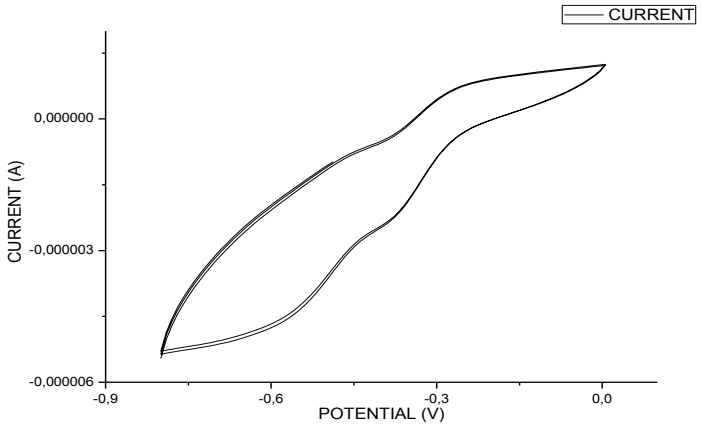


Рисунок 1 – Вольтамперограмма при измерениях без нанесения раствора на рабочий электрод

На данной вольтамперограмме поведение кривой тока обуславливается окислительно-восстановительными процессами веществ, содержащихся в электролите. Регистрация ионов свинца в растворе не произошла.

Условия другого эксперимента: электролит – 50 мл раствора азотной кислоты (0,1 моль/л), на электроды нанесено 10 мкл состава.

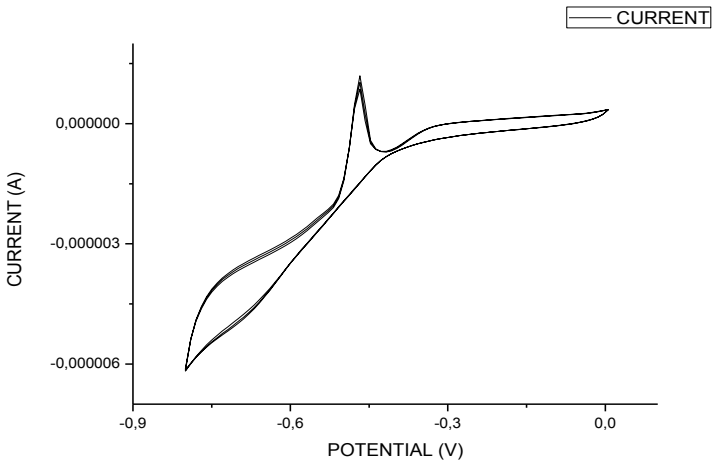


Рисунок 2 – Вольтамперограмма при измерениях с нанесением раствора на рабочий электрод

Пики на данной вольтамперограмме показывают присутствие ионов свинца в растворе. Судя по всему, детекция в данном случае обуславливается взаимодействием ионов свинца со структурой, образовавшейся на поверхности электрода, с помощью раствора.

Однако при повторном применении одного и того же электрода эффективность метода заметно снижается. На данный момент предполагается, что причина этого – вымывание вещества и разрушение объемных структур на поверхности электрода.

Таким образом, проведенные исследования показали, что ионный импринтинг с использованием оксида графита является перспективным направлением для вольтамперометрии. На данный момент можно наблюдать стабильность в измерениях от эксперимента к эксперименту с соблюдением всех условий. Основная проблема метода – неустойчивость объемной структуры на поверхности электрода при повторении эксперимента, что говорит о её «вымывании» при повторном использовании. Однако уже на данном этапе работы можно заметить, что качество и стабильность серии проведенных измерений зависят, в том числе, и от изначальной концентрации оксида графита в растворе, что может стать ключом к нахождению приемлемого решения этой проблемы.

В то же время можно достаточно смело говорить, что исследования находятся на все еще раннем этапе, что дает возможность экспериментировать с изначальным составом, модифицируя как его, так и методику импринтинга в целом.

Список литературы

1. A highly-sensitive electrochemical sensor for the simultaneous detection of Cd2 + and Pb2 + using liquid phase-exfoliated graphene // Journal Analytical methods / The Royal Society of Chemistry, 2014.

2. Cejner, M. Ion-imprinted polymers: synthesis, characterization and application / M. Cejner, R. Dobrowolski. – 2015. – С. 67–68.

The presented work is the result of experimental measurements using voltammetry. The purpose of this work is to create a cheap, easy-to-use, reliable, fast, solution to accelerate the detection of heavy metals (in the specified case – lead), based on the method of ion imprinting with graphite oxide. As we can see, it is quite promising method, although some changes are needed.

Лытнев Игорь Дмитриевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, korkyx1997@gmail.com.

Филип Ярослав, доктор физических наук, доцент кафедры инжиниринга защиты окружающей среды технологического факультета Университета имени Томаша Бати, Злин, Чехия, jfilip@utb.cz.

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

УДК 535.391:621.376

А. К. МЕТТИЕВ

РОСТ КАВЕРНЫ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПРОЗРАЧНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК В УСЛОВИИ СУЩЕСТВОВАНИЯ БОЛЕЕ КРУПНОЙ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ КАВЕРНЫ

Целью данной работы являлось теоретическое исследование акустической эмиссии в ходе роста каверн при лазерном воздействии на прозрачный диэлектрик. В результате теоретического исследования получена система алгебраических уравнений. Это система допускает численное решение, что позволить рассчитать спектр акустических эмиссий.

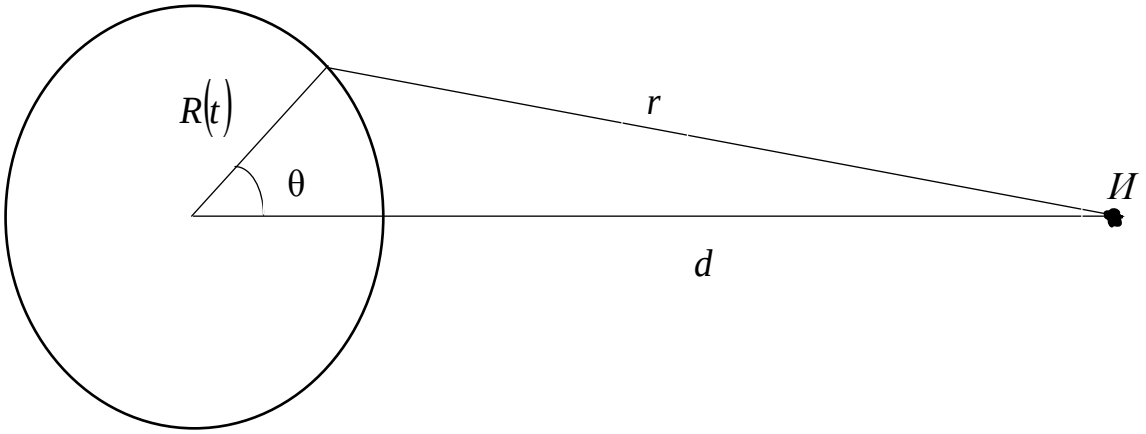
Исследование лазерного воздействия на материалы имеет более чем 40-летнюю историю. Взаимодействия лазерного излучения с веществом, исследования которых стали актуальными одновременно с появлением лазеров, в наши дни является одним из приоритетных направлений в науке. Это привело к появлению новых отраслей техники и технологии. Это связано с уникальными свойствами лазерного излучения: монохроматичностью, когерентностью, высокими плотностями энергии в импульс, возможностью варьирования пятна фокусировки, точностью контроля интенсивности и длительности воздействия.

В настоящее время одними из наиболее распространённых материалов являются диэлектрики. К ним относятся стекла, полимеры, драгоценные камни. При действии лазерного излучения на прозрачные диэлектрики может возникать их разрушение (оптический пробой). Разрушению диэлектрика предшествует увеличение его поглощения в локальной области лазерного воздействия. Изменение поглощения прозрачных

твердых тел под действием лазерного излучения обычно рассматривают с двух позиций: изменения, возникающие в идеально чистых средах, и изменения, обусловленные различного рода дефектами структуры и примесями, поскольку в этих случаях различны действующие механизмы.

Математическая модель лазерного воздействия на сферическую поверхность.

Рассмотрим генерацию упругих волн при воздействии лазерного излучения на прозрачный диэлектрик.



$R(t)$ – радиус каверны, d – расстояние между центрами двух каверн, r – расстояние от очага пробоя, θ – азимутальный угол

Рисунок 1 – Схема генерации упругих волн при воздействии лазерного излучения на прозрачный диэлектрик

Как известно, упругие волны, инициированные лазерным пробоем в прозрачных диэлектриках, формируются вследствие затухания ударных волн. Поскольку ударная волна, возникающая при лазерном пробое в большинстве диэлектриков, является слабой, необратимые деформации, производимые внутри неупругой области, но за пределами зоны разрушения вещества, относительно невелики. Если среда однородна и изотропна, то в силу сферической симметрии на поверхности зоны неупругих деформаций все компоненты тензора упругих напряжений, кроме σ_{rr}, должны быть равны нулю (система координат сферическая), а

$$\sigma_{rr}\left(r_{el},t\right) = -P(t) = -P_1 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \tag{1}$$

Здесь $P(t)$ – давление на поверхность сферы радиуса r; $\alpha = \frac{1}{\tau}$ – коэффициент затухания; P_1 – амплитудный множитель. Используя некоторые уравнения [1], получаем

$$\sigma_{rr} = \lambda\left(\frac{\partial A_r}{\partial r} + 2\cdot\frac{A_r}{r}\right) + 2\cdot\mu\cdot\frac{\partial A_r}{\partial r}. \tag{2}$$

Из рисунка 1 находим r – расстояние от очага пробоя ***И*** до точки наблюдения и, получив амплитуду смещения $A(r,t)$, пользуясь вычислениями [1], подставляем в уравнение (2).

Рассмотрим падение акустической волны, сформировавшейся вследствие лазерного пробоя на сферическую поверхность (рисунок 2).

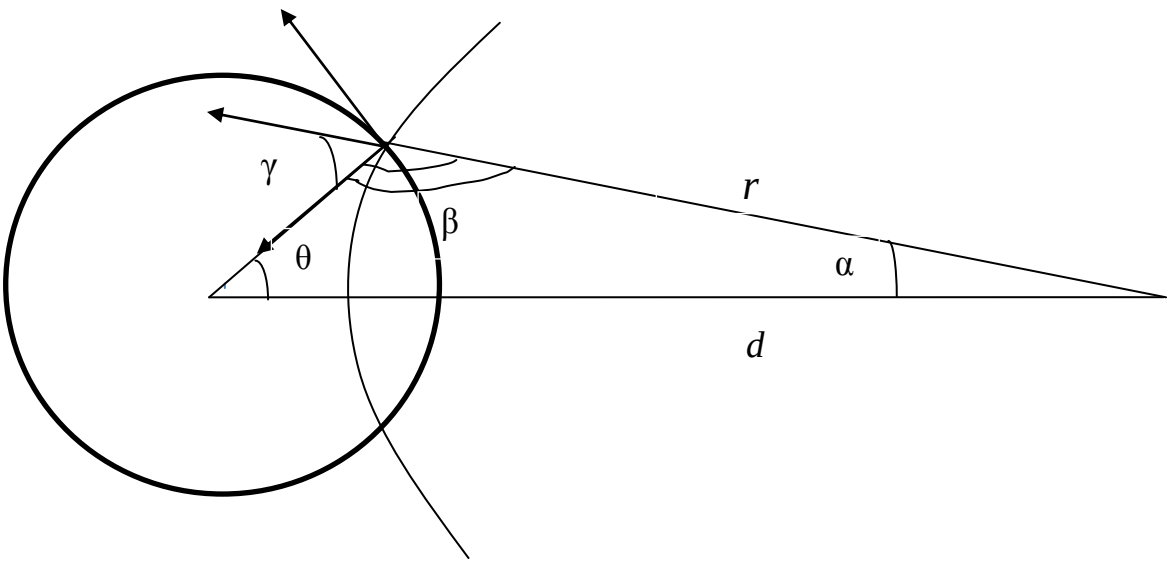


Рисунок 2 – Схема акустической эмиссии двух каверн

Поскольку среда за пределами указанной сферы упругая, то на поверхности сферы справедлив закон Гука:

$$\sigma_{r\theta} = -\sigma_{rr}(r,t)\cdot\sin\gamma = K\cdot A_{ll}\cdot\delta_{r\theta} + 2\cdot\mu\left(A_{r\theta} - \frac{1}{3}\cdot\delta_{r\theta}\cdot A_{ll}\right). \quad (3)$$

Здесь $K = \lambda + \frac{2}{3}\cdot\mu$ – коэффициент всестороннего сжатия; $\delta_{r\theta} = 0$ – символ Кронекера; λ, μ – коэффициенты Ламе; $A_{ll} = A_{rr} + A_{\theta\theta} + A_{\phi\phi}$ – компоненты тензора деформаций.

На границе растущей неупругой зоны $r = R$, давление равно пределу упругости P_0. На поверхности $r = R$ можем написать закон Гука:

$$\left(\lambda\cdot\left(\frac{\partial A_r}{\partial r} + 2\frac{A_r}{r} + \frac{1}{r}\frac{\partial A_\theta}{\partial\theta} + \frac{A_\theta}{r}\operatorname{ctg}\theta\right) + 2\cdot\mu\frac{\partial A_r}{\partial r}\right)_{r=R} = -P_0 - \sigma_{rr}(r,t)\cdot\cos\gamma, \quad (4)$$

где A_r и A_θ даны в виде

$$A_r = \frac{\partial\Psi}{\partial r} + \frac{1}{r}\cdot\operatorname{ctg}\theta\cdot\frac{\partial B_\phi}{\partial\theta}, \quad A_\theta = \frac{1}{r}\frac{\partial\Psi}{\partial\theta} - \operatorname{ctg}\theta\cdot\frac{\partial B_\phi}{\partial r}.$$

Находя из рисунка 2 γ и подставляя вместе с уравнением (2) в уравнение (4), получили систему уравнений для скалярного и компоненты векторного потенциала,

где Ψ и B_φ:

$$\Psi(\vec{r},t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n^{(l)}\left(t - \frac{r}{C_l}\right)\cdot I_{n+\frac{1}{2}}\left(\frac{r}{R}\right)\cdot P_n(\cos\theta),$$

$$B_\phi(\vec{r},t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n^{(t)}\left(t - \frac{r}{C_t}\right)\cdot I_{n+\frac{1}{2}}\left(\frac{r}{R}\right)\cdot P_n(\cos\theta). \quad (5)$$

Здесь $P_n(x)$, $I_{n+\frac{1}{2}}(x)$ – функции Лежандра соответственно 1-го рода и функции Бесселя; $C_n^{(i)}(x)$ – произвольные функции.

Подставляя выражения (5) в последнюю систему уравнения и применив преобразование Фурье, получим систему алгебраических уравнений

$$\sum_{n=0}^{\infty} X_{1\Psi}^{(n)}(\omega,\nu)\cdot C_n^{(l)}(\omega)+\sum_{n=0}^{\infty} X_{1B}^{(n)}(\omega,\nu)\cdot C_n^{(t)}(\omega)=Y_1(\omega),$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} X_{2\Psi}^{(n)}(\omega,\nu)\cdot C_n^{(l)}(\omega)+\sum_{n=0}^{\infty} X_{2B}^{(n)}(\omega,\nu)\cdot C_n^{(t)}(\omega)=Y_2(\omega).$$

где ω – спектральная частота.

Таким образом, в результате теоретического исследования мы получили систему алгебраических уравнений. Это система допускает численное решение, что позволить расчитать спектр акустических эмисии.

Список литературы

1. Иванов, А. Ю. Расчет временной зависимости давления в упругой волне, инициированной лазерным пробоем в твердой среде / А. Ю. Иванов // Акустическая диагностика процесса лазерной обработки материалов : монография / А. Ю. Иванов. – Гродно : ГрГУ, 2008. – С. 36–38.

2. Иванов, А. Ю. Расчет временной зависимости давления в упругой волне, инициированной лазерным пробоем в твердой среде / А. Ю. Иванов // Акустическая диагностика процесса лазерной обработки материалов : монография / А. Ю. Иванов. – Гродно : ГрГУ, 2008. – С. 38–39.

As a result of a theoretical study of acoustic emission during the growth of cavities with a laser effect on a transparent dielectric, a system of algebraic equations was obtained. This system allows a numerical solution that allows to calculate the spectrum of acoustic emissions.

Меттиев Азизджан Курбанбаевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, aziz.mettiyew97@gmail.com.

Научный руководитель – *Иванов Алексей Юрьевич*, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, ion_ne@mail.ru.

УДК 535.343+543.42

А. А. МИНЧЕНЯ, П. Г. КЛИМОВИЧ

КИСЛОТНО-ОСНОВНОЕ РАВНОВЕСИЕ КОРРОЛОВ В БИНАРНЫХ РАСТВОРИТЕЛЯХ MeCN-EtOH

Были изучены спектры поглощения корролов в бинарном растворителе MeCN-EtOH. Были найдены зависимости степени депротонированния корролов от объемного состава бинарной смеси. Предложено, что найденные различия в степени протонирования корролов в этаноле обусловлены изменениями основности макроцикла корролов.

Ранее было показано [1], что величина основности растворителя не может объяснить закономерности изменения в кислотно-основном равновесии в ядре тетрапиррольного макроцикла корролов. Попытки установить корреляцию между смещением кислотно-основного равновесия в ядре макроцикла и каким-либо из эмпирических параметров, описывающих полярность растворителя, также не привели к успеху. Асимметричность молекулярной структуры макроцикла корролов приводит к тому, что константы кислотности либо основности для любого из пиррольных (пирролениновых) колец могут различаться. При этом молекула свободного основания коррола характеризуется высокой скоростью таутомеризации, так что в растворе одновременно присутствуют два NH-таутомера. Межмолекулярное взаимодействие при сольватации молекулами одного и того же растворителя будет существенно зависеть от того, какова структура данного таутомера, поскольку любая молекула растворителя обладает как основными, так и кислотными свойствами (способностью вступать в межмолекулярные взаимодействия, выступая либо акцептором, либо донором протона в образовании водородной связи). Таким образом, предложена модель многоцентровости межмолекулярных взаимодействий в ядре тетрапиррольного макроцикла при сольватации молекул корролов в растворах [2].

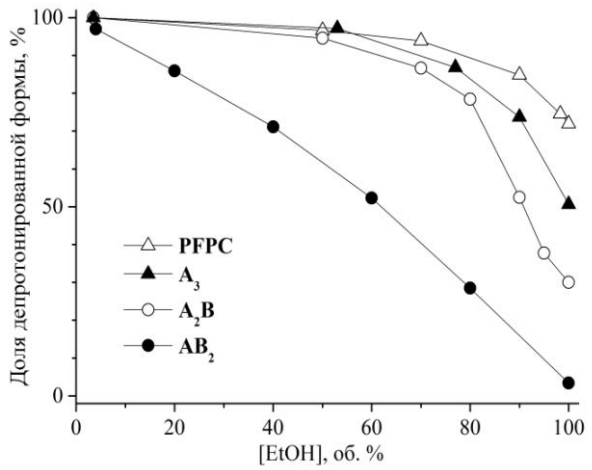


Рисунок 1 – Зависимость доли депротонированной формы корролов от объёмной концентрации этанола в бинарном растворителе MeCN-EtOH

В настоящей работе исследовали спектры поглощения корролов в бинарных растворителях MeCN-EtOH различающихся соотношением компонентов. Спектр поглощения коррола, измеренный в ацетонитриле, представляет спектр поглощения депротонированной формы коррола, который характеризуется интенсивной полосой поглощения с максимумом при 620 нм [1]. Поглощение свободного основания коррола на данной длине волны пренебрежимо мало. Поэтому доля депротонированной формы корролов может быть определена как отношение оптических плотностей на длине волны 620 нм для исследуемого спектра и спектра в ацетонитриле. На рисунке 1 приведена зависимость доли депротонированной формы корролов от объемной концентрации этанола в бинарном растворителе MeCN-EtOH. С ростом концентрации этанола происходит протонирование, однако степень протонирования различается в зависимости от строения молекулы коррола, что, по нашему мнению, обусловлено различием в основности макроцикла.

Список литературы

1. Solvent-Dependent Deprotonation of meso-Pyrimidinylcorroles: Absorption and Fluorescence Studies / M. M. Kruk [et al.] // J. Phys. Chem., A. – 2012. – Vol. 116, № 44. – P. 10704–10711.

2. Kruk, M. M. On the Shift of Equilibrium Between the Free Base Corroles and Their Deprotonated Forms in Solution / M. M. Kruk, W. Maes, R. Paolesse // Intern. Workshop on Photochem. of Organic Molecules dedicated to the 85-th anniversary of academician G. P. Gurinovich, Sept. 18–20, 2018, Minsk, Belarus : Program and Book of Abstracts. – Minsk : BSTU, 2018. – P. 43.

The absorption spectra of corroles were studied in binary MeCN-EtOH solvent. Dependencies of the corrole deprotonation degree on the composition of binary mixtures have been found. Observed differences of the corrole deprotonation degree in ethanol was proposed to be due to the basicity changes of the corrole macrocycle.

Минченя Анна Андреевна, студентка Белорусского государственного технологического университета, Минск, Беларусь, anechkaf027@gmail.com.

Климович Павел Геннадьевич, студент Белорусского государственного технологического университета, Минск, Беларусь, darkkarkasson@gmail.com.

Научный руководитель – *Крук Николай Николаевич*, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики Белорусского государственного технологического университета, Минск, Беларусь, m.kruk@belstu.by.

УДК 620.1-034.294;546.883;546.82

Д. В. МИР, Н. С. ПИСАРЕНКО

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДЕРЖЕК СИГНАЛА В МЕЖУРОВНЕВОЙ СТРУКТУРЕ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Рассматривается методика определения задержек сигнала в межуровневой структуре межсоединений интегральных микросхем. Выделены преимущества моделирования задержек сигнала в программном пакете ANSYS. Представлены результаты влияния материала межсоединений и межуровневой изоляции на величину задержек сигнала.

Совершенствование микроэлектронных приборов связано с увеличением быстродействия и с увеличением степени интеграции, и, следовательно, уменьшением размеров элементов. Однако при уменьшении размеров элементов проблема межсоединений интегральных микросхем (ИМС) становится главным лимитирующим фактором дальнейшего развития, так как временные емкостно-резистивные задержки (RC-задержки) распространения сигнала между транзисторами ограничивают быстродействие ИМС.

Система межсоединений, исключающая многократные взаимные пересечения проводников, в таких схемах, как правило, не может быть реализована. Поэтому соединяющие проводники нельзя расположить в одной плоскости и приходится использовать многоуровневую систему металлизации [1].

В процессе проектирования определение RC задержек проводится во время разводки топологии, чтобы учесть паразитные эффекты. Быстрое и точное определение паразитных эффектов на кристалле и времени задержки стало очень важной задачей. Величина задержки сигнала может быть определена при помощи 2D и 3D программ по моделированию паразитных эффектов в программных пакетах, таких как ANSYS, COMSOL Multiphysics и др. [2].

В настоящее время, полное определение паразитных R и C элементов возможно, благодаря созданию таблиц соответствия для заведомо известных образцов, используя программы по определению полей либо экспериментальные тестовые структуры [3; 4].

Согласно упрощенным представлениям, для субмикронных ИМС модель емкости токопроводящих дорожек складывается из емкости параллельных пластинок $C_{L\text{-}G}$ (относительно нижележащих токопроводящих дорожек или относительно «земли») и краевой емкости $C_{L\text{-}L}$. Схематическое представление емкостей в межуровневой структуре представлено на рисунке 1.

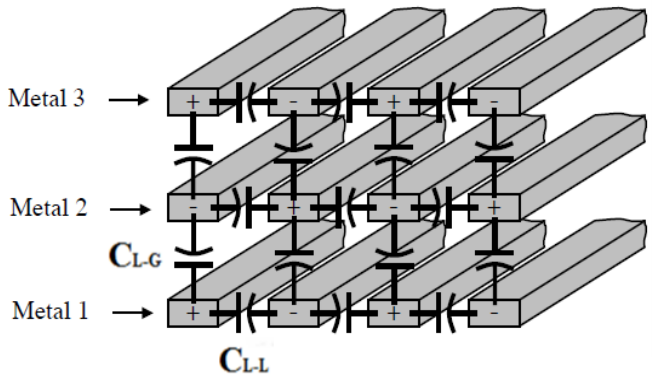


Рисунок 1 – Схематическое представление паразитной ёмкости в межуровневой структуре

Построение компьютерной модели межсоединений тестовой матрицы для исследования задержек сигнала выполнялось при помощи программного пакета ANSYS (рисунок 2).

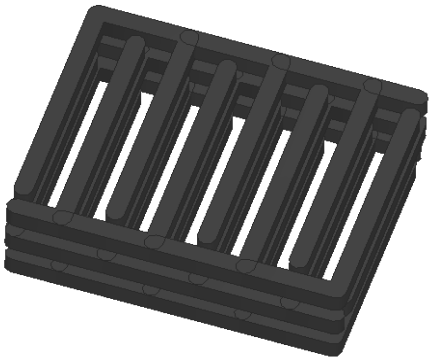
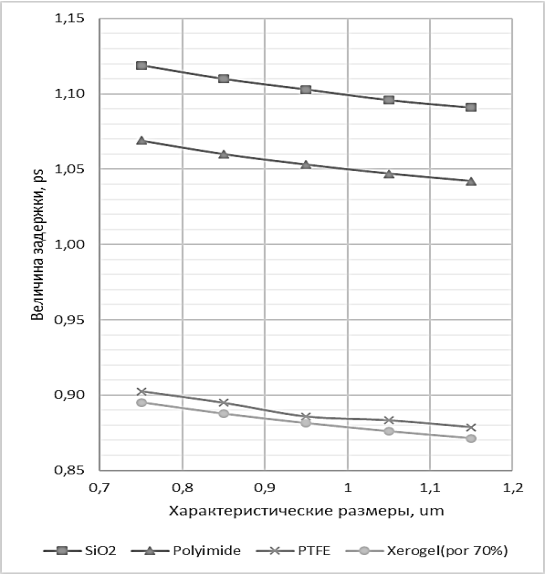


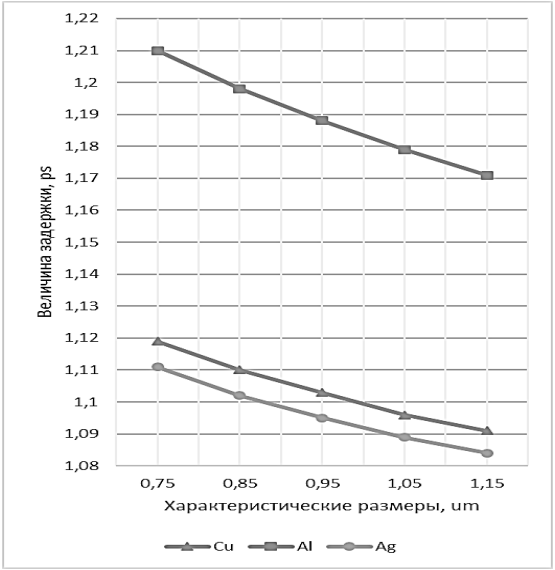
Рисунок 3 – Визуализация 3D модели для исследования задержек сигнала

Уменьшение размеров элементов микросхемы приводит к уменьшению площади поперечного сечения межсоединений, следовательно, увеличивается сопротивление проводников. Также с уменьшением размеров элементов уменьшается расстояние между ними, заполненное межуровневым диэлектриком, что, в свою очередь, приводит к нежелательному росту емкостной составляющей RC-задержки сигнала, что, в конечном итоге, может свести на нет увеличение быстродействия за счет сокращения длины канала. Одним из методов минимизации данного эффекта является замена стандартного материала SiO_2 с диэлектрической постоянной (k = 3,9) на low-k материал (материал с низкой диэлектрической постоянной, k < 3,9).

Результаты оценки влияния low-k материала и материала межсоединении на величину задержки сигнала представлены на рисунке 3.



а



б

Рисунок 3 – Графики зависимости величины задержки сигнала от характеристических размеров тестовой структуры: а) в зависимости от материала межуровневого диэлектрика; б) в зависимости от материала металлизации

Как видно из рисунка 3*а*, применение low-k материалов, таких как политетрафторэтилен (PTFE) и ксерогель пористостью 70 % в качестве межуровневого диэлектрика позволяет на 20 % снизить емкостную составляющую RC-задержки, что в свою очередь уменьшает задержку сигнала межсоединений. На рисунке 3*б* видно, что выбор материала межсоединений также играет существенную роль в определении величины задержки сигнала. Так, применение меди в качестве материала межсоединений позволяет на 10 % снизить резистивную составляющую RC-задержки, что положительно влияет на скорость распространения сигнала.

Исходя из результатов представленных исследований, можно говорить о целесообразности использования ANSYS для быстрого определения величины задержки сигнала в межуровневой структуре межсоединений интегральных микросхем.

Список литературы

1. Исследовать закономерности управления диэлектрической проницаемостью анодного оксида алюминия путём регулирования его пористости и разработать научные основы технологии создания алюмооксидной изоляции с низкой диэлектрической проницаемостью для ИС с субмикронными проектными нормами : отчет о НИР (заключ.) / БГУИР ; рук. работы С. К. Лазарук. – Минск, 2004. – Ч. 1. – 25 с. – № ГР 20011524.

2. Kim, S. Modeling and screening on-chip interconnect inductance / S. Kim. – Dresden, 2004. – 157 с.

3. Зайцев, Н. А. Физико-технологические проблемы проектирования ультрабольших интегральных схем с пониженной мощностью потребления / Н. А. Зайцев, И. В. Матюшкин, А. И. Сухопаров // Исследовано в России. – 2007. – № 2. – С. 25–31.

4. Synopsys Inc. Star-RC XT Option User Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.synopsys.com/.

A model of the structure of interconnects using 0,35 micron technology has been built. The analysis of the structure on the magnitude of the signal delay depending on the material of the interlevel dielectric and the metallization material is given. The values of the signal delay were determined, and on the basis of the results obtained, the optimal choice of material for the manufacture of ICs was chosen.

Мир Дмитрий Владимирович, магистрант факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, Dmitriy.Mir@tut.by.

Писаренко Никита Сергеевич, магистрант факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, 2176nikita2176@gmail.ru.

Научный руководитель – *Черных Александр Георгиевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нано-электроники факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, chernykh@bsuir.by.

УДК 537.311.322

А. В. НИКИТИНА

УШИРЕНИЕ КОНТУРА СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРАХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЁМКОСТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ

Определены основные параметры дефектов такие, как энергия ионизации, сечение захвата, эффективность захвата. Наличие уширения линии свидетельствует об образовании дислокаций при облучении нейтронами. Исходя из полученных данных доказано, что набор энергетических уровней дислокации представляет собой зону. Результаты работы могут быть использованы для прогнозирования радиационной стойкости детекторов, используемых в экспериментах по физике высоких энергий.

Исследовались радиационные нарушения в высокоомном детекторном кремнии (R = 1 кОм/см), легированном фосфором. Для эксперимента были приготовлены p^+–n структуры методом кратковременной диффузии Бора. Глубина залегания p^+–n перехода 1 мкм. Толщина слоя металла Al – 4 мкм. Параметры радиационных дефектов определялись из измерений спектров нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней. Облучение образцов проводилось при комнатной температуре электронами с энергией 6 МэВ и быстрыми нейтронами реактора.

На рисунке 1 приведены спектры DLTS исследуемых структур при различных окнах регистрации. Проведены расчеты параметров дефектов на основе метода Аррениуса [1].

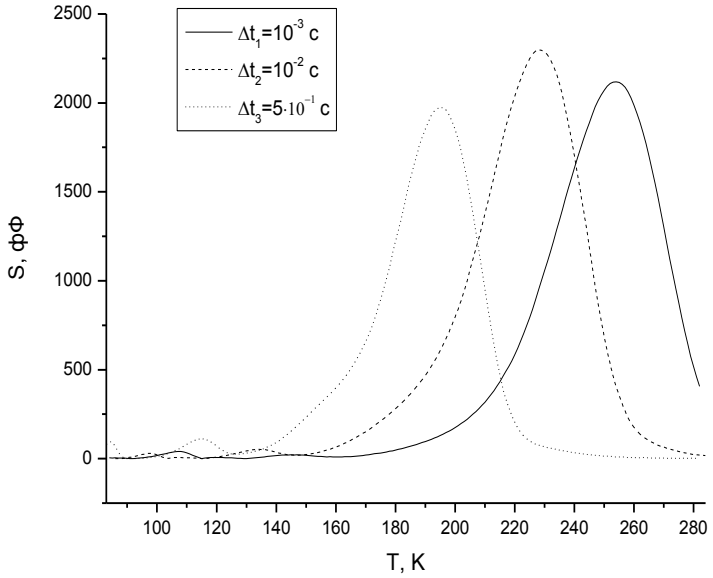


Рисунок 1 – Спектр DLTS для детекторного кремния, облучённого быстрыми нейтронами реактора, при различных окнах регистрации

Результаты представлены в таблице. Идентифицирована природа дефектов: VO_i – комплекс «вакансия – кислород» (А-центр), $VV^{0/-}$, $VV^{-/=}$ – дивакансия в различных зарядовых состояниях. Такие же дефекты наблюдаются и в образцах, облученных электронами. Однако дефект $VV^{0/-}$ практически не проявляется. Это свидетельствует о наличии в образце кластеров дефектов. На рисунке 2 представлен участок спектра DLTS в области пика, обусловленного дефектом $VV^{-/=}$, в случае облучения электронами и нейтронами. Сравнивая спектры DLTS для кремния, облученного электронами и нейтронами, легко заметить уширение линии спектра для нейтронов (рисунок 2). Это также является признаком наличия в образце кластера. Оба этих фактора подтверждают наличие в кремнии кластера дефектов. Кроме этого, при увеличении импульса заполнения не происходит насыщения амплитуды, как в случае точечных дефектов, а наблюдается логарифмическая зависимость. Такими кластерами в нашем случае могут быть дислокации, которые ассоциируются с большим числом электронных уровней в запрещенной зоне. Они формируют глубоколежащие энергетические полосы, в отличие от точечных дефектов, которым соответствуют дискретные энергетические уровни.

Таблица – Найденные параметры дефектов при облучении нейтронами

E, эВ	$\sigma \cdot 10^{-14}$, см^2	g, см$^{-1}$	Идентификация дефектов
0,192	2,435	0,005	VO_i
0,260	1,004	0,006	$VV^{0/-}$
0,418	0,082	0,250	$VV^{-/=}$

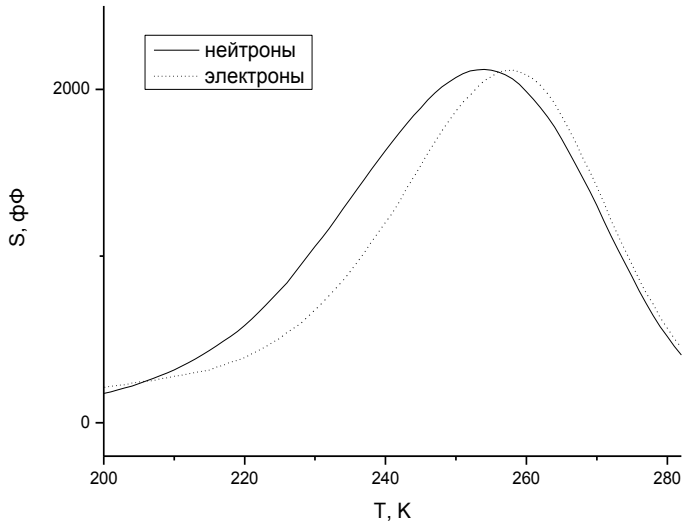


Рисунок 2 – Пик DLTS для кремния, облучённого нейтронами потоком $1{,}7 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$ и электронами потоком $2 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$. Дефект $VV^{-/=}$

Таким образом, дислокации могут приводить к уширению пика за счет распределения энергетических состояний дефекта, создавая зоноподобный спектр дефектов.

Список литературы

1. Lang, D. V. Reculling the origins of DLTS / D. V. Lang // Physica B : Condensed Matter. – 2007. – Vol. 401–402, № 15. – P. 7–9.

IR absorption of germanium doped with hydrogen ions has been studied depending on the duration of the thermotreatment at 400 °C. We report on discovering absorption band with the maximum at 868±8 cm^{-1}. The analysis is given for the relation of the band with local vibration mode of atomic hydrogen in the Ge lattice.

Никитина Александра Вячеславовна, студентка физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, alexandra.nikitsina@mail.ru.

Научные руководители – *Покотило Юрий Мефодиевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры энергофизики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, pokotilo@bsu.by.

Смирнова Ольга Юрьевна, старший преподаватель кафедры физической оптики и прикладной информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

УДК 535.391:621.376

Г. Н. НУРГЕЛДИЕВА

НАГРЕВАНИЕ ПРОЗРАЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ИХ ПОВЕРХНОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Целью данной работы являлось теоретическое исследование нагревания прозрачных диэлектриков при лазерном излучении. Был проведен расчет температуры на поверхности облучаемого образца через 1 мкс от начала воздействия лазерного излучения как функции начальной температуры мишени.

Лазер – устройство, преобразующее различные виды энергии в энергию когерентного, узконаправленного светового излучения в результате вынужденного излучения или вынужденного рассеяния света. Уже второе десятилетие лазеры используются в медицине и на производстве (при обработке стекла, дерева и других материалов). Лазеры нашли [1] применение в самых различных областях – от коррекции зрения до управления транспортными средствами, от космических полётов до термоядерного синтеза.

Прошивка отверстий в металлических образцах с помощью лазера явилась первым примером успешного применения лазерного излучения на практике. Поэтому уже первые теоретические модели лазерного воздействия рассматривали именно этот процесс. Простейший способ проделать отверстие в образце состоит в том, чтобы нагреть облучаемую область выше температуры кипения. Тогда испарённое вещество, обладающее давлением выше давления окружающей среды, неминуемо разлетится.

Рассмотрим уравнение

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + A\begin{cases} e^{-\frac{t}{\tau}}, & t > 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad x=0 \tag{1}$$

$$T(t<0) = T_0$$

Решая это уравнение, получили

$$T(t) = T_0 \cdot e^{-\lambda \cdot a^2 \cdot t} \cdot \cos\left(\sqrt{\lambda} \cdot x\right) \cdot B(t) \tag{2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$T_0 \cdot e^{-\lambda \cdot a^2 \cdot t} \cdot \cos\left(\sqrt{\lambda} \cdot x\right) \cdot \frac{dB(t)}{dt} = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{3}$$

Решая дальше уравнение (3), получили выражение для $B(t)$ и подставили в уравнение (2):

$$T(t) = T_0 \cdot e^{-\lambda \cdot a^2 \cdot t} \cdot \cos\left(\sqrt{\lambda} \cdot x\right) \cdot \left(\frac{A}{T_0 \cdot \cos\left(\sqrt{\lambda} \cdot x\right)} \cdot \frac{\tau}{\lambda \cdot a^2 \tau - 1} \cdot e^{\left(\lambda \cdot a^2 - \frac{1}{\tau}\right) \cdot t} + C \right) =$$

$$= C \cdot T_0 \cdot e^{-\lambda \cdot a^2 \cdot t} \cdot \cos\left(\sqrt{\lambda} \cdot x\right) + A \cdot \frac{\tau}{\lambda \cdot a^2 \cdot \tau - 1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{4}$$

При

$$t = 0; \qquad T(0) = T_0 (при \quad x = 0)$$

$$C = 1 - \frac{A \cdot \tau}{T_0 \cdot \left(\lambda \cdot a^2 \cdot \tau - 1\right)}$$

Подставив последнее выражение для C в уравнение (4), получили выражение для температуры.

$$T(t)=\left(1-\frac{A\cdot\tau}{T_0\cdot\left(\lambda\cdot a^2\cdot\tau-1\right)}\right)\cdot T_0\cdot e^{-\lambda\cdot a^2\cdot t}\cdot\cos\left(\sqrt{\lambda}\cdot x\right)+\frac{A\cdot\tau}{\lambda\cdot a^2\cdot\tau-1}\cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5)$$

Здесь

$\tau=1\ мкс=10^{-6}\ с$; $t=1\ мкс=10^{-6}\ с$;

$\rho_0=0{,}682\cdot10^{-7}\ Ом\cdot м$ – удельное сопротивление;

$\sigma=\frac{1}{\rho_0}=1{,}46\cdot10^{7}\ (Ом\cdot м)^{-1}$;

$\rho=11{,}336\cdot10^{3}\ \frac{кг}{м^3}$ – плотность;

$c=26{,}65\ \frac{Дж}{моль\cdot К}$;

$L_0=2{,}445\cdot10^{-8}\ \frac{Вт\cdot Ом}{К^2}$;

$\mu=207{,}2\ \frac{кг}{моль}$;

$A=1{,}9$; $x=0$; $R=1{,}5\cdot10^{-2}\ м$;

$\lambda=\frac{4\cdot\pi^2}{R^2}=17{,}52\cdot10^{4}\ м^{-2}$;

$a^2=\frac{\lambda_0}{c\cdot\rho}$;

$\lambda_0=L_0\cdot\sigma\cdot T_0$;

Мы рассчитали $T(t=1\ мкс,\ x)$ при $T_0=300\ K,\ 400\ K,\ 600\ K,\ 800\ K,\ 1000\ K$.

Таблица 1 – Расчёты температур при различных T_0

T_0, К	a^2, $\frac{м^4\cdot моль\cdot К}{Дж\cdot кг}$	λ_0, $\frac{Вт}{м\cdot К}$	$T(t=1\ мкс,\ x)$, К
300	$3{,}61\cdot10^{-4}$	107,091	299,981
400	$4{,}84\cdot10^{-4}$	142,788	399,967
600	$7{,}29\cdot10^{-4}$	214,182	599,925
800	$9{,}61\cdot10^{-4}$	285,576	799,867
1000	$11{,}56\cdot10^{-4}$	356,970	999,793

Мы построили график зависимости $T(T_0)$ при помощи программы MathCad при значениях T_0 = 300–400 К. График представляет линейную зависимость.

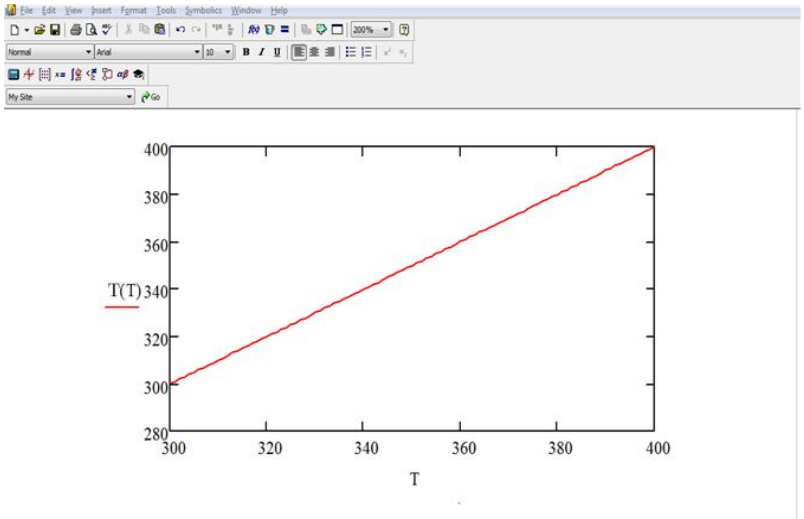


Рисунок 1 – График зависимости $T(T_0)$

Был проведен расчет температуры на поверхности облучаемого образца через 1 мкс от начала воздействия лазерного излучения как функции начальной температуры мишени. Пользуясь данным графиком, можно определить, будет ли через 1 мкс полимер разлагаться на мономеры. Подобный расчет может быть проведен и для любого времени после начала воздействия лазерного излучения на прозрачный диэлектрик.

Список литературы

1. Интернет-портал Bourabai Research [Электронный ресурс]. – Акмолинск, 2012. – Режим доступа: http://bourabai.kz/physics/lasers.html. – Дата доступа: 27.12.2018.

2. Титов, А. К. Численное моделирование нагрева и плавления сферической частицы металла излучением лазера / А. К. Титов, О. Ю. Ешевский // Arctic Evironmental Research. – 2010. – Вып. 1 – С. 111–115.

The purpose of this work was a theoretical study of the heating of transparent dielectrics with laser radiation. The temperature was calculated on the surface of the irradiated sample after 1 μs from the onset of exposure to laser radiation as a function of the initial temperature of the target.

Нургелдиева Гулзар Нургелдиевна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, gulzarnurgeldieva96@gmail. com.

Научный руководитель – *Иванов Алексей Юрьевич,* доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, ion_ne@mail. ru.

УДК 535.338.3

В. В. ОЛЬХОВИК

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАДЕРЖКИ МЕЖДУ ИМПУЛЬСАМИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ АНАЛИЗИРУЕМЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Лазерно-эмиссионная спектроскопия – один из методов атомно-эмиссионного спектрального анализа, в котором используют спектры плазмы лазерного пробоя (лазерной искры) для анализа твёрдых образцов, жидкостей, газовых сред, взвешенной пыли и аэрозолей.

Определяющее значение для спектрального анализа имеет интенсивность анализируемых спектральных линий. Использование формулы Саха позволяет перейти к количественному составу исследуемого материала. Интенсивность спектральных линий возможно увеличить за счет применения высоких энергий и частоты лазерных импульсов (~100 мГц) и при использовании двухимпульсного режима работы лазера. Следует учесть, что при использовании высоких энергий и частоты лазерных импульсов уменьшается воспроизводимость результатов и увеличивается погрешность измерений. Использование двухимпульсного режима позволяет

избежать данных недостатков. Также следует учесть, что в данном случае поверхность исследуемого материала повреждается в меньшей степени [1–2].

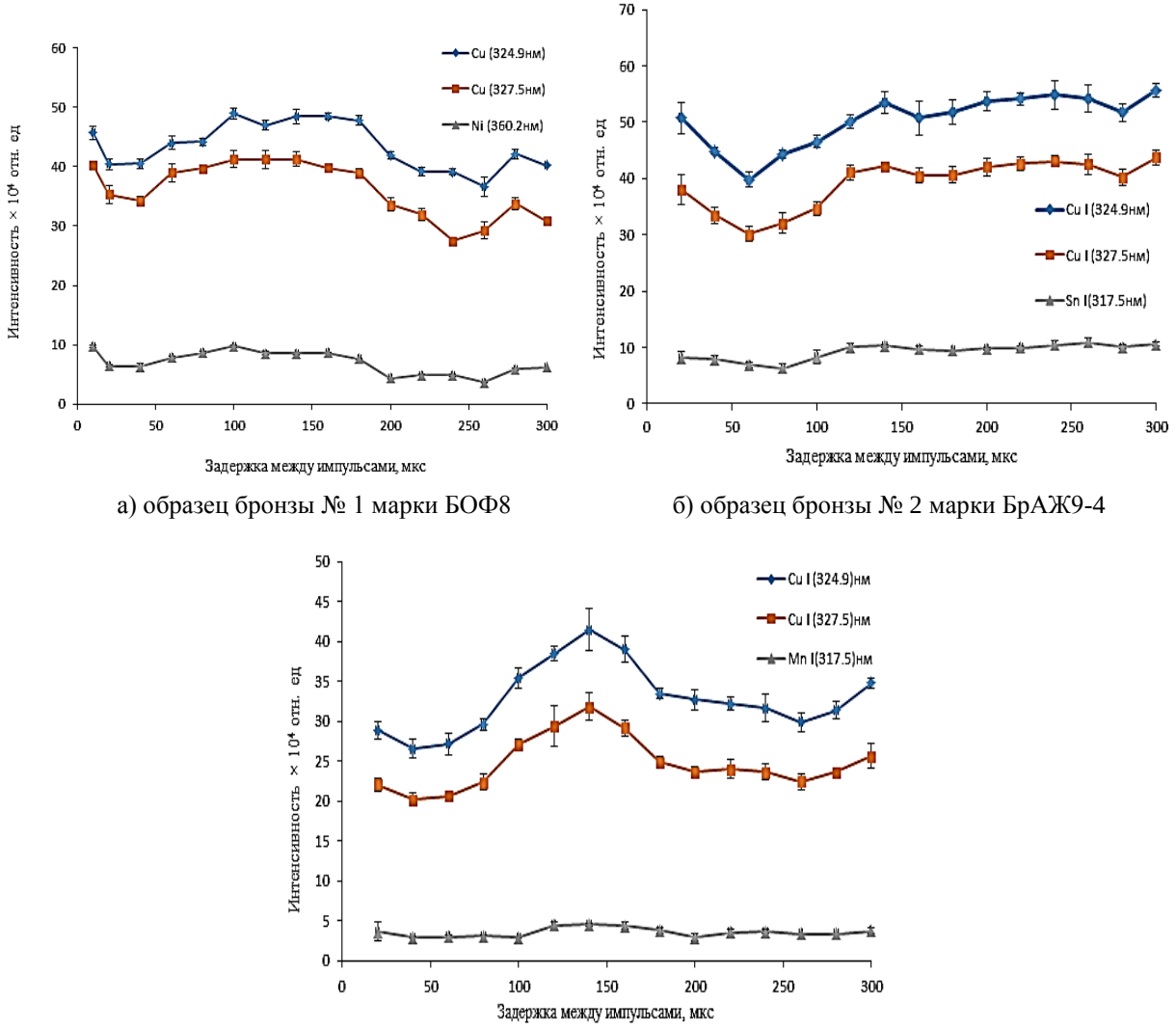
Цель данного исследования: изучение влияния задержки между импульсами на интенсивность анализируемых спектральных линий.

В качестве исследуемых образцов были взяты 3 образца бронзы различных марок: № 1 – БОФ8, № 2 – БрАЖ9-4, № 3 – БрА5.

В ходе анализа спектров были обнаружены наиболее интенсивные спектральные линии исследуемых сплавов бронз. Для образца № 1: Cu I (λ = 324,9 нм), Cu I (λ = 327,5 нм), Ni I (λ = 360,2 нм). № 2: Cu I (λ = = 324,9 нм), Cu I (λ = 327,5 нм), Sn I (λ = 317,5 нм). Самые интенсивные линии у образца № 3: Cu I (λ = 324,9 нм), Cu I (λ = 327,5 нм), Mn I (λ = 279,4 нм).

Исследования проводились на лазерно-эмиссионном анализаторе LIBS при работе прибора в двухимпульсном режиме. Первый импульс формировал лазерно-плазменный факел, а второй его дополнительно возбуждал. Задержка между импульсами составляла 6 мс, частота следования лазерных импульсов – 5 Гц. Ток накачки лазера составлял 26 А. Энергия лазерного импульса при указанных параметрах накачки равнялась 46 мДж. По исследуемым образцам производилось 5 серий импульсов при каждом измерении из Nd-YAG^{3+} -лазера в разные участки исследуемого материала, после чего данные отображались в окне программы QSp Client [3–4].

На рисунках 1 (*а–в*) изображены зависимости интенсивности спектральных линий исследуемых образцов бронз от задержки между импульсами.



а) образец бронзы № 1 марки БОФ8

б) образец бронзы № 2 марки БрАЖ9-4

в) образец бронзы № 3 марки БрА5

Рисунок 1 – Экспериментальные зависимости интенсивности анализируемых спектральных линий от задержки между импульсами исследуемых образцов бронз

Как следует из рисунка 1 (*а–в*), для первого образца бронзы оптимальные задержки между импульсами для линий меди – 100–200 мкс, никеля – 80–160 мкс. Для второго образца оптимальные задержки между импульсами для линий меди – 200–260 мкс, олова – 120–300 мкс. Для третьего образца бронзы оптимальные задержки между импульсами для линий меди – 140 мкс, марганца – 120–160 мкс.

Из экспериментальных результатов следует, что при воздействии на исследуемый объект сдвоенными лазерными импульсами следует учитывать задержку между ними, поскольку при определенном значении данного временного интервала происходит рост интенсивности анализируемых спектральных линий, что в свою очередь приводит к увеличению точности измерений качественного и количественного состава исследуемых веществ.

Список литературы

1. Воропай, Е. С. Динамика процессов в приповерхностной плазме при лазерной абляции латунных сплавов типа ЛС одиночными и сдвоенными лазерными импульсами / Е. С Воропай, К. Ф. Ермалицкая // Вестн. БГУ. – 2008. – № 3. – С. 3– 6.

2. Anufrick, S. S. Chemical composition of ceramic tile glazes / S. S. Anufrik, N. N. Kurian, I. I. Zhukova, K. F. Znosko // Journal of Applied Spectroscopy. – 2016. – Vol. 83, № 5. – P. 764–770.

3. Ермалицкая, К. Ф. Двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия неоднородных объектов / К. Ф. Ермалицкая // Науч. вестн. Ужгород. ун-та. Сер. «Физика». – 2011. – № 30. – С. 296–301.

4. Ермалицкая, К. Ф. Эрозия поверхности металлов под воздействием сдвоенных лазерных импульсов / К. Ф. Ермалицкая // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы IX междунар. конф., Минск, 20–22 сент. 2011 г. / Белорус. гос. ун-т ; под ред. А. В. Родина. – Минск, 2011. – С. 44–46.

During the analysis of the spectra, the most intense spectral lines of the studied bronze alloys were found. The dependence of the intensity of the spectral lines of bronze samples on the delay between pulses was investigated.

Ольховик Виталий Викторович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, qoomkaa@mail.ru.

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

УДК 535.34;535.37;535.39

Д. А. ПАРАФИНЮК, П. А. ХОЛОВ, К. С. СУКАЛИН, Т. Ф. РАЙЧЕНОК, Н. В. ГАПОНЕНКО

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР, СФОРМИРОВАННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ

Представлены результаты исследования оптических свойств сформированной золь-гель методом многослойной структуры, состоящей из ксерогелей титаната бария, легированного европием, и диоксида кремния. Приведены спектры пропускания и отражения структуры с полосой непрозрачности в видимом диапазоне, а также люминесценции и возбуждения люминесценции европия с наиболее интенсивной полосой излучения 615 нм.

Многослойные структуры, такие как интерференционные покрытия, брэгговские зеркала или одномерные фотонные кристаллы, с полосой отражения, локализованной в различных областях оптического диапазона, широко используются в лазерной технике и оптическом приборостроении в качестве лазерных зеркал, просветляющих покрытий, интерференционных фильтров и др. Компоненты покрытий (слои) могут содержать при этом люминесцирующие ионы лантаноидов, излучающие в различных областях спектра [1–3].

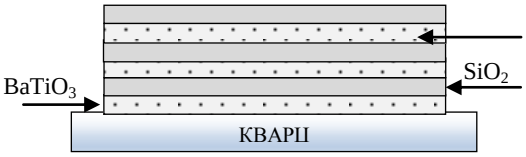


Рисунок 1 – Структура образца $BaTiO_3$

Наряду со всеми различными методами формирования многослойных покрытий, легированных и нелегированных лантаноидами, особой популярностью обладает золь-гель метод. Преимущество данного метода состоит в том, что метод не требует энергозатратного вакуумного оборудования и, соответственно,

может быть реализован на больших площадях при относительно низкой стоимости. В данной работе приведены характеристики многослойных покрытий BaTiO3/SiO2, легированных европием.

Исходными компонентами золя $BaTiO_3$ являлись ацетат бария $Ba(CH_3COO)_2 \cdot 1/2H_2O$ и тетраизопроксититан $Ti(OC_3H_7)_4$ [1]. В золь $BaTiO_3$ был добавлен нитрат европия с различной концентрацией. Пленки титаната бария и диоксида кремния наносились на кварцевое стекло методом центрифугирования со скоростью 1500 оборотов/мин. в течение 30 с, а пленки оксида кремния – со скоростью 2700 оборотов/мин. Каждый слой подвергался сушке при температуре 200 °С в течение 10 мин., затем термообработке в муфельной печи с температурой отжига 450 °С в течение 30 мин. Таким образом, на подложке было сформировано 3 пары слоев из двух золей, как показано на рисунке 1.

Спектры возбуждения люминесценции и спектры люминесценции европия в пленках $BaTiO_3$+Eu с различной концентрацией европия представлены на рисунке 2.

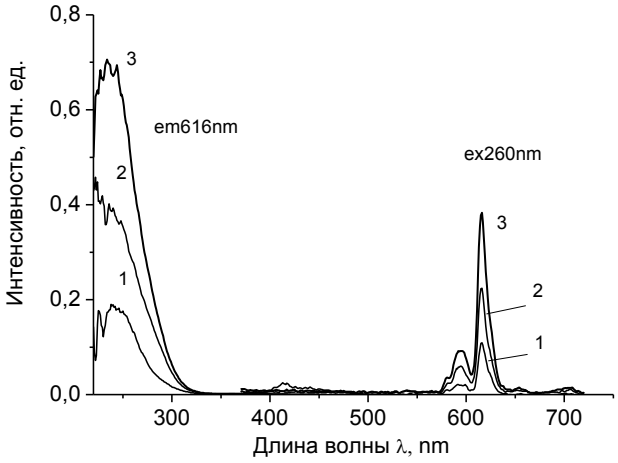


Рисунок 2 – Спектры возбуждения люминесценции и спектры люминесценции однослойных плёнок $BaTiO_3$ + Eu с различной концентрацией европия: № 1 – 0,025, № 2 – 0,05, № 3 – 0,1 моль/л

Установлено, что для концентраций европия 0,025, 0,05 и 0,1 моль/л интенсивность люминесценции европия возрастает с увеличением концентрации. Были исследованы спектры люминесценции и возбуждения люминесценции европия для данных пленок. Для люминесценции использовалась длина волны возбуждения 260 нм, спектр возбуждения люминесценции записывался для длины волны излучения 616 нм.

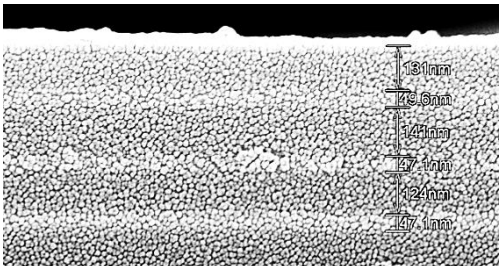


Рисунок 3 – РЭМ-изображение образца

РЭМ-изображение образца с обозначенными толщинами слоев представлено на рисунке 3. Толщины слоев ксерогелей отличаются примерно в 2 раза. Структура образца рентгеноаморфна.

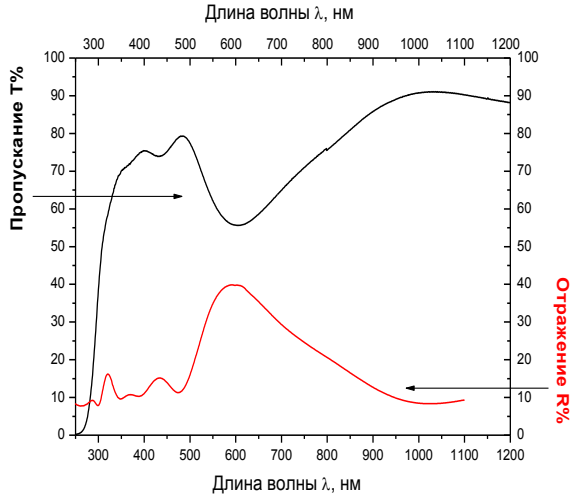


Рисунок 4 – Спектры пропускания и отражения образца

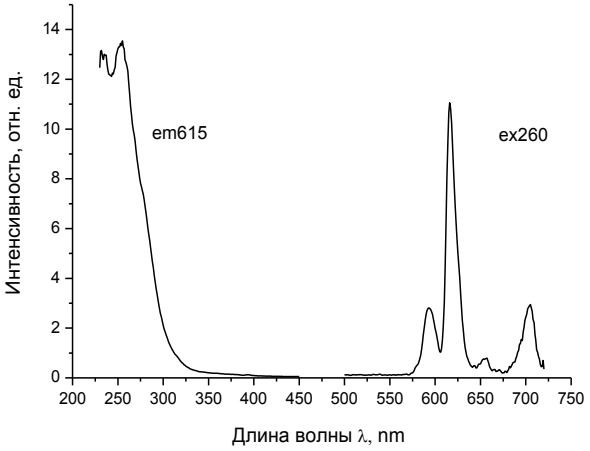


Рисунок 5 – Спектры люминесценции и возбуждения люминесценции европия в образце

Спектры пропускания и отражения образца $BaTiO_3$ + Eu/SiO_2 приведены на рисунке 4. В спектре пропускания присутствует полоса непрозрачности, которая соответствует полосе с максимумом в спектре отражения, наличие которых обусловлено интерференцией излучения на многослойных структурах. Минимум пропускания и максимум отражения приходится на 615 нм. На рисунке 5 показан спектр люминесценции и спектр возбуждения люминесценции европия в образце. Возбуждение люминесценции осуществлялось на длине волны 264 нм. Кинетика затухания люминесценции европия, измеренная для данного образца, двухэкспоненциальная с соответствующим процентным вкладом каждого свечения. Время жизни люминесценции европия в образце составляет: $\tau_1 = 4{,}33 \cdot 10^{-4}$ с (16 %); $\tau_2 = 9{,}13 \cdot 10^{-4}$ с (84 %).

Таким образом, показана возможность формирования золь-гель методом легированного европием интерференционного фильтра $BaTiO_3/SiO_2$, люминесцирующего с основным максимумом 615 нм.

Список литературы

1. Оптические свойства многослойных плёночных структур $BaTiO_3/SiO_2$, сформированных золь-гель методом / Н. В. Гапоненко [и др.] // Физика твердого тела. – 2019. – Т. 61, вып. № 3. – С. 528–532.

2. Eu3+-doped microcavities fabricated by sol-gel process / J. Bellessa [et al.] // Appl. Phys. Lett. 79 2001, 2142.

3. Almeida Rui M., and Sabine Portal. Photonic band gap structures by sol-gel processing // Current Opinion in Solid State and Materials Science 7.2 2003, pp. 151–157.

The results of the study of optical properties of the sol-gel derived multilayer structure comprising europium-doped barium titanate and silica xerogels on fused silica are presented. Transmission and reflection spectra with stop band in the visible range and europium luminescence and excitation luminescence spectra with the most intensive emission band at 615 nm are demonstrated.

Парафинюк Дарья Александровна, магистрант 1-го года обучения Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, dasha123parafinuk@mail.ru.

Холов Пайрав Алимахмадович, научный сотрудник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь.

Сукалин Кирилл Сергеевич, инженер-технолог Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь.

Райченок Тамара Фроловна, ведущий научный сотрудник Института физики им. Б. И. Степанова, Минск, Беларусь.

Научный руководитель – *Гапоненко Николай Васильевич*, доктор физико-математических наук, профессор, зав. НИЛ 4.5 «Нанофотоника» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, nik@nano.bsuir.edu.by.

УДК 538.9

С. А. ПРИЛУЦКИЙ

МОДИФИКАЦИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА ЦИРКОНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Представлены экспериментальные результаты исследования фазового состава образцов циркония, подвергнутых воздействию компрессионных плазменных потоков (КПП) в атмосфере азота. Установлен характер изменения массы образцов после воздействия КПП при различных режимах обработки.

Сплавы на основе циркония получили широкое распространение в качестве конструкционных материалов ядерных реакторов. Благодаря низкому сечению захвата нейтронов циркониевые сплавы являются подходящим материалом для изготовления оболочек твэлов [1].

Однако на данный момент остается нерешенной проблема наводораживания и коррозионного износа оболочек твэлов, поэтому актуальной является задача, направленная на повышение коррозионной стойкости циркониевых оболочек.

Одним из методов модификации свойств поверхности является воздействие на материал компрессионными плазменными потоками. Обработка образцов циркония тремя импульсами компрессионных плазменных потоков осуществлялась на расстояниях от катода 6–14 см в режиме «остаточного газа», при котором предварительно откачанную вакуумную камеру заполняли рабочим газом – азотом до давления 400 Па. Напряжение на конденсаторной батарее составляло 4 кВ. Изменение расстояния до образца позволяло варьировать плотность энергии (Q), поглощенной поверхностью, в диапазоне 27–7 Дж/см^2. Структурно-фазовое состояние поверхностного слоя исследовалось методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV в излучении CuKα в фокусировке параллельных пучков. Измерение массы производилось на аналитических весах Radwag AS/60/220/C/2/N.

Импульсное воздействие высокотемпературной плазмы на образец приводит к плавлению поверхностного слоя. В результате обработки в атмосфере азота происходят изменения в фазовом составе анализируемого слоя. На дифрактограмме (рисунок 1) образцов после обработки видно появление дифракционных пиков нитрида циркония ZrN.

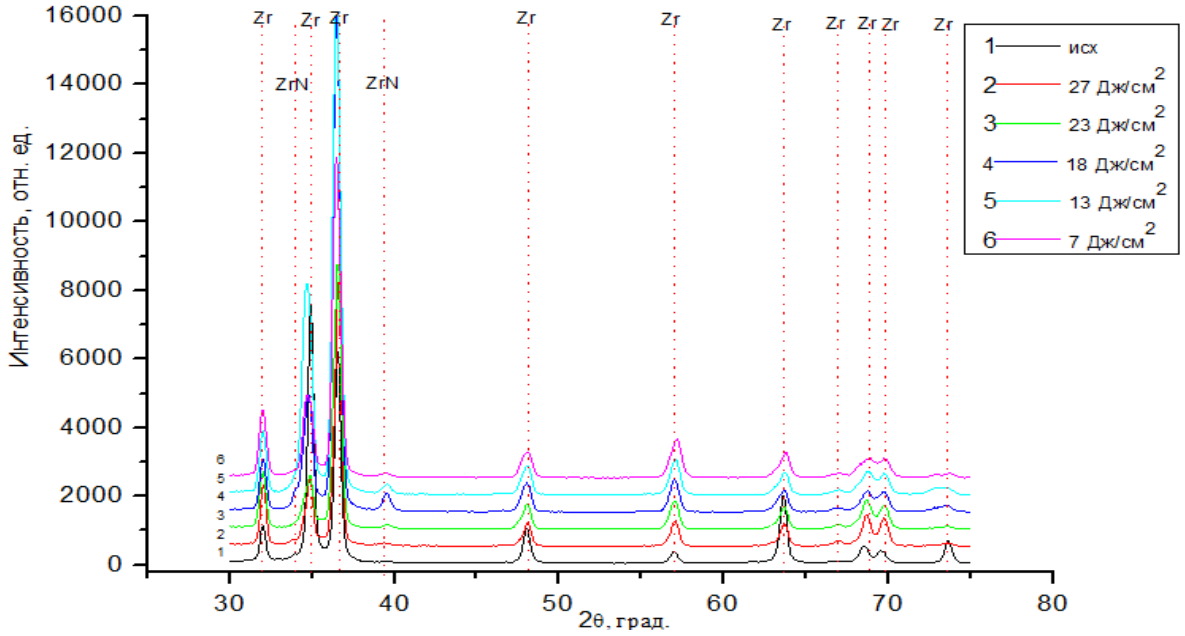


Рисунок 1 – Дифрактограммы исходного образца системы (Zr) и образцов, обработанных тремя импульсами КПП, при различной плотности поглощенной энергии

Формирование нитрида циркония при обработке КПП, генерируемыми в атмосфере азота, обусловлено диффузионным насыщением поверхностных слоев азотом [2]. Также при анализе дифрактограмм можно наблюдать, что интенсивность диффракционных линий ZrN, пропорциональная объемной доле этой фазы, меняется немонотонно с увеличением плотности поглощенной энергии и достигает максимума при $Q \approx 18$ Дж/см^2.

На рисунке 2 представлено изменение массы образцов после их обработки компрессионными плазменными потоками.

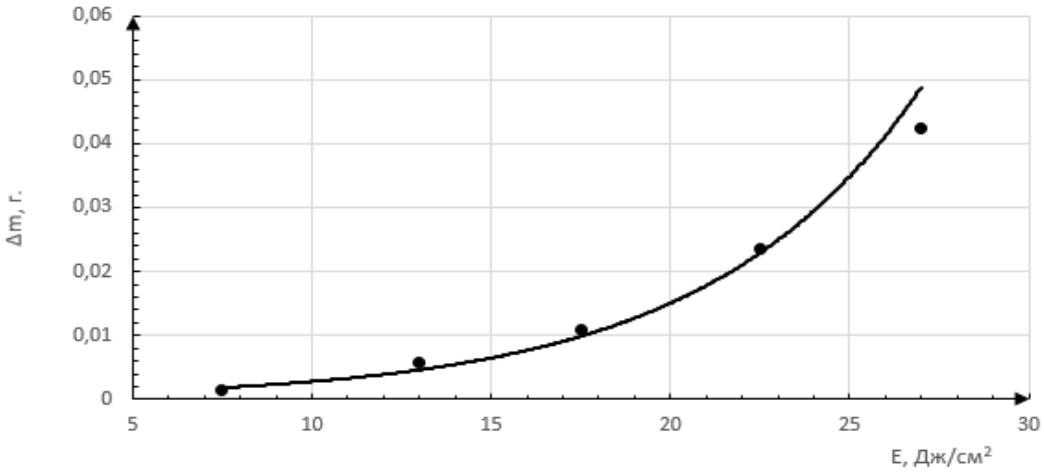


Рисунок 2 – Зависимость изменения массы образцов до и после обработки КПП от плотности поглощённой энергии

Взвешивание образцов до и после обработки КПП показало, что с увеличением плотности поглощенной энергии масса, удаленная с поверхности образцов, увеличивается по закону, близкому к экспоненциальному. Основным механизмом потери массы является гидродинамическое течение расплава под действием давления плазменного потока, растекающегося вдоль поверхности образца [3].

В результате проведенной работы было установлено, что обработка образцов циркония компрессионными плазменными потоками, генерируемыми в атмосфере азота, приводит к образованию нитрида циркония в поверхностном слое. При плазменном воздействии масса, удаленная с поверхности образца в результате гидродинамического течения расплава, увеличивается по экспоненциальному закону с увеличением плотности поглощенной энергии.

Список литературы

1. Герасимов, В. В. Материалы ядерной техники : учеб. для вузов / В. В. Герасимов, А. С. Монахов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1982. – 288 с.

2. Азотирование поверхностного слоя стали и титана компрессионными плазменными потоками / Н. Н. Черенда [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2012. – № 4. – С. 35–42.

3. V. I. Tereshin, I. E. Garkusha, A. N. Bandura, O. V. Byrka, V. V. Chebotarev, V. A. Makhlaj, D.G. Solyakov, H. Wuerz, Influence of plasma pressure gradient on melt layer macroscopic erosion of metal targets in disruption simulation experiments // J. Nucl. Mater. 313–316 (2003) 685–689.

Experimental results of zirconium samples phase composition investigation subjected to compression plasma flows treatment in a nitrogen atmosphere at different regimes are presented. Type of dependence of the mass removed from the sample surface during plasma impact on treatment parameters is established.

Прилуцкий Сергей Александрович, студент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, 375298418315@yandex.ru.

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

УДК 535.015

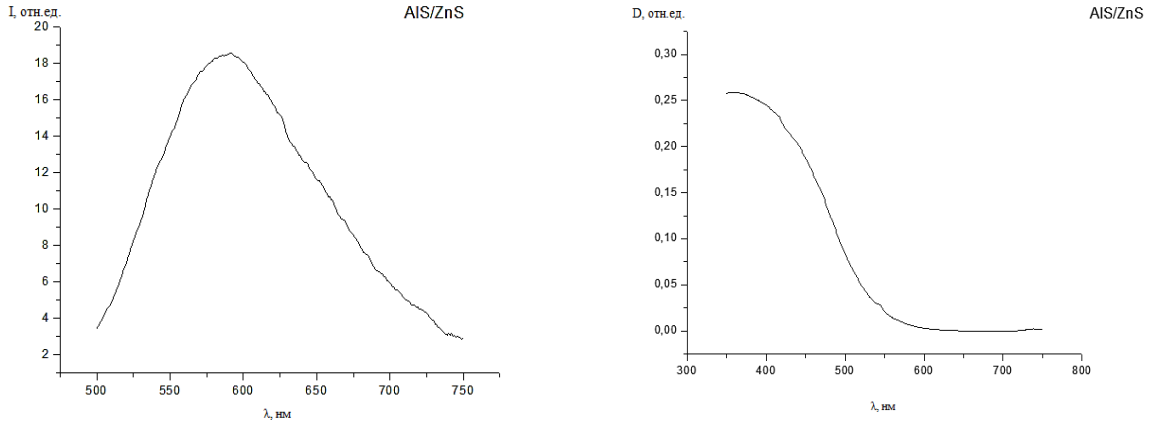
Ю. Л. РАДЕВИЧ

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ Ag-In-S/ZnS

Рассмотрены оптические свойства квантовых точек (КТ) со структурой ядро/оболочка Ag-In-S/ZnS (AIS/ZnS). Были прописаны и проанализированы спектры поглощения и флуоресценции данных КТ и на основании экспериментальных данных рассчитан относительный квантовый выход флуоресценции, а также проанализировано изображение, полученное на просвечивающем электронном микроскопе, и определено распределение квантовых точек по размерам.

В последнее время интересными для исследований становятся структуры с пониженной размерностью, например, квантовые точки. Оптические свойства КТ позволяют использовать их как в оптоэлектрических системах – светодиодах, лазерах, солнечных батареях, фотоэлектрических преобразователях, так и в медицине в качестве биологических маркеров. КТ имеют устойчивость к фотообесцвечиванию, высокую яркость флуоресценции, а также имеют спектр светимости во всем видимом диапазоне [1].

Был исследован образец водорастворимых КТ AIS/ZnS. Получены спектры поглощения и флуоресценции (рисунок 1).



а *б*

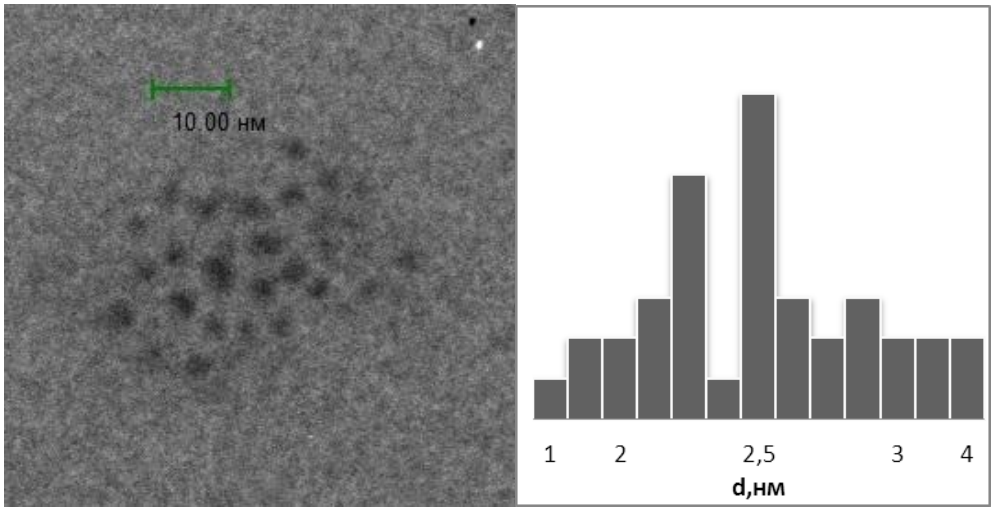
Рисунок 1 – Спектры флуоресценции (*а*) и поглощения (*б*)

Спектр флуоресценции широкий. Полуширина линии составляет 124 нм. Такой широкий спектр можно объяснить широким распределением по размерам наночастиц, а также поверхностными дефектами. Максимум флуоресценции приходится на 600 нм. В спектре поглощения не наблюдаются экситонные пики, характерные для бинарных КТ типа CdSe, CdTe. Это может быть связано с изменением в составе соотношения между Ag, In, S [2]. На просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) было получено изображение наночастиц AIS/ZnS (рисунок 2). По изображению было оценено распределение частиц по размерам, а также их средний размер, средний размер AIS/ZnS составляет 2,6 $\pm$ 0,6 нм.

Для AIS/ZnS был рассчитан относительный квантовый выход. Для его расчёта были измерены в одинаковых условиях площади под спектрами флуоресценции как исследуемого вещества, так и стандарта (S_i), оптические плотности этих веществ на длине волны возбуждения (D_i), а также показатели преломления растворителей (n_i), в которых происходят исследования [3]. За стандарт был взят раствор родамина 6G в этаноле. Расчёт произвели по формуле:

$$\eta_x = \eta_{\text{ст}} \frac{D_{\text{ст}}}{D_x} \frac{S_x}{S_{\text{ст}}} \frac{n_x^2}{n_{\text{ст}}^2}.$$

В результате квантовый выход получился равным (49 $\pm$ 5) %.



а *б*

Рисунок 2 – ПЭМ изображение КТ AIS/ZnS (а), распределение частиц по размерам (б)

Исследованы такие оптические свойства Ag-In-S/ZnS квантовых точек, как спектры поглощения (оптической плотности) и флуоресценции, измерен квантовый выход флуоресценции и распределение по размерам. В спектре поглощения отсутствуют экситонные пики. Спектр флуоресценции широкий (124 нм), одной из причин широкого спектра является разброс наночастиц по размерам. Квантовый выход составил (49 $\pm$ 5) %.

Список литературы

1. Наночастицы, наносистемы и их применение. Ч. 1. Коллоидные квантовые точки / О. А. Александрова [и др.] ; под ред. В. А. Мошникова, О. А. Александровой. – Уфа : Аэтерна, 2015. – 236 с.

2. Synthesis of Luminescent Near-Infrared AgInS2 Nanocrystals as Optical Probes for In Vivo Applications / L. Liu [et al.] // Theranostics. – 2013. – Vol. 3, iss. 2. – P. 109–115.

3. Кулакова, И. И. Методы оптической спектроскопии / И. И. Кулакова, О. А. Федорова. – М. : МГУ, 2015. – 117 с.

The optical properties of core/shell quantum dots Ag-In-S/ZnS (AIS/ZnS) are considered. The absorption and fluorescence spectra of the QD data were recorded and analyzed, and the relative fluorescence quantum yield was calculated on the basis of the experimental data. The image of AIS/ZnS quantum dots was recorded with a transmission electron microscope and the size distribution of quantum dots is determined.

Радевич Юлия Леоновна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, Sankevichjulija@gmail.com.

Научный руководитель – *Стрекаль Наталья Дмитриевна*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, nat@grsu.by.

УДК 592.2:662(2-8)

Г. А. РУСАК

МИКРОСТРУКТУРА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШЕГО СПЛАВА $Bi_{32}In_{41}Sn_{27}$

Обсуждаются результаты исследования микроструктуры быстрозатвердевшей фольги сплава $Bi_{32}In_{41}Sn_{27}$. Сплав имеет дисперсную структуру и состоит из двух фаз BiIn и Sn_4In. Определены объемная доля фаз, средняя хорда и удельная поверхность межфазных границ. Получены законы, по которым изменяются эти величины.

Существующее ограничение на использование легкоплавких припоев, содержащих опасные для человека и окружающей среды свинец, кадмий и другие вредные компоненты, обусловили необходимость в проведении исследований по разработке новых припоев, в которых опасные компоненты могут быть заменены на безопасные. Сплавы системы висмут – индий и олово относятся к числу перспективных и безопасных кандидатов. Компоненты, заменяющие свинец, значительно дороже, что повышает себестоимость новых припоев. В связи с этим при изготовлении бессвинцовых припоев целесообразно применение ресурсо- и энергосберегающих технологий, к которым можно отнести высокоскоростное затвердевание [1–3].

Сплав системы $Bi_{32}In_{41}Sn_{27}$ (концентрация компонентов в ат. %) получен синтезированным сплавлением компонентов в кварцевых ампулах. Затем путем кристаллизации капли расплава на внутренней полированной поверхности быстровращающегося полого медного цилиндра диаметром 20 см была получена фольга. Охлаждение расплава производилось со скоростью свыше 10^5 К/с [2]. Исследование полученного образца проводилось с помощью электронного микроскопа LEO 1455VP.

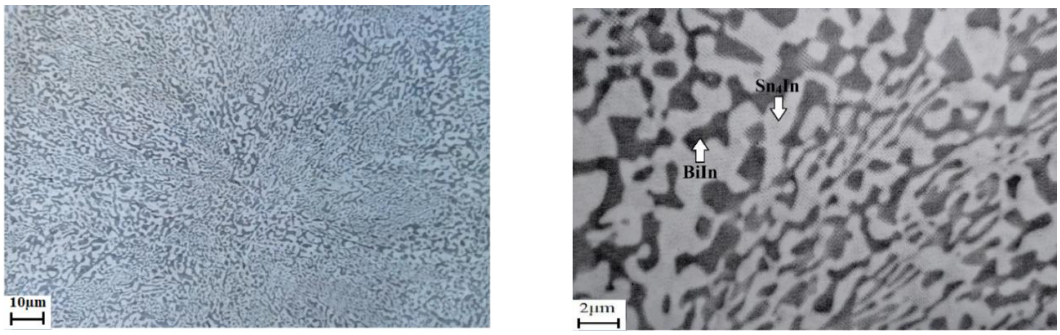


Рисунок 1 – Микроструктура поверхности А быстрозатвердевающей фольги сплава $Bi_{32}In_{41}Sn_{27}$

На полученных снимках микроструктуры присутствуют 2 фазы сплава: серая и черная. Было установлено, что серой фазой является BiIn, ей соответствует ε фаза, тип решётки – тетрагональная. Белой фазой является Sn_4In и ей соответствует γ фаза, тип решётки – гексагональная.

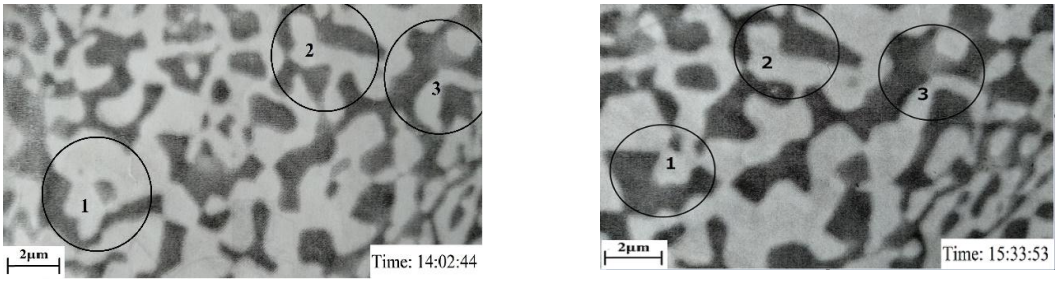


Рисунок 2 – Изменения микроструктуры $Bi_{32}In_{40}Sn_{28}$ в течение 1 ч 30 мин.

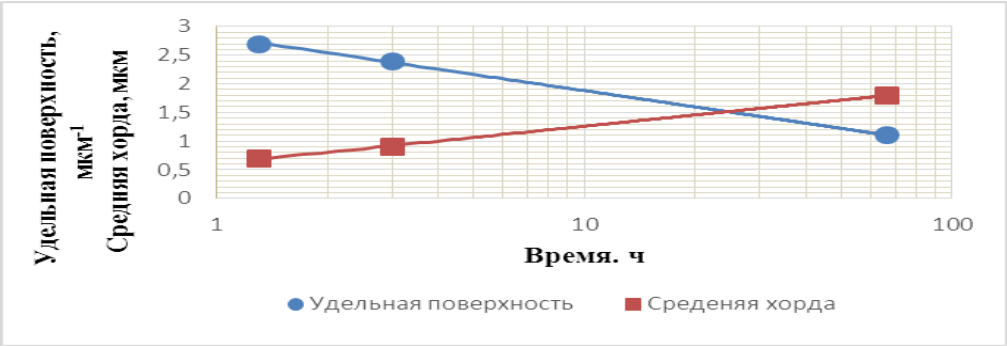
Таблица 1 – Значения объёмной доли, удельной поверхности межфазной границы и средних размеров хорд секущих на сечении выделенных фаз микроструктуры быстрозатвердевшей фольги сплава $Bi_{32}In_{41}Sn_{27}$

Параметр	Через 1,5 часа		Через 3 часа		Через 67 часов	
	BiIn	Sn_4In	BiIn	Sn_4In	BiIn	Sn_4In
V	0,46	0,54	0,49	0,51	0,52	0,48
d, мкм	1,39	1,48	1,75	1,68	1,89	1,99
S, $мкм^{-1}$	2,7		2,4		1,1	

Результаты объемной доли фаз показывают, что оба элемента практически одинаково преобладают в структуре исследуемого образца. Анализируя результаты для средних хорд обеих фаз, можно заметить их постепенное увеличение со временем. Данный процесс означает, что происходит постепенное укрупнение выделений на исследуемой структуре. На рисунке 3 предоставлены гистограммы распределения хорд случайных секущих по размерным группам.

Рисунок 3 – Гистограммы распределения хорд случайных секущих по размерным группам

Построив график зависимости удельной поверхности и средней хорды от времени в логарифмическом масштабе (рисунок 4) можно прийти к выводу, что данные величины подчиняются линейной зависимости. Это даёт возможность получить законы, по которым они изменялись:



- Для удельной поверхности: $s(t) = 2{,}88 - 1\cdot\lg(t)$;
- Для средней хорды: $d(t) = 0{,}58 + 0{,}67\cdot\lg(t)$

Рисунок 4 – Зависимость в логарифмическом масштабе удельной поверхности и средней хорды от времени

Таким образом, установлено: 1) микроструктура сплава $Bi_{32}In_{41}Sn_{27}$, состоящая из двух фаз, дисперсна и неустойчива; 2) с увеличением выдержки фольги $Bi_{32}In_{41}Sn_{27}$ при комнатной температуре удельная поверхность межфазных границ уменьшается. Средняя хорда, напротив, увеличивается. Данные величины подчиняются зависимостям: $s(t) = 2{,}88 - 1\cdot\lg(t)$; $d(t) = 0{,}58 + 0{,}67\cdot\lg(t)$.

Список литературы

1. Гусакова, О. В. Микроструктура быстрозатвердевшего сплава $Bi_{34}Sn_{63}Ag_3$ / О. В. Гусакова, В. Г. Шепелевич, С. В. Гусакова // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 2. – С. 108–113.

2. Цзинцзе, В. Структура и микротвёрдость быстрозатвердевшей фольги γ-фазы системы Sn-In / В. Цзинцзе, В. Г. Шепелевич // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2011. – № 1.

3. Fabrichnaya, O. Non-Ferrous Metal Systems / O. Fabrichnaya, V. Witusiewicz, J. Gröbner // Part 3. Materials Science International Services GmbH, Stuttgart, Germany. – 2007. – P. 191–198.

Results of investigation of rapidly solidified microstructure are discussed. The alloy has dispersive structure. Volume parts of the phase boundary are determined. The laws are obtained according to which the microstructure changes.

Русак Глеб Александрович, студент 4 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, gleb.rusack@outlook.com.

Научный руководитель – *Шепелевич Василий Григорьевич*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, shepelevich@bsu.by

УДК 543.42:666.752

Д. С. САНЮКЕВИЧ

ВЛИЯНИЕ ЗАДЕРЖКИ МЕЖДУ ИМПУЛЬСАМИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Выполнено исследование зависимостей интенсивности спектральных линий меди и алюминия от задержки между сдвоенными лазерными импульсами. Экспериментально определены оптимальные величины задержек между сдвоенными лазерными импульсами, при которых наблюдаются максимальные значения интенсивности спектральных линий.

Современные методы спектрального анализа дают объективную информацию об элементном составе исследуемых материалов, что востребовано при решении различных прикладных задач, требующих идентификации микроколичеств вещества [1–3]. Данные методы широко используются в науке, технике, производстве [4–5]. Основными их достоинствами являются экспрессность и низкие пределы обнаружения химических элементов. Использование лазеров в качестве источника получения лазерно-эмиссионной плазмы позволило уменьшить погрешность измерений количественного элементного состава и сделать спектральные анализаторы мобильными [6–7].

Воздействие импульсного лазерного излучения на поверхность твердых тел, как правило, является существенно неравновесным процессом, что связано с характерными для него высокими скоростями нагрева поверхности и высокими градиентами температуры по сравнению с временем релаксации системы. Интенсивность свечения лазерной плазмы сильно изменяется во времени и пространстве. Так, в течение первых десятков наносекунд наблюдается непрерывный фон без каких-либо спектральных компонентов. Затем появляются линии ионов и атомов, за счёт действия электрического поля на атомы и ионы. В последующие несколько сотен наносекунд непрерывный фон спадает, и линии становятся уже [8]. Плотность мощности лазерного излучения влияет на концентрацию электронов, ионов и возбужденных атомов в плазменном факеле, а также на распределение интенсивности излучения плазмы в нем [9–10].

Выбор временных параметров при регистрации спектральных линий определяется несколькими показателями. Во-первых, величина полезного сигнала должна быть максимальна. Во-вторых, уширение линий анализируемых компонентов вещества должно быть максимальным и, по крайней мере, одинаковым в течение всего времени наблюдения спектра. Если это условие не выполняется, спектральные помехи со стороны других компонентов могут снизить точность анализа. В-третьих, отношение полезного сигнала к фону и шуму детектора должны быть максимальными, что обеспечит выполнение первого условия и улучшит воспроизводимость. В-четвертых, в течение времени наблюдения плазмы желательно, чтобы она находилась в состоянии локального термодинамического равновесия (ЛТР). Период существования плазмы в условиях ЛТР зависит от всех экспериментальных условий. При наблюдении плазмы в воздухе обычно этим условиям удовлетворяет время задержек 1–5 мкс [11].

Несмотря на ряд полученных результатов, вопрос влияния времени задержки между сдвоенными лазерными импульсами на эффективность формирования плазменного факела изучен еще недостаточно.

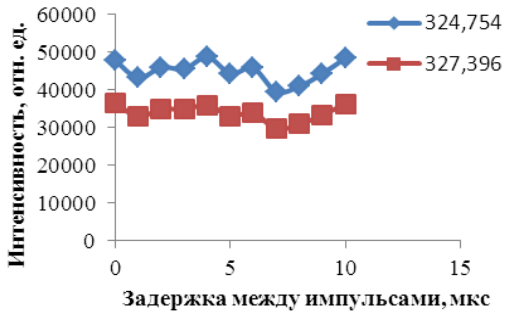


Рисунок 1 – Зависимости интенсивности линий меди от задержки между лазерными импульсами

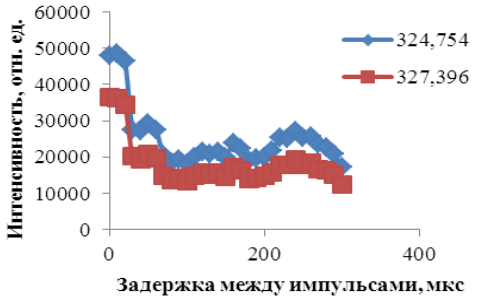


Рисунок 2 – Зависимости интенсивности линии меди от задержки между лазерными импульсами

На рисунках 1 и 2 представлены зависимости интенсивности спектральных линий меди от времени задержки между спаренными лазерными импульсами. Исследовался диапазон задержек 0–10 мкс (рисунок 1) и 0–300 мкс (рисунок 2). Энергия импульсов излучения составляла 30 мДж. В зарегистрированных спектрах были выбраны две наиболее интенсивные линии меди λ_1 = 324,754 нм и λ_2 = 327,396 нм, интенсивность которых и

исследовалась. Анализ рисунка 1 указывает на наличие двух экстремумов, в которых значения интенсивности максимальны – 4 мкс и 10 мкс. При увеличении задержки от 4 до 10 мкс интенсивность спектральных линий падает. При задержках от 0 до 10 мкс в точке 7 мкс наблюдается минимум интенсивности. На рисунке 2 максимум интенсивности наблюдался также при задержках порядка 10 мкс. Дальше интенсивность падала, хотя в точках 50 мкс и 240 мкс наблюдались еще два локальных максимума.

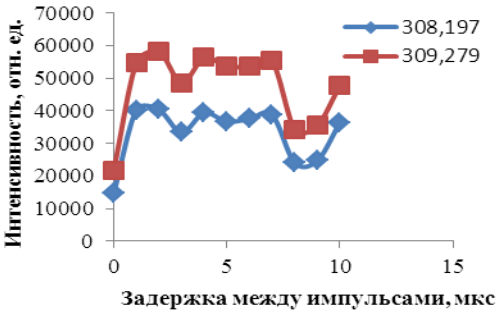


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности линии алюминия от задержки между лазерными импульсами

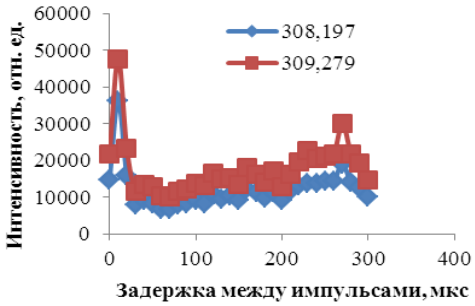


Рисунок 4 – Зависимость интенсивности линии алюминия от задержки между лазерными импульсами

На рисунках 3 и 4 представлены зависимости интенсивности спектральных линий алюминия от времени задержки между спаренными лазерными импульсами. Исследовался диапазон задержек 0–10 мкс (рисунок 3) и 0–300 мкс (рисунок 4). Энергия импульсов излучения составляла 30 мДж. В зарегистрированных спектрах были выбраны две наиболее интенсивные линии алюминия λ_1 = 308,197 нм и λ_2 = 309,279 нм. На рисунке 3 наблюдаются два максимума: при задержке 2 мкс и 7 мкс, минимум наблюдается при задержке в 8 мкс. На рисунке 4, не считая точки 10 (максимум интенсивности), есть ещё один максимум при задержке 270 мкс.

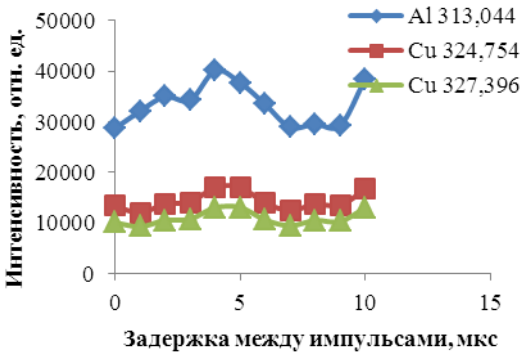


Рисунок 5 – Зависимости интенсивности линий Al и Cu от задержки между лазерными импульсами

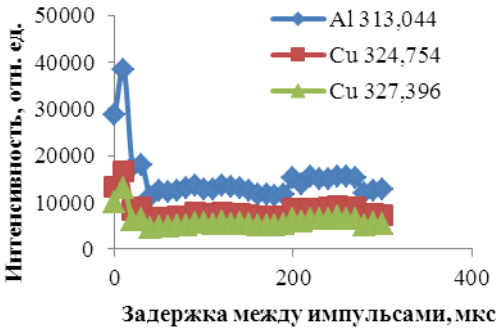


Рисунок 6 – Зависимость интенсивности линий Al и Cu от задержки между лазерными импульсами

На рисунках 5 и 6 представлены результаты исследования бронзы – зависимости интенсивности линий алюминия и меди от задержки между спаренными лазерными импульсами. Исследовался диапазон задержек 0–10 мкс (рисунок 5) и 0–300 мкс (рисунок 6). Энергия импульсов излучения составляла 30 мДж. В зарегистрированных спектрах были выбраны две наиболее интенсивные линии меди λ_1 = 308,197 нм, λ_2 = 309,279 нм и алюминия λ_3 = 313,044. Из рисунка 5 видно, что для алюминия максимум наблюдался при задержках 4 мкс и 10 мкс. Для спектральной линии меди выраженного максимума интенсивности не наблюдалось. При задержках больших 20 мкс интенсивность спектральных линий как алюминия, так и меди уменьшалась в несколько раз (рисунок 6).

Из представленных данных следует, что при воздействии на исследуемый объект сдвоенными лазерными импульсами следует учитывать величину задержки между ними. Так как при определенном значении данного временного интервала происходит рост интенсивности анализируемых спектральных линий, что в свою очередь приводит к увеличению точности измерений количественного состава исследуемых веществ. При проведении измерений важен не только тщательный подбор экспериментальных условий создания лазерной плазмы, но и временные параметры регистрации аналитического эмиссионного анализа. Из приведенных данных видно, что основные процессы, характеризующие поведение плазмы, происходят при малых временных задержках прихода второго импульса относительно первого.

Таким образом, экспериментально показано, что воздействие на образцы спаренных лазерных импульсов с временной задержкой 1–10 мкс приводит к существенному увеличению поступления вещества в плазму, росту аналитического сигнала, появлению свечения ионов металлов. При больших задержках интенсивность плазмообразования уменьшается примерно в 3–4 раза. Полученные результаты будут полезны для оптимизации лазерного спектрального анализа, разработки лазерных источников плазмы и ионов.

Список литературы

1. Скворцов, Л. А. Лазерные методы дистанционного обнаружения химических соединений на поверхности тел / Л. А. Скворцов. – М. : Техносфера, 2015. – 208 с.

2. Guillong M. and Günther D. Effect of particle size distribution on ICP-induced elemental fractionation in laser ablation ICP- MS // J. Anal. Atom. Spectrom. – 2002. – Vol. 17(8). – P. 831–837.

3. Ануфрик, С. С. Спектральный анализ элементного состава древесноволокнистой плиты / С. С. Ануфрик, К. Ф. Зноско, Н. Н. Курьян // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2015. – № 3(199). – С. 83–92.

4. Исследование химического состава глазурей керамических плиток / С. С. Ануфрик [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016 . – Т. 83, № 5. – С. 724–730.

5. Ануфрик, С. С. Модификация химического состава и повышение износостойкости полуфриттовой глазури напольной керамической плитки путем добавления плавленого корунда / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, И. И. Жукова // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 2. – С. 83–94.

6. Hirayama, Y. Heat-affected zone and ablation rate of copper ablated with femtosecond laser / Y. Hirayama, H. Yabe, M. Obara // J. Appl. Phys. – 2001. – Vol. 89(7). – P. 2943–2947.

7. Ануфрик, С. С. Влияние плотности мощности лазерного излучения на интенсивность спектральных линий основных компонентов лазерной плазмы глины / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, М. В. Бельков // Журнал прикладной спектроскопии. – 2018. – Т. 85, № 2. – С. 285–292.

8. 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 Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 101–110.

9. Белаш, В. Ч. Температура и концентрация электронов импульсного разряда в смеси паров ртути с аргоном / В. Ч. Белаш, К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 3. – С. 83–92.

10. Зноско, К. Ф. Распределение интенсивности излучения плазмы импульсно-периодического разряда в смеси паров ртути с аргоном / К. Ф. Зноско, В. Ч. Белаш // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 78–89.

11. Воропай, Е. С. Зависимость интенсивности спектральных линий углерода от структуры железных сплавов при двухимпульсной лазерной абляции / Е. С. Воропай, К. Ф. Ермалицкая // Вестн. БГУ. – 2011. – № 2. – С. 10–13.

A study was made of the dependences of the intensity of the spectral lines of copper and aluminum on the delay between dual laser pulses. The optimal values of the delays between the doubled laser pulses at which the maximum intensity values of the spectral lines are observed are experimentally determined.

Санюкевич Дмитрий Сергеевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, sanykewitsch@gmail.com.

Научный руководитель – *Зноско Казимир Францевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоритической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, znosko@grsu.by.

УДК 543.42:666.752

Д. С. САНЮКЕВИЧ

ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ ОТ РАСФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Выполнено исследование зависимости интенсивности аналитических спектральных линий меди и кремния от положения исследуемого объекта относительно фокуса оптической системы при воздействии на образцы сдвоенными лазерными импульсами YAG:Nd^{3+}-лазера (1,06 мкм). Показано, что положение исследуемого объекта не может отклоняться в ту или иную сторону от фокуса фокусирующей лазерное излучение оптической системы более чем на ±2 мм.

При воздействии на поверхность облучаемого тела лазерного излучения высокой плотности возникает лазерно-эмиссионная плазма, в эмиссионном спектре которой содержится информация об элементном химическом составе плазмы. Исследование спектрального состава излучения плазмы положено в основу

лазерно-эмиссионного спектрального анализа (LIBS) [1–3]. Излучение лазерной плазмы представляет собой комбинацию непрерывного и линейчатого спектра, который используется для определения элементного состава вещества [4–5]. На воспроизводимость результатов экспериментов влияет позиционирование объекта исследования относительно фокуса оптической системы. Исследованию процессов плазмообразования при отрицательной и положительной расфокусировке лазерного излучения посвящен ряд работ [1; 6–8]. В качестве объектов исследования использовались образцы металлов, сплавов и строительных материалов. В работе [9] показано, что учет влияния примесей на поступление основных компонентов сплавов в эрозионный факел позволяет детально изучить механизмы лазерной абляции металлических мишеней сдвоенными лазерными импульсами и снизить погрешность количественного анализа исследуемых объектов.

При практическом использовании лазерно-эмиссионного спектрального анализа элементного состава веществ необходимо обеспечить такие условия воздействия лазерного излучения на поверхность исследуемого объекта, при которых обеспечивалась бы воспроизводимость (стабильность) результатов от импульса к импульсу. На воспроизводимость результатов в лазерно-эмиссионном анализе, прежде всего, влияют такие параметры, как количественный состав испаряемого вещества от импульса к импульсу, флуктуации интенсивности излучения самой плазмы [8]. Также на воспроизводимость результатов экспериментов влияет плотность мощности лазерного излучения, которая подвержена флуктуациям обусловленным нестабильностью энергии источника возбуждения (лазера) и точностью позиционирования объекта исследования относительно фокуса фокусирующей лазерное излучение оптической системы. Плотность мощности возбуждения (лазерного излучения) влияет на концентрацию электронов, ионов и возбужденных атомов в плазменном факеле, а также на распределение интенсивности излучения плазмы в нем [10–11]. В указанных выше работах представлены результаты экспериментов по изучению влияния лазерного излучения на формирование плазмы, но до конца не определены требования к позиционированию объекта исследования (диапазон расстояний от фокуса до исследуемого объекта, при которых получаемые результаты являются стабильными).

Цель настоящей работы – определение оптимальных расстояний от фокуса до исследуемого объекта, обеспечивающих воспроизводимость экспериментальных результатов и минимальную погрешность измерений количественного состава методом лазерно-эмиссионной спектроскопии при двухимпульсном режиме работы спектрометра на примере бронзы.

Снижение плотности мощности излучения проводилось методом расфокусировки лазерного луча путем перемещения исследуемого образца на предметном столике спектрометра, что позволяло увеличивать или уменьшать площадь лазерного пятна на объекте исследования [1]. При приближении объекта исследования к фокусу фокусирующей системы плотность мощности лазерного излучения возрастала. В зависимости от положения объекта исследования относительно точки фокуса, фокусирующей лазерное излучение системы, возможны два вида расфокусировки: положительная и отрицательная (рисунок 1).

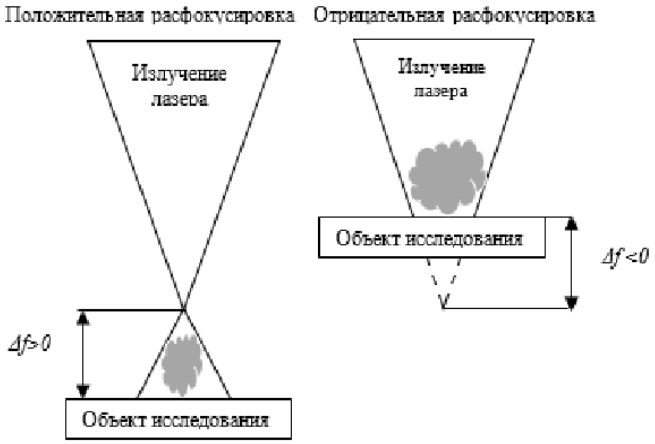


Рисунок 1 – Схемы положительной и отрицательной расфокусировки лазерного излучения относительно поверхности образца

На рисунке 2 представлены зависимости интенсивности линий атомарной меди от расфокусировки (плотности мощности излучения). Ток накачки лазера составлял 24 А. В зарегистрированных спектрах были выбраны две наиболее интенсивные линии меди λ_1 = 324,7 нм и λ_2 = 327,4 нм. Из рисунка видно, что интенсивность падает как при отрицательной, так и при положительной расфокусировке. Однако в диапазоне расфокусировок от –2 мм до +2 мм наблюдается плато. Это говорит о том, что при проведении исследований элементного состава материалов и изделий, точность позиционорования объекта исследования для получения достоверных результатов должна находиться в указаном выше диапазоне.

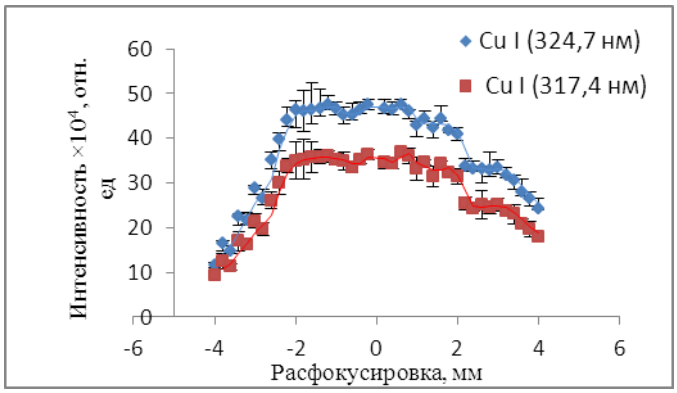


Рисунок 2 – Зависимости интенсивности линий атомарной меди от расфокусировки

На рисунке 3 представлена зависимость интенсивности линии кремния от расфокусировки. Ток накачки составлял 24 А. В зарегистрированных спектрах была выбрана наиболее интенсивная линия кремния λ_1 = 288,1 нм. Из рисунка видно, что интенсивность падает как при отрицательной, так и при положительной расфокусировке.

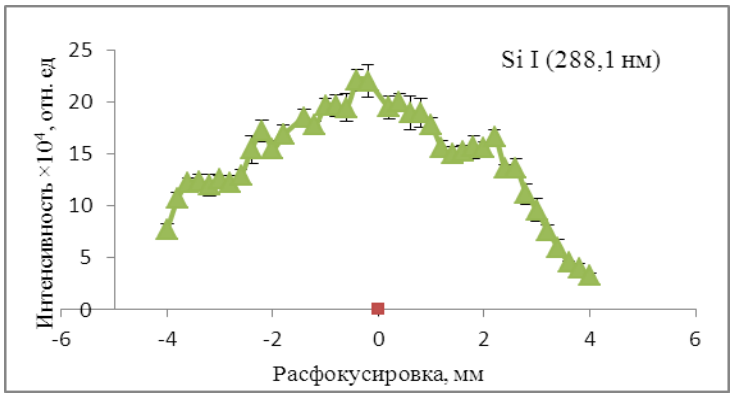


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности линии кремния от расфокусировки

Исследование зависимости интенсивности спектральных линий от параметра расфокусировки Δf (расстояние от точки фокуса до поверхности образца) показало, что динамика интенсивности зависит от модуля величины Δf, но не от ее знака. При отрицательной расфокусировке почти весь объем плазмы расширяется внутри конуса излучения лазера. При положительной – лазерный луч сфокусирован в объеме плазмы, и при небольших значениях межимпульсного интервала (Δt < 4 мкс) плотность испаренного вещества вблизи поверхности велика, поэтому существует вероятность пробоя в парогазовом факеле, возникновение так называемой лазерной искры. Энергия импульса в этом случае расходуется на дополнительное возбуждение атомов в плазме, а снижение степени деструкции поверхности уменьшает толщину испаренного слоя. Однако при этом падает стабильность условий возбуждения атомов и растет погрешность количественного анализа. Существенное увеличение межимпульсного интервала приводит к тому, что значительная часть испаренного первым импульсом вещества будет находиться вне зоны действия второго импульса, т. е. не будет испытывать дополнительного возбуждения. Расфокусировка лазерного луча при проведении анализа может явиться причиной еще одного фактора, влияющего на интенсивность спектральных линий элементов.

Таким образом, определены оптимальные положения объекта исследования относительно фокуса фокусирующей лазерное излучение оптической системы LIBS спектрометра при двухимпульсном режиме его работы, в которых интенсивность спектральных линий сохраняется неизменной, и их значения могут использоваться при проведении количественного анализа. Показано, что положение исследуемого объекта не может отклоняться в ту или иную сторону от фокуса фокусирующей лазерное излучение оптической системы более чем на ±2 мм.

Список литературы

1. Ермалицкая, К. Ф. Двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия стали, легированной титаном и цирконием / К. Ф. Ермалицкая, Н. С. Тарасюк, Е. С. Воропай, В. В. Углов // Вестн. БГУ. – 2010. – № 3. – С. 3–7.

2. Скворцов, Л. А. Лазерные методы дистанционного обнаружения химических соединений на поверхности тел / Л. А. Скворцов. – М. : Техносфера, 2015. – 208 с.

3. Ануфрик, С. С. Спектральный анализ элементного состава древесноволокнистой плиты / С. С. Ануфрик, К. Ф. Зноско, Н. Н. Курьян // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2015. – № 3(199). – С. 83–92.

4. Guillong, M. and Günther, D. Effect of particle size distribution on ICP-induced elemental fractionation in laser ablation ICP- MS // J. Anal. Atom. Spectrom. – 2002. – Vol. 17(8). – P. 831–837.

5. Исследование химического состава глазурей керамических плиток / С. С. Ануфрик [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016 . – Т. 83, № 5. – С. 724–730.

6. Hirayama, Y. Heat-affected zone and ablation rate of copper ablated with femtosecond laser / Y. Hirayama, H. Yabe, M. Obara // J. Appl. Phys. – 2001. – Vol. 89(7). – P. 2943–2947.

7. Ануфрик, С. С. Модификация химического состава и повышение износостойкости полуфриттовой глазури напольной керамической плитки путем добавления плавленого корунда / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, И. И. Жукова // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 2. – С. 83–94.

8. Ануфрик, С. С. Влияние плотности мощности лазерного излучения на интенсивность спектральных линий основных компонентов лазерной плазмы глины / С. С. Ануфрик, Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, М. В. Бельков // Журнал прикладной спектроскопии. – 2018. – Т. 85, № 2. – С. 285–292.

9. 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 Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 101–110.

10. Белаш, В. Ч. Температура и концентрация электронов импульсного разряда в смеси паров ртути с аргоном / В. Ч. Белаш, К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2018. – Т. 8, № 3. – С. 83–92.

11. Зноско, К. Ф. Распределение интенсивности излучения плазмы импульсно-периодического разряда в смеси паров ртути с аргоном / К. Ф. Зноско, В. Ч. Белаш // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 78–89.

The study of the dependence of the intensity of the analyzed spectral lines of copper and silicon on the position of the object under study relative to the focus in the generation of dual laser pulses YAG:Nd3+-laser (1,06 μm).

Санюкевич Дмитрий Сергеевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, sanykewitsch@gmail.com.

Научный руководитель – *Зноско Казимир Францевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоритической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, znosko@grsu.by.

УДК 543:621.35

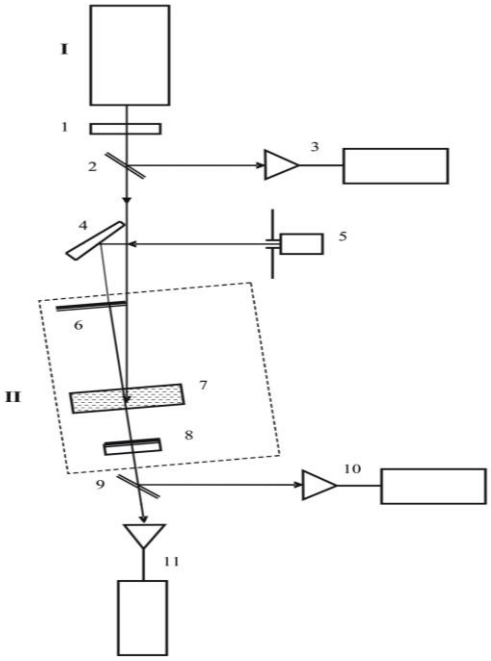
А. В. СЕРЕДЕНКО

ФОТОСТАБИЛЬНОСТЬ И РЕСУРС РАБОТЫ КОМПЛЕКСОВ ВКЛЮЧЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ КРАСИТЕЛЕЙ С β-ЦИКЛОДЕКСТРИНОМ И НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА

При когерентной наносекундной накачке исследованы генерационные характеристики комплексов включения красителей различных классов с β-циклодекстрином с добавкой наночастиц серебра в этанольных и водно-этанольных растворах.

В настоящее время лазеры на растворах органических красителей широко используются в научных исследованиях в области спектроскопии, нелинейной оптики, фотохимии, биологии и медицины. Реализация широких возможностей практического применения лазеров на красителях связана с дальнейшим улучшением их параметров, определяемых, в первую очередь, характеристиками растворов красителей. Молекулы циклодекстринов привлекают возможностью встраивания в их внутреннюю полость красителей и тем самым, изменять фотофизические и фотохимические свойства большого числа органических соединений. Вместе с тем, возможности циклодекстринов, а именно их способность модифицировать сольватную оболочку красителя и их фотофизические и фотохимические свойства, изучены недостаточно [1–5]. Циклодекстрины, формируя комплексы включения с органическими молекулами, могут менять их фундаментальные оптические свойства. Комплексы включения могут непосредственно влиять на излучательные и безызлучательные процессы путем воздействия на молекулярное окружение, а также посредством добавки наночастиц. Создание высокоэффективных активных сред перестраиваемых лазеров на основе комплексов включения с циклодекстринами и их модификация наночастицами представляет большой интерес, вследствие создания новых лазерных сред с улучшенными характеристиками [1–5].

Для исследования эффективности генерации красителей в наносекундном диапазоне длительностей, использовалась оптическая схема лазера на красителях с трехступенчатым возбуждением и система измерения энергетических и спектральных характеристик генерируемого излучения, которая показана на рисунке 1.



I – лазер накачки 2-й ступени с ЭО модуляцией добротности на АИГ:Nd3+; II – лазер на красителях 2-й ступени: 1 – светофильтр СЗС-23; 2, 9 – поворотные стеклянные пластинки; 3, 10, 11 – измерители ИМО-2Н; 4 – поворотная клиновая подложка; 5 – юстировочный полупроводниковый лазер с диафрагмой; 6 – «глухое» зеркало резонатора лазера на красителях 2-й ступени; 7 – кювета с раствором красителя лазера 2-й ступени, 8 – выходное зеркало лазера на красителях 2-й ступени

Рисунок 1 – Схема двухступенчатого лазера-преобразователя на красителях наносекундной длительности

В качестве источника наносекундной когерентной накачки использовалась вторая гармоника твердотельного импульсного гранатового (АИГ:Nd^{3+}) лазера белорусской фирмы СОЛАР-ТИИ (модель LS-2147). Максимальная энергия генерации на λ = 532 нм при накачке 40 Дж составляла 140 мДж при длительности импульса 10–14 нс. Лазер LS-2147 (1-я ступень) использовался как источник накачки лазера на красителях 2-й ступени, в котором находились растворы исследуемых красителей.

Резонатор второй ступени лазера-преобразователя на красителях был образован плоским «глухим» зеркалом (6), а в качестве выходного использовалась стеклянная стопа с R ≈ 60 % (8), которая в данных условиях являлась оптимальной. Возбуждение генерации производилось по почти продольной схеме под углом 5°–7° к оси резонатора в кварцевую кювету (7) с толщиной активного слоя 5 мм.

Так как в экспериментах использовалось излучение 2-й гармоники АИГ:Nd^{3+} лазера, то на выходе гранатового лазера устанавливался светофильтр СЗС-23 (1), для того чтобы отделить излучение на длине волны λ = 532 нм, от основной длины волны на λ = 1064 нм.

В качестве активных сред во 2-й ступени (рисунок 1), с целью перекрытия спектрального диапазона (в пределах основной полосы поглощения исследуемых красителей), в зависимости от решаемой задачи использовались этанольные растворы эффективных лазерных красителей при концентрации $1{,}2\cdot10^{-4}$ моль/л: родамин 6Ж, феналемин 160, родамин С, DCM, оксазин 17, оксазин 9.

Концентрация исследуемых красителей выбирается так, чтобы обеспечить на длине волны накачки коэффициент поглощения К ~ 15–25 $см^{-1}$. Такое поглощение в типичных красителях соответствует концентрации $5\cdot10^{16}$ $см^{-3}$ (10^{-4} моль/л) [6]. Излучение накачки фокусировалось на кювету в пятно размером ~4 мм, а требуемый уровень интенсивности возбуждения задавался с помощью нейтральных светофильтров. Энергия генерации во всех ступенях лазера-преобразователя измерялась при помощи ИМО-2Н.

Экспериментальные результаты показаны в таблице 1. Накачка растворов красителей осуществлялась 2-й гармоникой гранатового лазера с энергией 140 Мдж. Исследовалась энергия генерации и КПД преобразования этанольных растворов, водно-этанольных растворов, водно-этанольных растворов с добавкой наночастиц серебра, водно-этанольных растворов с β-циклодекстрином и водно-этанольных растворов с β-циклодекстрином с добавкой наночастиц серебра.

Таблица 1 – Генерационные характеристики комплексов включения красителей различных классов с циклодекстринами с добавкой наночастиц серебра в этанольных и водно-этанольных растворах

Название соединения	Этанольный раствор		Водно-этанольный раствор (1:1)		Водно-этанольный раствор (1:1) с добавкой наночастиц серебра (1:3)		Водно-этанольный раствор (1:1) с β-циклодекстрином		Водно-этанольный раствор (1:1) с β-циклодекстрином и добавкой наночастиц серебра (1:3)	
	$E_г$, мДж	$\eta_г$, %	$E_г$, мДж	$\eta_г$, %	$E_г$, мДж	$\eta_г$, %	$E_г$, мДж	$\eta_г$, %	$E_г$, мДж	$\eta_г$, %
Родамин 6Ж	100	71,4	83	59,3	95	67,9	104	74,3	55	39,3
Феналемин 160	70	50	100	71,4	85	60,7	85	60,7	54	38,6
Родамин С	97	69,3	94	67,1	82	58,6	45	32,1	15	10,7
DCM	49	35	53	37,9	44	31,4	49	35	13	9,3
Оксазин 17	20	14,3	23	16,4	21	15	порог	–	–	–
Оксазин 9	35	25	17	12,1	14	10	19	13,6	–	–

Данные таблицы говорят, что в чисто этанольном растворе наибольшая эффективность преобразования в 71,4 % получена на родамине 6Ж. На втором месте по эффективности идет родамин С (69,3 %), на третьем феналемин 160 (50 %). Хуже всего с КПД 14,3 % генерировал оксазин 17.

В водно-этанольном растворе максимальная эффективность преобразования в 71,4 % получена у феналемина 160, которая в сравнении с этанольным раствором увеличилась почти на 43 %. Увеличили эффективность генерации на 8 % DCM, и на 15 % – оксазин 17. У остальных соединений эффективность генерации в водно-этанольном растворе снизилась.

В водно-этанольном растворе с добавкой наночастиц серебра максимальную эффективность генерации продемонстрировал родамин 6Ж (67,9 %). Однако это хуже чем в этанольном растворе. Феналемин 160 по сравнению с этанольным раствором эффективность генерации увеличил на 21,4 %. Остальные соединения КПД генерации не увеличили.

В водно-этанольном растворе с β-циклодекстрином получен абсолютный рекорд в эффективности преобразования в 74,3 % для родамина 6Ж. Феналемин 160 по сравнению с водно-этанольным раствором эффективность генерации не увеличил. Остальные соединения существенно показатели не улучшили.

В водно-этанольных растворах с β-циклодекстрином и добавкой наночастиц серебра ни одно из соединений эффективности генерации не улучшило.

Была исследована эффективность генерации комплексов включения красителей с циклодекстрином в водно-этанольных растворах, предварительно облученных в течение 1 часа УФ-излучением лампы. Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Генерационные характеристики облучённых и необлучённых водно-этанольных растворов с β-циклодекстрином

Название соединения	Этанол + вода + β-циклодекстрин (необлученный)		Этанол + вода + β-циклодекстрин (облученный)	
	$E_г$, мДж	$\eta_г$, %	$E_г$, мДж	$\eta_г$, %
Родамин 6Ж	103	73,6	83	59,3
Феналемин 160	85	60,7	100	71,4
Родамин С	45	32,1	96	68,6
DCM	53	37,9	53	37,9
Оксазин 17	10	7,1	23	16,4
Оксазин 9	24	17,1	17	12,1

Из данных таблицы 2 видно, что комплексы включения красителей с циклодекстринами существенно увеличивают фотостойкость некоторых соединений. Фотостойкость феналемина 160 возросла на 17,6 %, родамина С на 114 %, оксазина 17 на 131 %.

Список литературы

1. Русинов, А. П. Влияние наночастиц серебра на оптические спектры поглощения молекул органических красителей в полимерных растворах и пленках / А. П. Русинов, М. Г. Кучеренко // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. – 2015. – № 15. – С. 195–202.
2. Зейниденов, М. Г. Влияние наночастиц серебра на электронные переходы в молекулах красителей и генерационные характеристики жидкостных лазеров на их основе / А. К. Зейниденов, Н. Х. Ибраев, М. Г. Кучеренко // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. – 2014. – № 9. – С. 96–102.
3. Стахейко, П. Н. Комплексы включения красителей классов с γ-циклодекстрином / П. Н. Стахейко, Г. Г. Сазонко // Физика конденсированного состояния : материалы и XXII междунар. науч.-практ. конф. аспир., магистр. и студ. (Гродно, 17–18 апр. 2014 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол. : В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2014. – С. 145–147.
4. Комплексы включения «β-циклодекстрин – бензолкарбоновая кислота»: стехиометрия, термодинамика комплексообразования, устойчивость, термостабильность / Л. А. Белякова [и др.] // Поверхность. – 2009. – Вып. 1 (16). – С. 1–12.
5. Никитин, Н. А. Циклодекстрины и их комплексы включения (обзор литературы) / Н. А. Никитин // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. – 2015. – № 6. – С. 3–11.
6. Рубинов, А. Н. Оптические квантовые генераторы на красителях и их применение / А. Н. Рубинов, В. И. Томин // Радиотехника. Итоги науки и техники. – М. : ВИНИТИ, 1976. – 175 с.

In the case of coherent nanosecond pumping, the generation characteristics of inclusion complexes of dyes of various classes with α-cyclodextrin with the addition of silver nanoparticles in ethanol and water-ethanol solutions were investigated.

Середенко Андрей Викторович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, andryxa97@mail.ru.

Научный руководитель – *Тарковский Викентий Викентьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, tarkovsky@grsu.by.

УДК 537.528

Н. А. СТАСЕВИЧ

ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОБОГАЩЕНИЯ ДИАТОМИТА

Показано, что при помощи электрогидравлического эффекта Юткина возможно эффективное отделение диатомита от глины и осуществление его обогащения.

Диатомит в настоящее время является ценным минеральным сырьем. Он представлет собой осадочную горную породу и состоит в основном из кремнеземных панцирей диатомитовых водорослей (рисунок 1) [1]. Диатомит находит широкое применение в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства: как абсорбент, фильтр нефтехимической и пищевой промышленности, в качестве рекультиванта и минерального удобрения в сельском хозяйстве, пенодиатомитовая крошка для производства твердого бетона, строительных смесей различного назначения, наполнителя в чистящих и абсорбирующих средствах, в качестве носителя катализаторов, как инсектицид, вызывающий гибель вредителей, теплоизоляционного кирпича; в качестве строительных тепло- и звукоизоляционных материалов, в производстве антибиотиков, бумаги, красок [1; 2; 3].

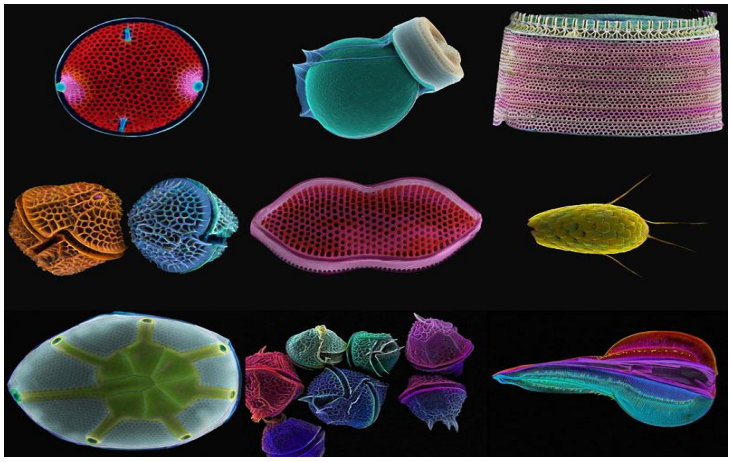


Рисунок 1 – Диатомовые водоросли (микрофотографии Пола Харгривза и Фэй Дарлинг [4])

Одной из трудностей использования диатомита является то, что в природе он находится в смеси с глиной, от которой его необходимо отделить. Электрогидравлический способ способен решить первоначальную задачу отделения диатомита от глины. Он основан на так называемом эффекте Юткина [5]. Подобная технология используется, в частности, для коллоидного обогащения руд и отделения золота из глины [6].

Электрогидравлический эффект основан на использовании энергии плазмы, возникающей при коротком электрическом разряде в закрытом объеме, заполненном водой. В воду вводятся специальные электроды и производится мощный электрический разряд. Разряд приводит к образованию плазмы. Образуется паро-газовая полость, которая представляет собой кавитационный пузырь, расширяющийся со скоростью 1410 м/с. Этот пузырь растет до максимального размера и через несколько сотен микросекунд схлопывается. Расширение и схлопывание кавитационного пузыря наводит мощные ударные волны. Возникающее на этой стадии давление, по оценкам, может достигать 450 тысяч атмосфер. Ударные волны, наводимые во время расширения плазмы и схлопывания пузыря, являются причиной механических напряжений, испытываемых объектом воздействия. Электрогидравлическое воздействие и приводит к разделению минеральных веществ.

В настоящее время нами определены режимы работы модельного устройства, предназначенного для электрогидравлического разделения минеральных веществ на составляющие компоненты. Установлено, что режим работы электрогидравлического устройства зависит от физико-химических свойств объекта, подвергающегося дроблению.

В случае хрупких материалов целесообразнее использовать мягкий режим работы: напряжение меньше 20 кВ, емкость больше 1 мкФ. Мягкий режим характеризуется меньшими давлениями при значительном увеличении доли энергии, уходящей с волной запаздывающего потока (расширением кавитационной полости), и уменьшением доли энергии, обусловленной фронтом ударной волны. Характерным является преобладание мягких акустических составляющих звукового излучения. Световое излучение разряда характеризуется увеличением инфракрасных составляющих его спектра. Кавитирующее кольцо при этом очень интенсивно и захватывает большие объемы жидкости, соизмеримые со всем объемом рабочей камеры [5; 6].

В случае твердых материалов целесообразнее использовать средний режим работы: напряжение больше 20 кВ, емкость меньше 1 мкФ. На средних режимах примерно до 30 % выделившейся энергии уносится ударной волной и акустическим излучением, а остальная часть энергии уходит при расширении и захлопывании полости с волной запаздывающего потока [5; 6].

В случае пластичных материалов целесообразнее использовать жесткий режим работы: напряжение больше 50кВ, емкость меньше 0,1 мкф. Жесткий режим характеризуется большими давлениями на фронте ударной волны и большей долей энергии, уходящей вместе с нею. С увеличением жесткости режима будут возрастать давление на фронте ударной волны и доля энергии, приходящейся на жесткое акустическое излучение. Световое излучение разряда характеризуется преобладанием жесткой ультрафиолетовой составляющей спектр излучения. Электрогидравлический удар при этом оказывается относительно коротким (бризантным) [5; 6].

Нами также определены варианты модельных устройств, предназначенных для электрогидравлического разделения минеральных веществ на составляющие компоненты (обогащение диатомита). Установлено, что экспериментальную проверку данного способа можно произвести с помощью пяти модельных электрогидравлических установок, параметры которых приведены в таблице 1.

С использованием модельного устройства, предназначенного для электрогидравлического разделения минеральных веществ на составляющие компоненты, проведен пробный эксперимент по обогащению диатомита. Эксперимент показал, что электрогидравлический способ способен решить первоначальную задачу отделения диатомита от глины. Результаты эксперимента представлены на рисунках 2–4.

Таблица 1 – Варианты модельных устройств, предназначенных для электрогидравлического разделения минеральных веществ на составляющие компоненты

Параметры	Тип излучателя				
	ЭГД-1	ЭГД-2	ЭГД-3	ЭГД-4	ЭГД-5
Накопитель (количество и тип конденсаторов)	2 конденсатора к-75-48 (0,22 мкФ, 25кВ)	4 конденсатора к75-48 (0,22 мкФ, 25кВ)	2 конденсатора ИК-25-12У4 (12 мкФ, 25 кВ)	2 конденсатора ИК-40-5У4 (5 мкФ, 40 кВ)	11 конденсаторов К75-48 (0,22 мкФ, 25 кВ)
Длительность импульса разряда, мкс	1,5	1,5	20,0	15,0	1,7
Максимальная энергия разряда, Дж	138	275	7500	8000	756

Технология разделения заключается в следующем. Диатомит в смеси с глиной загружается в металлическую ванну с водой. Стенки ванны являются отрицательным электродом. В воду погружаются положительные электроды. Производятся электрические разряды в воде (здесь необходимо экспериментальным путем подобрать оптимальный режим воздействия на диатомит). Электрогидравлическая встряска смеси диатомита и глины приведет к их разделению. Вследствие того, что плотность диатомита лежит в пределах 380–1000 кг/м^3, а глины 1400–1700 кг/м^3, то глина, как более тяжелый материал, осядет в нижнем слое, а диатомит сконцентрируется сверху (рисунок 2).

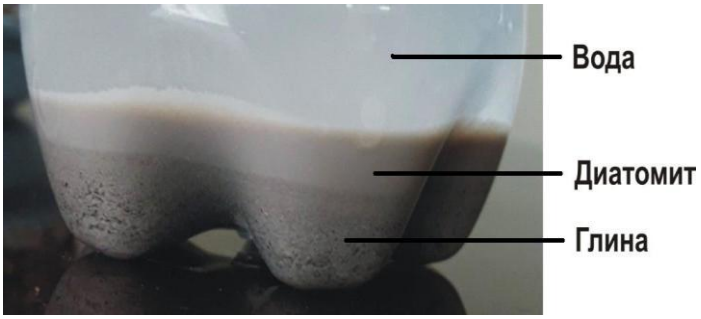


Рисунок 2 – Суспензия, разделённая после электрогидравлического воздействия на глину (нижний слой) и диатомит (верхний слой)

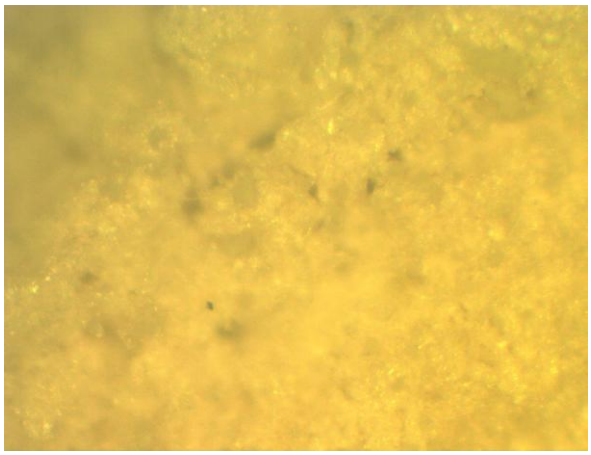


Рисунок 3 – Изображение неразделённых глины и диатомита при увеличении ×5000

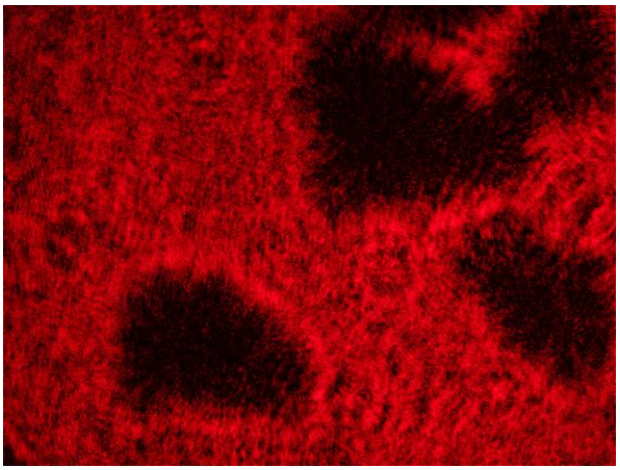


Рисунок 4 – Изображение отделённых от глины частиц диатомита при увеличении ×5000

Таким образом, предложенный метод применения электрогидравлического эффекта для обогащения диатомита осуществляется без образования взрывной волны и выделения вредных веществ и газов. Этот метод совершенно безопасен для работающих вблизи людей и установленного оборудования, абсолютно экологичен.

Список литературы

1. Садаков, И. А. Применение диатомита в областях промышленности / И. А. Садаков // Молодежь и наука. – 2015. – № 2. – С. 1−5.

2. «Диатомик» − новый теплоизоляционный материал для дорожного строительства в условиях криолитозоны / Е. А. Коротков [и др.] // Вестник СИБАДИ. − 2015. − Т. 41, вып. 1. − С. 55−61.

3. Матыченков, В. В. Влияние кремниевых удобрений на растения и почву / В. В. Матыченков, Е. А. Бочарникова, Я. М. Аммосова // Агрохимия. − 2002. − № 2. − С. 86–93.

4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://bigpicture.ru/?p=143262.

5. Юткин, Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. – Л. : Машиностроение, 1986. − 253 с.

6. Юткин, Л. А. ЭГЭ и его применение в горном деле / Л. А. Юткин // Строительные материалы, изделия и конструкции. − 1955. − № 9. − С. 13–15.

It is shown that using the Yutkin electrohydraulic effect, it is possible to effectively separate the diatomite from clay and to enrich it.

Стасевич Никита Александрович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, nikita.stasevich@mail.ru.

Научный руководитель – *Тарковский Викентий Викентьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, tarkovsky@grsu.by.

УДК 548.736.5,548.736.398

Н. А. СТЕПАНЮК

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ СПЛАВА FeCuCoMnNi

Исследование посвящено изучению высокоэнтропийных сплавов. Сформированный методом горения в растворах опытный образец сплава FeCuCoMnNi в виде порошка исследован с помощью рентгеноструктурного анализа. На основе полученных результатов выдвинуто предположение о химическом и фазовом составе исследованного образца.

Термин «высокоэнтропийный сплав» (ВЭС) был введен профессором Йехом [1]. По определению, высокоэнтропийным является сплав, содержащий не менее 5 элементов в составе, близком к эквимолярному, а именно, атомное содержание любого из элементов ВЭС лежит в пределах от 5 % до 35 %. При этом в работе [2] указано, что ВЭС не может быть представлен как однофазный твердый раствор нескольких элементов в решетке одного элемента, как это происходит в случае с более распространенными сплавами из двух или трех элементов. ВЭС представляют собой новое поколение материалов, обладающих уникальными наборами свойств и выдающихся характеристик.

Характеристики твердых растворов, такие как прочность, тугоплавкость, жаростойкость превосходят характеристики интерметаллидов с аналогичным химическим составом, потому важную роль играет именно получение твердых растворов и условия их образования. ВЭС имеют высокую энтропию смешения, из-за чего значительно минимизируется свободная энергия, а в состоянии твердого раствора это напрямую влияет на улучшение характеристик материала.

Величина δ, которая показывает степень разброса величин атомных радиусов, согласно уточненному критерию образования ВЭС в виде твердого раствора Юм-Розери, не должна превышать 6 % [3] или 5 % [1]. Также немалую роль играет и сходство кристаллических решеток. При попытке создать однофазный раствор замещения из элементов, склонных образовывать, к примеру, решетки типа ГЦК и ГПУ, будут возникать механические структурные напряжения, дестабилизирующие систему и понижающие шансы на создание твердого раствора замещения.

Концентрация валентных электронов и разность электроотрицательностей влияют на характер решетки раствора. В работе [3] указывается, что подавляющая часть ВЭС имеют кубическую структуру решетки, и

разность электроотрицательностей отвечает за то, какая именно разновидность кубической решетки образуется сплавом – ОЦК, ГЦК или же обе, существующие одновременно.

Образцы сплава FeCuCoMnNi синтезированы сотрудниками ИТМО им. Лыкова НАН Беларуси методом горения в растворах (solution combustion synthesis, SCS), с использованием нитратов соответствующих металлов в качестве окислительной составляющей, и гексаметилентетрамина в качестве восстановителя. Для синтеза готовились водные растворы нитратов, при соотношении, обеспечивающем эквимолярное содержание атомов металлов в конечном ВЭС. Приготовленные растворы высушивались при температуре 95 °С до состояния очень вязкого геля, который сжигали в муфельной печи при температуре 500 °С. Далее образцы были исследованы с помощью метода рентгеноструктурного анализа на аппарате Rigaku Ultima IV.

Элементный состав подбирался так, чтобы обеспечить минимальную разность атомных радиусов, потому пять металлов, составляющих данный сплав, находятся рядом друг с другом в одном периоде таблицы Менделеева. Проведенный расчет для модели FeCuCoMnNi с содержанием каждого элемента в 20 % показывает малую характеристику разброса δ, а именно δ = 1,12 %, что полностью позволяет образование твердого раствора ВЭС согласно уточненным критериям Юм-Розери [3] и [1]. В работе [1] также приводится информация касательно системы FeCuCoMnNi, и, согласно ей, данный сплав является ВЭС с концентрацией валентных электронов КВЭ = 9, образуя решетку типа ГЦК.

На рис 1 изображена рентгенограмма синтезированного образца сплава. Анализ дифракционных пиков показывает, что в исследуемом порошке присутствуют две фазы с ГЦК-решеткой.

Сопоставление эталонных спектров с экспериментально полученной рентгенограммой привело к предположению, что фаза 1 является фазой модифицированного нитрида железа γ-Fe_4N. Дифракционные пики, принадлежащие фазе 1, смещены в область больших углов относительно пиков самого γ-Fe_4N. Подобная картина наиболее вероятна для твердого раствора элементов с меньшими, чем у железа, атомными радиусами (Ni, Co, Cu) в кристаллической решетке γ-Fe_4N. Вдобавок, такие элементы, как кобальт Co и медь Cu способны образовывать сложные нитриды с железом Fe и никелем Ni.

На основании написанного выше можно предположить, что фаза 1 является фазой твердого раствора типа γ-$(Fe, Ni, Co, Cu)_4N$. Наличие в составе порошка азота (как следствие, нитридов) хорошо объясняется использованием нитратов соответствующих металлов при изготовлении образца.

Фаза 2 по положению своих отражений идентична фазе ГЦК-решетки меди, смещенной в область больших углов, что может говорить о наличии твердого раствора (на основе решетки меди) преимущественно элементов с меньшими атомными радиусами. Отклонения положений экспериментальных отражений фазы 2 от положений аналогичных отражений меди по величине меньше, чем для фазы 1 относительно рассмотренных выше нитридов, что хорошо объясняется более высоким содержанием меди и марганца в составе фазы 2.

Таким образом, высока вероятность того, что фаза 2 является фазой твердого раствора ВЭС (Cu, Ni, Co, Fe, Mn) с ГЦК-решеткой.

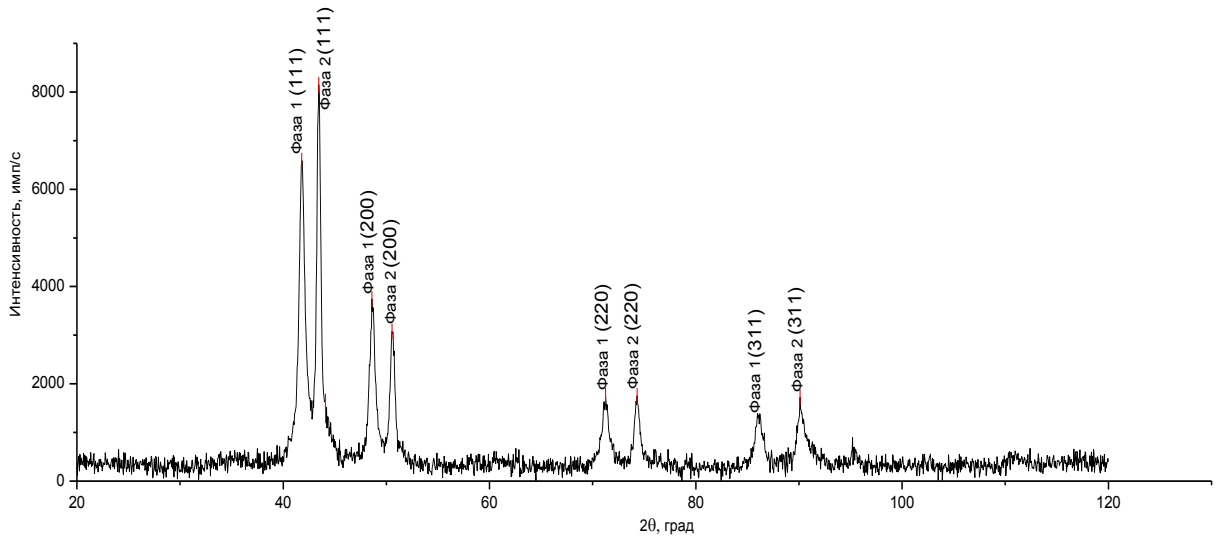


Рисунок 1 – Рентгенограмма синтезированного образца сплава FeCuCoMnNi

Оценка размеров зерен по формуле Шеррера показывает, что кристаллические зерна обеих фаз имеют размеры в несколько десятков нанометров, то есть рассматриваемый образец относится к нанокристаллическим структурам.

Иными словами, рентгеноструктурный анализ синтезированного порошка показывает, что образец содержит две основные нанокристаллические фазы, и одна из них может быть отнесена к классу ВЭС, а вторая является нитридной. Можно предположить, что при использовании технологии горения в растворах для создания порошка высокоэнтропийного сплава велика вероятность образования кристаллических фаз не только металлического ВЭС, но еще и фаз с включением неметаллов в состав решетки. Тем не менее, данная технология позволяет успешно образовывать твердые растворы из заданных элементов.

Для более подробного изучения таких систем следует использовать также другие методы экспериментального исследования, например, рентгеноспектральный микроанализ, растровую и просвечивающую электронную микроскопию.

Список литературы

1. Entropy Alloy: Challenges and Prospects / Y. F. Ye, Q. Wang, J. Lu, C. T. Liu, Y. YangHigh // Progress in Materials Science, Materials Today. – December 2015. – P. 1–14.

2. Microstructure and Properties of High-Entropy Alloys / Y. Zhang, T. T. Zuo, Z. Tang, M. C. Gao, K. A. Dahmen, P. K. Liaw, Z. P. Lu // Progress in materials Science. – 2014. – P. 1–93.

3. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и нитридных покрытий на их основе / А. Д. Погребняк, А. А. Багдасарян, И. В. Якущенко, В. М. Береснев // Успехи химии. – 2014. – № 83. – С. 1027–1061.

This paper does with studying of high-entropy alloys. The prototype of FeCuCoMnNi alloy, created with solution combustion synthesis, has been produced in the form of powder and has been examined with the help of X-ray diffraction (XRD). The results obtained have been used to make assumptions on chemical and phase composition of the prototype.

Степанюк Никита Александрович, студент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, nik.stepanjuk.99@mail.ru.

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

Консультант – *Хорт Александр Александрович*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь, khortalexander@gmail.com.

УДК 539.261/538.975

Я. Н. СУГАК

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОДЕФОРМАЦИЙ И РАЗМЕРОВ ЗЁРЕН В МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЁНКАХ

Исследование посвящено анализу использования метода Вильямсона – Холла для расчетов микронапряжений и размеров ОКР для многоплёночной системы ZrN/Si_3N_4. Сравнение производилось с помощью формулы Шеррера, где не учитываются микродеформации в зёрнах.

Воздействие энергетических частиц и излучения на твердые тела приводит к изменению их структурно-фазового состояния и физических свойств. Это приводит к ухудшению свойств материала и, в конечном итоге, его разрушению. Нанесение защитных покрытий (тонких плёнок) призвано защитить материал от радиационного действия излучения, тем самым продлив срок эксплуатации оборудования.

Многослойные покрытия на основе кристаллических и аморфных слоев перспективны для исследования в качестве радиационно-стойких материалов из-за того, что межфазные границы могут влиять на удаление радиационно-индуцированных дефектов, действуя как устойчивые стоки дефектов.

Одной из важнейших характеристик тонкопленочных пленок является их микроструктура. Метод рентгеноструктурного анализ позволяет достаточно легко исследовать микроструктурные (размер ОКР и микродеформации) характеристики пленок.

Простейшим способом оценки размеров зёрен является формула Шеррера [1]:

$$D = \frac{\lambda}{\beta \cos \Theta},$$

где D – средний размер ОКР (зерен), λ – длина волны рентгеновского излучения, β – интегральная ширина пика, Θ – брэгговский угол.

Однако расчет размеров ОКР (зерен) по формуле Шеррера не учитывает микродеформации в зёрнах, которые в тонких пленках, облученных ионами, могут оказаться существенными.

Для одновременного учёта этих двух факторов используется метод Вильямсона – Холла [2]. В рамках этого метода предполагается, что интегральная ширина пика β определяется как сумма уширения, связанного с размером зерен β_d, и уширения, связанного с микродеформациями в зёрнах β_s: $\beta = \beta_d + \beta_s$ в случае аппроксимации функцией Лоренца и $\beta^2 = \beta_d^2 + \beta_s^2$ в случае аппроксимации функцией Гаусса, где $\beta_d = \frac{\lambda}{D\cos\theta}$, $\beta_s = 4\varepsilon\tan\theta$ и $\varepsilon = \frac{\Delta d}{d}$ – величина микродеформации. Записав сумму уширений β_d и β в виде $\beta\cos\theta = 4\varepsilon\sin\theta + \frac{\lambda}{D}$ или $(\beta\cos\theta)^2 = (4\varepsilon\sin\theta)^2 + (\frac{\lambda}{D})^2$ и проведя линейную аппроксимацию, можно определить неизвестные D и ε.

Методом реактивного магнетронного распыления были сформированы многослойные пленки ZrN/Si_3N_4 с различной толщиной слоев ZrN и Si_3N_4 (таблица 1).

Таблица 1 – Размеры ОКР и значений микродеформаций исходных и облучённых ионами He плёнок ZrN/Si_3N4

Пленки ZrN/Si_3N_4	Толщина слоя, нм		Размер зерен, нм		Микродеформация, %
	ZrN	Si_3N_4	Метод Вильямсона – Холла	Формула Шеррера	Метод Вильямсона – Холла
Исходные	5	5	2,6	2,1	1,0
	5	10	2,8	2,4	0,7
	10	5	4,0	3,1	0,7
Облученные ионами He (30 кэВ, $5\cdot10^{16}$ см$^{-2}$)	5	5	2,3	2,7	0,5
	5	10	2,7	2,8	0,1
	10	5	3,9	4,2	0,1

Облучение пленок проводилось ионами He^+ (с энергией 30 кэВ). Интегральная доза составила $5\cdot10^{16}$ см$^{-2}$. Дифрактометрические исследования проводились на дифрактометре ULTIMA IV в параллельной геометрии с использованием медного излучения (0,15418 нм).

Исходные пленки представляют собой латерально непрерывные чередующиеся слои нанокристаллического ZrN и аморфного SiN_x с плоскими и резкими границами (рисунок 1).

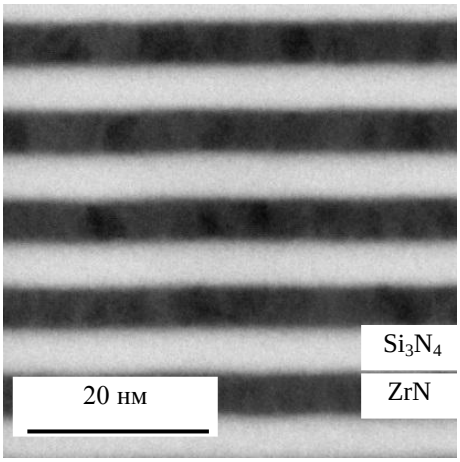


Рисунок 1 – ПЭМ изображение многослойной плёнки ZrN/Si_3N_4 с одинаковой толщиной слоёв ZrN и Si_3N_4, равной 5 нм

Расчет микроструктурных характеристик методом Вильямсона – Холла проводился для дифракционных пиков нитрида циркония (111), (200), (220) и (311). Расчет по формуле Шеррера проводился для дифракционного пика ZrN (200).

Предварительные расчеты с использованием аппроксимирующих функций Гаусса и Лоренца показали, что для многослойных пленок ZrN/Si_3N_4 наиболее подходящей аппроксимирующей функцией является функция Лоренца.

В таблице 1 представлены результаты расчетов размеров зерен и микродеформаций методом Вильямсона – Холла и по формуле Шеррера для исходной и облученной системы ZrN/Si_3N_4.

Анализ полученных данных (таблица 1) показал, что с увеличением толщины кристаллического слоя ZrN увеличивается размер зерен и уровень микродеформаций (метод Вильямсона – Холла). Толщина аморфного слоя не оказывает влияния на размер зерен, но приводит к уменьшению уровня деформации (таблица 1). Облучение ионами He не приводит к росту размеров ОКР в кристаллических слоях, но изменяет уровень микродеформациий, что связано с релаксация микронапряжений в слоях ZrN в результате образования гелиевых пузырей в аморфных слоях Si_3N_4. Сравнение полученных результатов по размеру зерен с данными просвечивающей электронной микроскопии (рисунок 1) показали хорошее совпадение результатов для метода Вильямсона – Холла.

Как видно из таблицы 1 результаты расчетов размеров зерен по формуле Шеррера значительно отличаются от результатов полученных методом Вильямсона – Холла.

При этом стоит отметить, что оба метода являются скорее оценочными, так как обладают довольно большими погрешностями. В частности, при использовании метода Вильямсона – Холла желательно использовать для построения графиков пики одной плоскости отражения. Расчет с использованием таких пиков будет давать очень хорошие значения, однако, на практике часто приходится использовать интегральные ширины всех отражений (вне зависимости от индексов), т. к. линии дальних порядков от одной и той же системы плоскостей либо отсутствуют, либо сильно размыты и плохо измеримы [2].

Список литературы

1. Чижов, П. Приборы и методы рентгеновской и электронной дифракции / П. Чижов, Э. Левин, А. Митяев, А. Тимофеев. – М. : Наука, 2011. – 152 с.

2. Пономарчук, Ю. В. Наноструктурированные взаимные системы переходных металлов: исследование фазового состава, состава фаз и структурных характеристик методами рентгенографии / Ю. В. Пономарчук. – Кемерово : КГУ, 2015. – С 33–35.

This paper is devoted to the feasibility of using the Williamson – Hall method for calculating microstrains and grain sizes for the ZrN/Si_3N_4 multifilm system. The comparison was made for the Scherrer formula, where microstrains in grains are not taken into account.

Сугак Ярослав Николаевич, студент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, yaroslav.sugak@bk.ru.

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

УДК 546.26

А. А. ТАБОЛИЧ

ВЛИЯНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ АЛМАЗОВ НА СТАБИЛЬНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ИХ ВОДНЫХ СУСПЕНЗИЙ

Исследованы водные суспензии ультрадисперсных алмазов. С помощью спектров поглощения в ИК-диапазоне изучен функциональный состав поверхности ультрадисперсных алмазов, с использованием спектров оптической плотности определена седиментационная устойчивость суспензий.

На сегодняшний день огромный интерес для исследований вызывают наноразмерные объекты, особое внимание уделяется углеродным наноструктурам, таким как фуллерены, нанотрубки, графен, оксид графена, ультрадисперсные алмазы (УДА). Детонационные алмазы считаются привлекательными для применения в различных областях науки и техники, поскольку обладают комплексом уникальных физикохимических свойств. В основном УДА используют для получения электрохимических и химических покрытий, в качестве

присадок к моторным маслам и смазкам, добавок к полимерам и резинам, в пастах для финишного полирования, а также как сырье для получения новых композиционных и полупроводниковых материалов. Большая активная поверхность частиц УДА и потенциальная возможность управления ее функциональным составом делают этот материал привлекательным для дальнейших практических приложений, при этом в последнее время все больше прослеживается интерес исследователей к смещению применения наноалмазов в область биологии и медицины. Одним из перспективных, ускоренно развивающихся направлений в фармакологии является использование УДА в качестве носителя в системах доставки лекарственных веществ. Однако наноалмаз – это материал, свойства которого в большей степени, чем у других алмазных материалов, определяются химией его поверхности. Поэтому для получения наноалмазов с заранее заданными свойствами поверхности необходимо их химическое модифицирование. Необходимо отметить, что для большинства практических применений, особенно для медицинских приложений, наибольшее значение имеют формы наноалмазов, способные образовывать стабильные водные суспензии. Именно поэтому внимание исследователей в последние годы сосредоточено на изучении свойств суспензий УДА [1–3]. В процессе этих исследований решена проблема деагломерации ультрадисперсных алмазов. Показано, что путем предварительного отжига порошков УДА и последующего диспергирования полученного продукта в воде под воздействием ультразвука удается расщепить агломераты УДА промышленного синтеза со средним размером 100−200 нм, на составляющие их кристаллиты со средним размером 3−5 нм [3; 4].

Вместе с тем, технология получения УДА, существующая в настоящее время, не обеспечивает необходимую однородность состава и воспроизводимость характеристик данного материала. Основной проблемой является полифункциональность поверхности, приводящая к неселективности протекающих на ней реакций. Эти два фактора ограничивают широкое практическое применение УДА. В этой связи актуальной является задача получения наноалмазов, поверхностный слой которых содержит функциональные группы преимущественно одного типа. Одним из возможных путей решения этой задачи является термообработка УДА в вакууме. Согласно данным [5], десорбция основных примесей с поверхности УДА происходит при температурах 700−900 °С. Для полной очистки поверхности УДА требуется вакуумный отжиг при Т ~ 1100 °С. В [6] было показано, что вакуумный отжиг при Т ≤ 750 °С не влияет на структуру алмазных наночастиц. При более высоких температурах отжига на поверхности частиц начинается активное образование аморфного sp2-связанного углерода. При Т ≥ 1050 °С наблюдается полная графитизация поверхности УДА. При этом в температурном интервале 700−750 °С на поверхности УДА наблюдается минимальное количество функциональных групп. Таким образом, исследование характеристик суспензий, изготовленных на основе отожженных в вакууме порошков УДА, представляется перспективным с точки зрения возможности их последующей обработки и функционализации.

В настоящей работе исследовались образцы наноалмазов марки УДА-СП (производство ЗАО «Синта», г. Минск), подвергнутые термообработке в вакууме в интервале температур 500–1100 °С в течение часа, а также в атмосфере воздуха при 430 °С в течение 3 часов. Модификация УДА производилась с целью изменения функционального состава их поверхности. Водные суспензии изготавливались в концентрации 1 мг/мл с использованием деионизованной воды. Степень деагломерации и седиментационная устойчивость ультрадисперсных алмазов оценивалась путем анализа спектральной зависимости оптической плотности суспензий с использованием методики, приведенной в работе [3]. Регистрация спектров поглощения осуществлялась на протяжении года с интервалом в месяц.

Установлено, что для суспензий УДА, подвергнутых отжигу при 750 °С в вакууме и при 430 °С в атмосфере воздуха, спектральные свойства остаются наиболее стабильными среди исследуемых образцов. Из анализа спектров ИК-поглощения выявлено, что вакуумный отжиг способствовал очищению поверхности исходного образца от карбоксильных групп, в тоже время при отжиге в атмосфере воздуха произошло образование циклических ангидридов при окислении карбоксильных групп. В случае температурной обработки при 1100 °С происходит полная графитизация поверхности, что хорошо согласуется с полученными данными о том, что в супернатанте остается наименьшая концентрация вещества после центрифугирования суспензий.

Список литературы

1. Vul’, A. Detonation Nanodiamonds: Science and Applications / A. Vul’, O. Shenderova. – Boca Raton : Pan Stanford Publishing, 2013. – 346 p.

2. Химическое моделирование поверхности детонационного наноалмаза : учеб.-метод. пособие / И. И. Кулакова [и др.]. – М : МГУ им М. В. Ломоносова, 2018. – 92 с.

3. Оптические свойства гидрозолей детонационных наноалмазов / А. Е. Алексенский [и др.] // Физика твердого тела. – 2012. – Т. 54, вып. 3. – С. 541–548.

4. Size-Dependent Reactivity of Diamond Nanoparticles / O. A. Williams [et al.] // ACS Nano. – 2010. – Vol. 4, № 8. – P. 4824–4830.

5. Кощеев, А. П. Термодесорбционная масс-спектрометрия в свете решения проблемы паспортизации и унификации поверхностных свойств детонационных наноалмазов / А. П. Кощеев // Рос. хим. жур. – 2008. – Т. 52, № 3. – С. 88–96.

6. Гусаков, Г. А. Влияние вакуумного отжига на структуру ультрадисперсных алмазов детонационного синтеза / Г. А. Гусаков, М. П. Самцов, А. А. Луговский, А. П. Луговский // Прикладные проблемы оптики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы IV междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11–12 мая 2017 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Науч.-исслед. ин-т прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорус. гос. ун-та ; редкол. В. И. Попечиц [и др.]. – Минск, 2017. – С. 237–239.

Suspensions of ultradispersed diamonds in aqueous medium were examined. The surface functional composition of the detonation nanodiamonds was investigated using infrared absorption spectra. Sedimentation stability of the suspensions was determined with the aid of absorption spectroscopy in the visible range.

Таболич Анастасия Александровна, магистрант физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, tabolich.nastya@gmail.com.

Научные руководители – *Самцов Михаил Петрович*, доктор физико-математических наук, доцент, Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, samtsov@bsu.by.

Гусаков Григорий Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, gga68@rambler.ru.

УДК 533.9.082.5;543.423;621.373.826

А. С. ТРУБЕЦКАЯ, А. В. ТИТОВА, Г. Т. МАСЛОВА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОРФОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА И ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ВЫСОХШИХ КАПЕЛЬ ПЛАЗМЫ КРОВИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПАЦИЕНТОВ С ОПУХОЛЯМИ ГОЛОВНОГО МОЗГА (АСТРОЦИТОМА)

Рассмотрены вопросы разработки методик количественной оценки локального пространственного распределения жизненно необходимых элементов в фациях плазмы крови пациентов с опухолями головного мозга (астроцитома) методом локальной лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии. Результаты таких оценок могут служить основой при проведении диагностических исследований различных заболеваний человека.

В последние годы биологические жидкости (БЖ) стали одним из основных объектов исследования с применением инструментальных, в том числе и спектральных методов анализа. Такие исследования актуальны при диагностике врожденных патологий, экологически обусловленных заболеваний, профессиональных заболеваний, связанных со спецификой промышленного производства, и др.

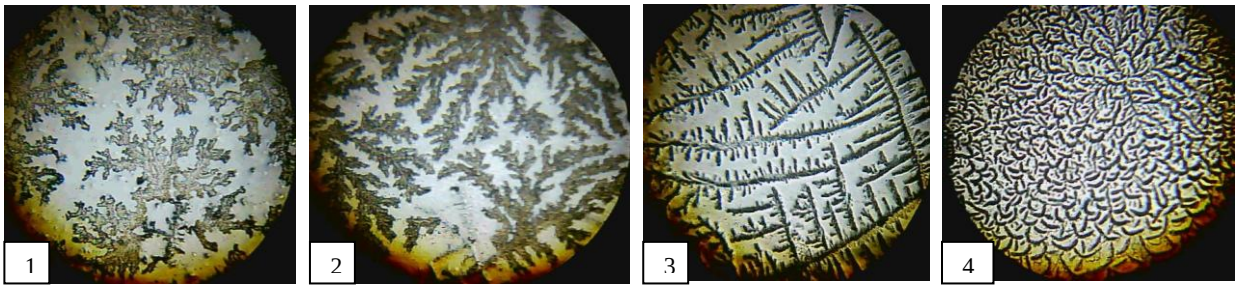
Патологическое состояние организма тесно связано с изменениями содержания химических элементов в биологических жидкостях. Хорошо известно влияние макроэлементов (кальций, калий, натрий, магний и др.) и микроэлементов (цинк, медь, железо, алюминий и др.) на функциональную работу организма. В связи с этим особое значение приобретает разработка методов ранней диагностики накопления и распределения некоторых химических элементов в БЖ человека.

Механизмы переноса коллоидных частиц в высыхающих каплях в настоящее время достаточно хорошо изучены как теоретически, так и экспериментально. Однако влияние диффузии на перемещение молекул малого размера (соли) внутри капли изучено еще недостаточно. В настоящей работе анализируется пространственное распределение (по объему капли) кальция при высыхании капель плазмы крови пациентов с опухолями головного мозга (астроцитома).

Образцы готовили по следующей методике. Каплю плазмы крови пациентов с опухолью головного мозга (ОГМ) объемом 10 мкл наносили на поверхность тщательно промытой подложки из ПММА, высушивали при температуре 20–25 °С и относительной влажности воздуха 60–65 % в течение примерно 90–100 минут. Диаметр высохшей капели – примерно 6 мм, средняя толщина – примерно 0,07 мм. Использование предметного стекла в лазерном атомно-эмиссионном методе исключается из-за наличия в самом стекле большинства исследуемых элементов.

Для получения снимков высыхающих и высохших капель использовали оптический микроскоп Биолам со светодиодной подсветкой (на пропускание) и веб-камерой, работающий с компьютером по USB-2 порту.

Морфология центральной части высохшей через 90 минут капли плазмы крови пациентов с онкопатологией головного мозга (1–3) и донора (4) приведена на рисунке 1 (увеличение 300 раз).



1 – гемистоцитарная астроцитома G2 левой лобной доли ГМ;
2 – диффузная астроцитома GII левой островковой доли с распространением на лобную и височную доли ГМ;
3 – астроцитома GII левой височной и островковой долей ГМ; 4 – донор

Рисунок 1 – Снимки высохших капель плазмы пациентов с диагнозом «опухоль головного мозга»

На всех приведенных снимках картина структурирования, пусть в разной степени, но отличается от нормы (донор), что является признаком наличия патологии. Следует отметить, что в зависимости от строения клеток, участвующих в формировании новообразований, астроцитома может носить обычный или особый характер. К обычным относятся фибриллярная, протоплазматическая и гемистоцитарная астроцитомы. Вторая группа включает пилоцитарную или пиллоидную, субэпендимальную (гломерулярную) и микроцистную церебеллярную астроцитомы. Видно, что при патологических состояниях организма характерны существенные изменения морфологической структуры фации. Проявляются нарушения в виде потери симметрии расположения основных элементов фации (конкреций, отдельностей, морщин, трещин и т. д.). Идентифицируются различные типы фаций, кроме радиального нормотипа. У 3 пациента в фации обильно присутствуют морщины (складчатость), хаотично разбросанные широкие жгутовые трещины. Присутствуют трехлучевые трещины (маркер застойных явлений в организме), небольшие жгуты (признак гипоксии ГМ) и бляшки (интоксикация организма).

Нарушение транспортной функции альбумина ведет к накоплению токсичных компонентов, что является существенным составляющим синдрома эндогенной интоксикации. В оценке состояния больных зачастую определяется только лишь количество альбумина. Вместе с тем способность альбумина связывать различные метаболиты в настоящее время в широкой клинической практике не оценивается.

Наличие альбумина в крови в пределах физиологической нормы (45–55 % от общего белка) далеко не всегда отражает полноценность его транспортной функции. Его связывающие центры могут быть блокированы токсичными лигандами (при эндотоксемиях и печеночной недостаточности), в связи с чем транспортная емкость резко снижается. В связи с этим для клиницистов весьма важное значение имеет методика определения степени заблокированности центров связывания альбумина, его резервной связывающей способности и в соответствии с этим оценки транспортной функции.

В настоящей работе для оценки процессов коацервации альбумина изучено пространственное распределение кальция в высохших каплях плазмы крови пациентов с диагнозом опухоль головного мозга.

Оценку локального пространственного распределения макро- и микроэлементов в высушенных каплях плазмы крови экспериментально проводили с помощью лазерной многоканальной спектрометрии. При проведении исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Лазерное излучение фокусируется на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 100 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм. Все эксперименты проводили в атмосфере воздуха при нормальном атмосферном давлении. На рис. 2 представлена зависимость интенсивности линий кальция в спектрах высушенных капель плазмы пациентов с диагнозом астроцитома.

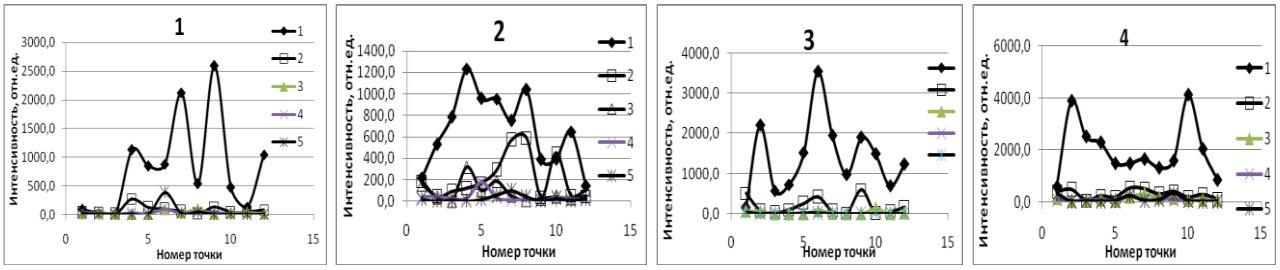


Рисунок 2 – Интенсивность линии Ca II (393,239 нм) в атомно-эмиссионных спектрах плазмы крови пациентов

Очевидны существенные различия в характере распределения кальция в высохшей капле плазмы крови пациентов. Хорошо известно, что у здорового человека кальций распределен только по поверхности высохшей капли, в центральной части капли оценивается доля ионизированного кальция. При равномерной диффузии БЖ к краям в процессе испарения жидкости максимальная концентрация связанного кальция приходится на краевой белковый валик.

Приведенные данные показывают, что у больных с ОГМ концентрация кальция ниже, чем у здорового человека. Кроме того, в процессе высыхания капель происходит хаотичное образование центров коагуляции, наблюдается разброс концентрации кальция, как по поверхности, так и слоям. Налицо – изменение связывающей способности альбумина при патологии. Это приводит к аномальной коагуляции белка и увеличению концентрации кальция по центру фации и в более глубоких слоях, что не характерно для здорового человека.

У пациентов 1 и 2 аномальное структурирование белка в значительной мере происходит в верхних слоях высыхающей капли плазмы крови. При этом на поверхности фации вытесняется NaCl, который кристаллизуясь, создает дендридную, похожую на листья, картину. В итоге, по характеру локального послойного распределения кальция в высохшей капле с привлечением картины ее морфологии можно оценить степень патологии пациента.

Настоящее исследование с использованием метода ЛАЭМС показало, что анализируя поверхность высохшей капли БЖ по структурным проявлениям и изменению концентрации кальция по поверхности и слоям можно дать достоверную оценку патологических изменений, что может быть использовано для поиска маркеров заболеваний.

Список литературы

1. Максимов, С. А. Морфология твердой фазы биологических жидкостей как метод диагностики в медицине / С. А. Максимов // Бюллетень сибирской медицины. – 2007. – № 4. – С. 80–85.

The paper deals with the development of methods for quantitative assessment of local spatial distribution of vital elements in plasma facies of patients with brain tumors (astrocytoma) by local laser atomic emission multichannel spectrometry. The results of such assessments can serve as a basis for diagnostic studies of various human diseases.

Трубецкая Антонина Сергеевна, студентка 3 курса биологического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Титова Анастасия Владимировна, студентка 3 курса биологического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Научные руководители – *Маслова Галина Трофимовна*, кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии человека и животных биологического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Зажогин Анатолий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

УДК 533.9.082.5;543.423;621.373.826

А. С. ТРУБЕЦКАЯ, А. В. ТИТОВА, Г. Т. МАСЛОВА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОРФОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА И ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОПУХОЛЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА (АСТРОЦИТОМА)

Изучены морфология и спектры ИК поглощения высохших капель плазмы крови больных с опухолью головного мозга различной степени. Выявлены структурные особенности высохших капель. Оценены возможности использования структурообразования высохшей капли и спектров ИК поглощения в качестве дополнительной информации при постановке и уточнении диагноза. Разработанные методики позволяют контролировать назначенное лечение и уточнять динамику развития патологии.

В последние годы обозначился заметный рост заболеваний центральной нервной системы, в том числе опухолей головного мозга (ОГМ) [1]. В клинической практике используют около двух десятков онкомаркеров

(ОМ), обладающих достаточной диагностической значимостью, в то же время не известно ни одного ОМ, соответствующего идеальным параметрам. Для получения однозначного результата требуется тщательное сравнение многочисленных показателей. Поэтому поиски всестороннего подхода к диагностике ОГМ продолжаются.

Известно, что биологическая жидкость (БЖ) играет роль функционального системообразующего фактора, связывая пространственно-временные структуры внутренней среды организма, которая четко реагирует на изменение пространственного порядка существующих химических связей. В механизме патогенеза раковых новообразований главнейшим звеном следует считать нарушение порядка самоорганизации белка на клеточном уровне. Проводятся многочисленные исследования, в том числе спектроскопические, для выявления дополнительных биохимических критериев поражения ГМ [2].

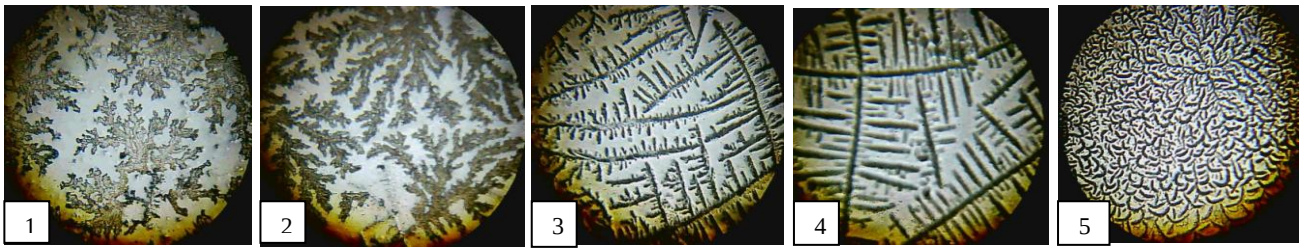
Нами ранее были приведены результаты структурирования фации для уточнения диагноза и контроля лечение пациентов с онкопатологией [3]. В настоящей работе с этой же целью проводится оценка возможности использования спектров ИК поглощения фаций плазмы крови для получения дополнительной информации.

Для изучения морфологии фации плазму крови (10 мкл) наносили на обезжиренную пластинку из оргстекла, высушивали при комнатной температуре в открытой системе в течение 90–100 минут. Диаметр высохшей капли равен примерно 6 мм.

Снимки высохших капель плазмы крови регистрировали, используя оптический микроскоп Биолам со светодиодной подсветкой (на пропускание) и веб-камерой. Микроскоп имеет видеонасадку, работающую с компьютером по USB-2 порту.

Для получения спектров ИК поглощения фаций плазмы крови использовался Фурье-спектрометр Vertex 70 фирмы Bruker. Образцы плазмы крови в объеме 3 мкл наносили на подложку из стекла КРС-5 и высушивали в течение часа при комнатной температуре.

Изучена морфология высохших капель плазмы крови более 40 пациентов с опухолью головного мозга различной степени и разным характером патологии. В качестве примера на рисунке 1 приведена морфология центральной части фации нескольких пациентов с диагнозом диффузная астроцитома и для сравнения донора (увеличение 300 раз).



1–4 – пациенты с диагнозом «астроцитома», степень патологии G II; 5 – донор

Рисунок 1 – Центральная часть фации плазмы крови

Очевидны существенные изменения морфологической структуры фации. Проявляются нарушения в виде потери симметрии расположения элементов фации, идентифицируются различные типы фаций, кроме радиального нормотипа.

Объемной структурной деформации менее подвержены высохшие капли плазмы крови пациентов 1 и 2. Структурные аномалии больше проявляются в морфологии фации пациентов 3 и 4 где обильно присутствуют морщины (складчатость), трещины (застойные явления), хаотично разбросаны широкие жгутовые трещины (гипоксия ГМ), бляшки (интоксикация).

Для выявления дополнительных маркеров и конкретизации признаков патологии обследованных больных изучены спектры ИК поглощения плазмы крови. Исследования проводили в области спектра 4000–400 см$^{-1}$. Наиболее информативной областью является область 1200–950 см$^{-1}$ [2]. Эта область позволяет выявить весь спектр веществ, содержащих связи простых Р–О и С–О и сложных эфиров С–ОО, Р–ОО, которые присутствуют в липидах, фосфорилированных белках, углеводах, креатинфосфокиназах (КФК) и других белках. На рисунке 2 приведены спектры образцов плазмы крови тех же пациентов и донора, как на рисунке 1.

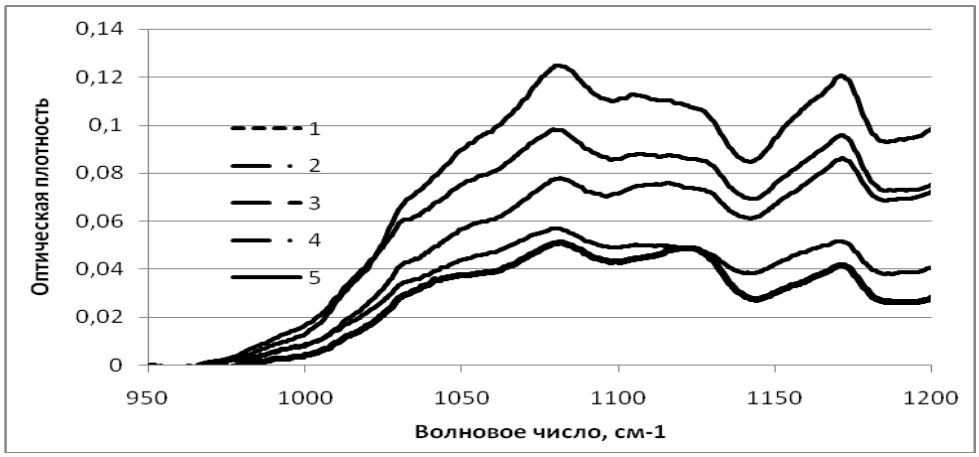


Рисунок 2 – Спектры ИК поглощения образцов плазмы крови в области 950–1200 см$^{-1}$

Полученные нами результаты такой дифференцировки позволяют использовать такого рода данные в качестве дополнительного критерия при диагностической оценке патологии.

Теоретически данные можно объяснить с позиции тканевой теории онкогенеза, согласно которой саморегулирующаяся система (гомеостаз) контролирует постоянство качественного и количественного состава клеток, обладающих потенцией к независимому размножению [4]. Согласно этой теории нарушение тканевого механизма контроля приводит к неконтролируемому делению клоногенных опухолевых стволовых клеток, обладающих активизированными онкогенами, что и проявляется при наличии начальной патологии и, особенно, при дальнейшей направленной онкодифференцировки. Это еще раз подчеркивает необходимость четкой дифференциации степени патологии и тщательного контроля происходящих процессов.

Таким образом, для всех пациентов с ОГМ характерен иррадиальный морфотип фации. Морфология фации плазмы крови ряда пациентов характеризуется особенно ярко выраженной сегментарной морщинистостью, наличием обильного числа бляшек и широких жгутовых трещин.

Исследования ИК спектров образцов фаций, количественная оценка соотношения выбранных полос также расширяют возможности дифференцирования опухолевых состояний пациентов в зависимости от стадии заболевания.

Выполненные исследования предлагают доступные методики дополнительного морфологического и спектрометрического качественного материала для получения оперативной информации, что способствует более глубокому пониманию характера протекания патологических процессов и более успешному лечению опухолей головного мозга.

Список литературы

1. Кобяков, Г. Л. Онкология. Новые стратегии в лечении злокачественных глиом: краткий обзор научных публикаций ежегодного съезда общества нейроонкологов (SNO 2010) в Монреале / Г. Л. Кобяков, А. В. Смолин // Фарматека (Онкология). – 2011. – № 7. – С. 41–49.

2. Комаров, Р. Н. Инфракрасная спектроскопия сыворотки крови в диагностике онкозаболеваний / Р. Н. Комаров, А. С. Гордецов, Н. В. Комаров, О. В. Канашкин // Нижегор. мед. журн. – 2006. – № 1. – С. 98–100.

3. Использования морфоструктурного анализа и лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии высохших капель плазмы крови для диагностики рака простаты / А. В. Савков [и др.] // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2016. – № 3. – С. 51–62.

4. Черезов, А. Е. Общая теория рака : тканевый подход / А. Е. Черезов. – М. : Изд-во МГУ, 1997. – 252 с.

The morphology and IR absorption spectra of dried drops of the blood plasma from patients with brain tumors of different grades have been studied. The structural peculiarities of these drops have been revealed. The possibilities to use the structural features of dried drops and of their IR absorption spectra as a source of additional information facilitating correct diagnosis have been assessed. The developed methods enable one to control the appointed treatment and to elucidate a dynamics of the developing pathology.

Трубецкая Антонина Сергеевна, студентка 3 курса биологического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Титова Анастасия Владимировна, студентка 3 курса биологического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Научные руководители – *Маслова Галина Трофимовна*, кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии человека и животных биологического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Зажогин Анатолий Павлович, доктор физико-мататематических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

УДК 553.6.08.(047.1)(476)

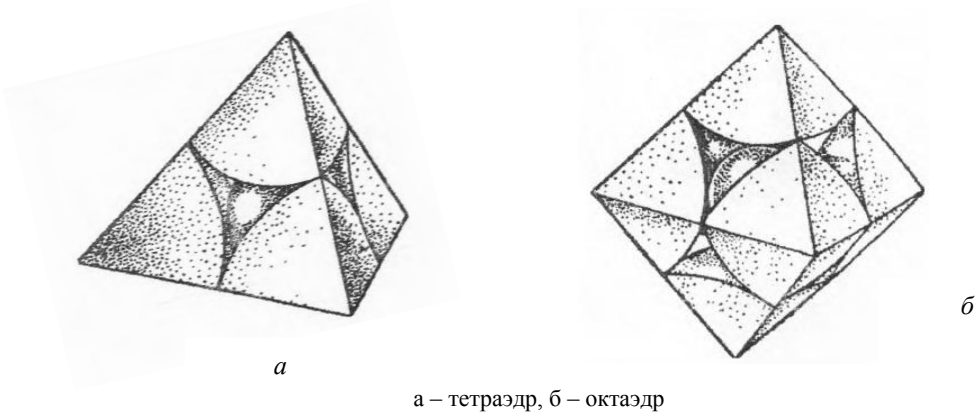
И. И. ХАЛУПА

МОДИФИЦИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ НАНОЧАСТИЦ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ

Исследована структура двухслойных слоистых силикатов с точки зрения использования их в качестве наполнителей модификаторов в полимерах. Было выяснено, что двухслойные силикаты – отличные модификаторы для полимеров в связи с наличием активных зарядовых центров.

Двухслойные слоистые силикаты используются в качестве полуфабрикатов при создании строительных материалов, так как являются важнейшими компонентами глин. Кроме этого, эти минералы используются в качестве композитов на полимерной основе.

Двуслойными называются такие силикаты, основной блок которых состоит из октаэдрических и тетраэдрических слоёв. Схема структурного тетраэдра полиэдра приведена на рисунке 1. В вершинах находятся атомы кислорода, в центре – ионы метала [1].



а – тетраэдр, б – октаэдр

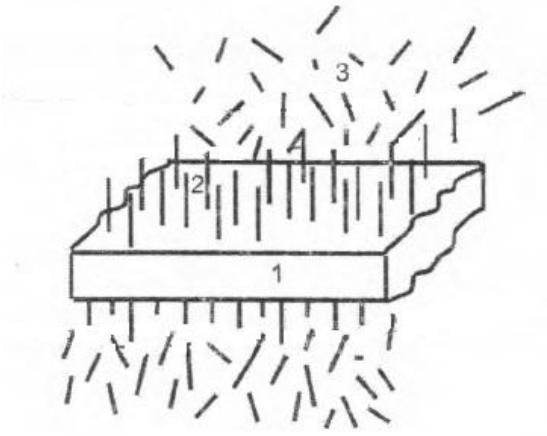
Рисунок 1 – Кислородные структурные полиэдры

Известно, что многие слоистые минералы обладают свойствами кислот, что свидетельствует о наличии в них протонов. Наличие в таких минералах (глина, цеолиты и т. п.) активных центров обусловливает не только адсорбцию различных веществ, но и их превращение, в результате протонирования и координации с льюисовскими кислотными центрами [2].

В настоящее время широкое распространение получила технология получения нанокомпазиционных материалов с использованием силикатов в качестве наполнителей модификаторов в полимерах. Наиболее распространенным является метод получения нанокомпозитов путем введения органоминерального слоистого силиката в расплав полимера. Он применим для получения материалов на основе различных полимеров: неполярного полистирола, слабополярного полиэтилентерефталата, сильнополярного найлона-6 и др. [3].

Частица имеет модифицирующие действия, так как равенство между положительными и отрицательными зарядами частицы нарушается, вследствие диспергирования макрообъектов при флуктуационных процессах. Существуют такие связи между молекулами частиц модификатора поверхностного слоя. Такие связи называются скомпенсированными. Эти связи позволяют создать достаточно крепкие соединения молекулы связующего, прилегающего к поверхности частицы.

Наличие на поверхности наполнителя активных зарядовых центров говорит о наличии модифицирующей активности у частиц. У слоистых силикатов по центрам гексогональных и тетрогональных лунок расположены различные гидроксильные группы в их октаэдрическом слое. Активные зарядовые центры могут появиться вследствие одинаковых ориентаций гидроксильных групп. В свою очередь активные зарядовые центры формуют электростатическую мозаику. Такая способность слоистых силикатов объясняет сохранение их электронности. При определённых условиях природные слоистые силикаты могут быть аналогами магнитных минералов [3]. В связи с этим одномерные нанокристаллы слюд и других слоистых силикатных минералов можно использовать в качестве высокоэффективных наномодификаторами композиционных материалов, например таких, как полимеры.



1 – частица слоистого модификатора, 2 – модифицированный объём, 3 – вещество основы

Рисунок 2 – Область связи между частицей слоистого модификатора и веществом основы

Двухслойные слоистые силикаты диспергируются до пластинок, толщиной в несколько нанометров (одномерные наночастицы). Эти модификаторы обладают достаточной модифицирующей активностью, которая зависит не только от состава, но и от взаимоконфигурации этих наночастиц, например создание текстур [4].

Следует отметить, что модификаторы имеют низкую стоимость, так как встречаются в глинах, которые широко распространены в Беларуси.

Список литературы

1. Халупа, И. И. Систематизация двухслойных слоистых силикатов / И. И. Халупа // Физика конденсированного состояния : материалы науч.-практ. конф. аспир., магистр. и студ. (Гродно, 20 апр. 2017 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол. : В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2017. – С. 105–107.

2. Полимер-силикатные машиностроительные материалы: физико-химия, технология, применение / С. В. Авдейчик [и др.] ; под ред. В. А. Струка, В. Я. Щербы. – Минск : Технология, 2007. – 431 с., [8] л. ил.

3. Бетехтин, А. Г. Курс минералогии / А. Г. Бетехтин ; под науч. ред. Б. И. Пирогова и Б. Б. Шкурского. – М. : Высшая школа, 2008. – 79 с.

4. Кашаев, А. А. Основные типы структур силикатов и их аналогов со сложными тетраэдрическими радикалами – ленточными, слоистыми, каркасными / А. А. Кашаев, Н. А. Фролова. – Иркутск : Изд-во Иркутск. пед. ин-та, 1994.

In this article was analysed the strukture of double-layer silicates. It is described the appearing of their electronical properties. And it gives possibility to take more effective material as modifier of composites.

Халупа Игорь Иванович, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

Научный руководитель – *Лиопо Валерий Александрович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

УДК 532.13,577.322.3,577.356

А. В. ХОРОЛЬСКИЙ

КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНЫХ РАДИУСОВ МАКРОМОЛЕКУЛ СЫВОРОТОЧНОГО АЛЬБУМИНА ЧЕЛОВЕКА

Для обработки экспериментальных данных сдвиговой вязкости водных растворов сывороточного альбумина человека в широком температурном и концентрационном интервалах при постоянном значении pH = 7,0 использовали формулу Маломужа – Орлова, которая позволяет рассчитать эффективные радиусы макромолекул сывороточного альбумина человека.

Вопросу структуры сывороточного альбумина человека в водных растворах посвящено значительное количество как теоретических, так и экспериментальных работ, однако единая картина связи структуры макромолекулы альбумина с pH, концентрацией, температурой, наличием примесей в водных растворах на сегодня отсутствует. Эти вопросы требуют дальнейших системных исследований, частью которых является настоящая работа.

Экспериментальные данные сдвиговой вязкости водных растворов сывороточного альбумина человека в температурном интервале (278–318) К и интервале концентраций (0,82–36,9) масс. % для постоянного значения pH = 7,0 взято из работы [1]. Измерения в работе [1] проведены с помощью метода капиллярной вискозиметрии, относительная погрешность не превышала 2 %.

Для обработки экспериментальных данных температурных и концентрационных зависимостей вязкости водных растворов сывороточного альбумина человека использовано формулу Маломужа – Орлова, которая позволяет моделировать сдвиговую вязкость растворов макромолекулярных клубков до объемных концентраций 0,45 об. % и рассчитать эффективные радиусы макромолекул [2].

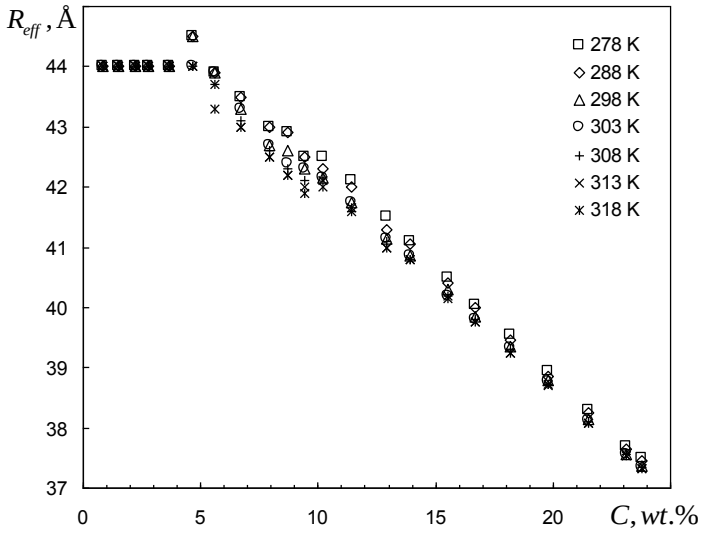


Рисунок 1 – Концентрационные зависимости эффективных радиусов макромолекул сывороточного альбумина человека

Показано, что во всем температурном интервале можно выделить три области концентраций, где поведение эффективного радиуса сывороточного альбумина человека меняется: 1) при концентрациях (0,82–3,65) масс. % эффективные радиусы сывороточного альбумина человека остаются неизменными; 2) при концентрациях (4,67–9,45) масс. % эффективные радиусы альбумина в водном растворе нелинейно уменьшаются; 3) при концентрациях (10,2–23,8) масс. % эффективные радиусы макромолекул альбумина с ростом концентрации линейно уменьшаются, причем угол наклона нисходящих зависимостей слабо зависит от температуры.

Список литературы

1. Monkos, K. On the Hydrodynamics and Temperature Dependence of the Solution Conformation of Human Serum Albumin from Viscometry Approach / K. Monkos // Biochimica et Biophysica Acta – Proteins and Proteomics. – 2004. – Vol. 1700 (1). – P. 27–34.

2. Khorolskyi, O. V. Effective Radii of Macromolecules in Dilute Polyvinyl Alcohol Solutions / O. V. Khorolskyi // Ukr. J. Phys. – 2018. – Vol. 63, iss. 2. – P. 144–149.

On the basis of experimental data on the viscosity of aqueous solutions of human serum albumin, using the Malomuzh – Orlov theory, the temperature and concentration dependences of radii of macromolecules are studied.

Хорольский Алексей Викторович, аспирант, Полтавский национальный педагогический университет имени В. Г. Короленко, Полтава, Украина.

Научный руководитель – *Руденко Александр Пантелеймонович*, доктор физико-математических наук, профессор, академик Академии наук высшей школы Украины, Полтавский национальный педагогический университет имени В. Г. Короленко, Полтава, Украина.

УДК 537.311.322

В. А. ЦВЕТКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ *КРЕМНИЙ-ГЕРМАНИЙ* ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИХ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА

Методом сканирующей зондовой микроскопии изучена структура поверхности тонких пленок $Si_{1-x}Ge_x$, выращенных путем молекулярно-лучевой эпитаксии. Выявлена связь поверхностной шероховатости пленок от содержания в них германия. Анализ произведен на основании полученных изображений при сканировании поверхности исследуемых образцов.

Интерес к получению и исследованию бездефектных пленок твердых растворов $Si_{1-x}Ge_x$ на подложках из кремния связан с практической значимостью таких структур для создания приборов оптоэлектроники на основе кремниевой технологии. Исследование морфологии поверхности является наиболее перспективным для контроля деформаций пленок твердых растворов. Целью настоящей работы являлось описание зависимости структуры поверхности от содержания германия в пленках $Si_{1-x}Ge_x$.

Для экспериментов использовались пленки твердых растворов толщиной (1–2) мкм, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на кремниевой подложке с использованием переходного слоя. Морфология поверхности образцов при термообработке изучалась с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) Солвер нано.

На рисунке 1 показана морфология поверхности пленок в 2D (А, С) и 3D (Б, Д) представлении для x, равных 0,15 (А, Б) и 0,5 (С, Д). Из анализа рисунков получено, что поверхностная шероховатость равна 2,32 и 5,2 для x = 0,15 и 0,5 соответственно. Отметим, что в чистом кремнии шероховатость 0.38.

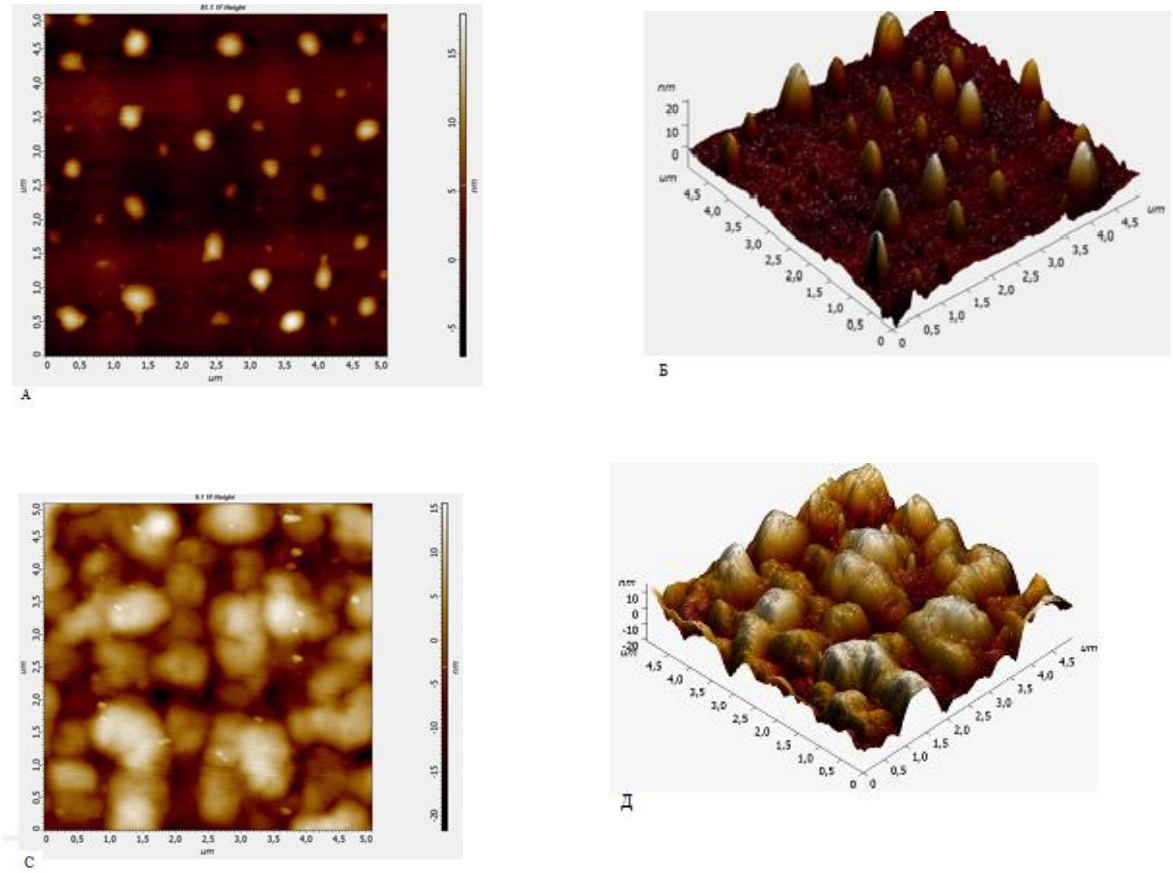


Рисунок 1 – Морфология поверхности плёнок

The surface structure of thin $Si_{1-x}Ge_x$ films grown by molecular beam epitaxy was studied by scanning probe microscopy. The connection of the surface roughness of the films from the content of germanium in them is revealed. The analysis was made on the basis of the obtained images when scanning the surface of the samples under study.

Цветков Владимир Александрович, студент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, cvetkov1994g@gmail.com.

Научные руководители – *Покотило Юрий Мефодьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры энергофизики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, pokotilo@bsu.by.

Петух Алла Николаевна, кандидат физико-математических наук, зав. учебной лабораторией Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, petuch@bsu.by.

УДК 537.311.322

М. А. ЧВЕК

ТРАНСФОРМАЦИЯ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ РАСТВОРОВ *КРЕМНИЙ-ГЕРМАНИЙ* В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА

Исследовались спектры отражения пленок $Si_{1-x}Ge_x$, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Обнаружено смещение пиков, соответствующих характеристическим точкам зоны Бриллюэна, от 2,07 до 3,39 эВ в диапазоне изменения x = (1–0). По нашему мнению, смещение обусловлено изменением постоянной решетки твердого раствора *Si-Ge*.

В настоящей работе были проведены исследования изменения спектров отражения в твердых растворах $Si_{1-x}Ge_x$ в диапазоне изменения x = (1–0).

Образцы были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках монокристаллического полупроводника *n*-типа Si(001). С целью избавления от дислокаций каждый слой подвергался отжигу при высоких температурах (700 или 920–930 °С). Последний слой требуемого постоянного состава толщиной 1 мкм был выращен при температуре 700 °С. Состав верхнего слоя всех образцов был определен методом резерфордовского обратного рассеяния. С помощью оптического, просвечивающего электронного и атомно-силового микроскопов была изучена структура каждого из образцов [2]. С использованием спектрофотометра PROSCAN получены спектры отражения в области от 190 до 1100 нм.

На рисунке 1 представлены спектры отражения образцов при различных концентрациях Ge. Из анализа рисунка видно, что наблюдаются два пика. Положение первого пика не зависит от концентрации Ge в твердом растворе. Положение второго пика существенно изменяется с изменением компонентного состава. Данные этого смещения представлены в таблице 1 и на рисунке 2. В таблице также представлены точки высокой симметрии в зоне Бриллюэна, соответствующие найденным пикам.

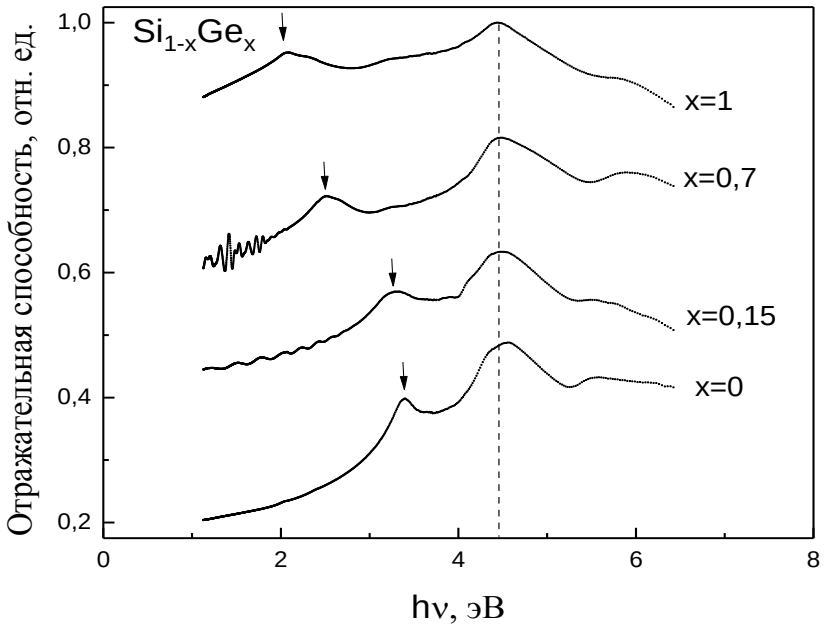


Рисунок 1 – Спектры отражения твёрдых растворов $Si_{1-x}Ge_x$

Таблица 1 – Данные о природе и величинах энергии (эВ) междузонных переходов, соответствующих первому пику

Содеражние Ge, %	Энергия, эВ	Переход
0	3,39	$\Gamma_{25'} - \Gamma_{15}$
15	3,29	$L_{3'} - L_1$
70	3,51	$L_3 - L_1$
100	2,07	$L_{3'} - L_1$

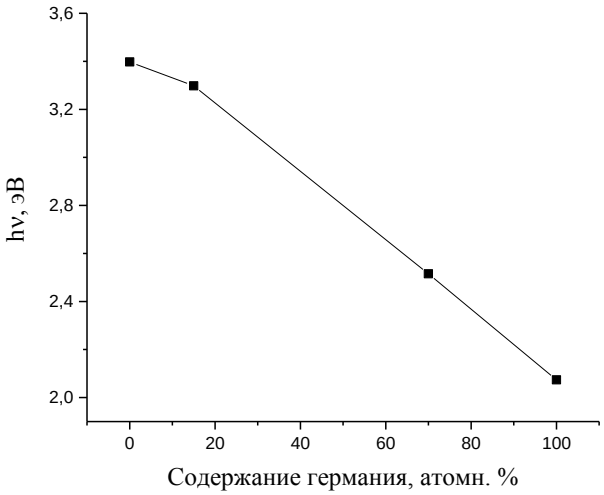


Рисунок 2 – Зависимость энергии второго пика от состава раствора *Si-Ge*

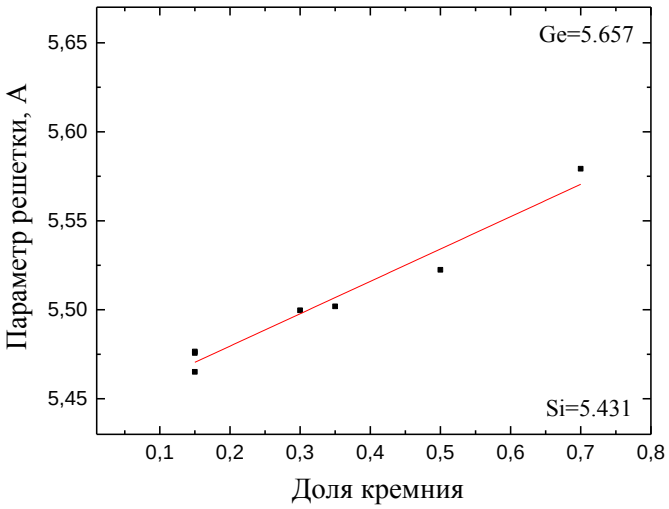


Рисунок 3 – Зависимость параметра решётки раствора *Si-Ge* от содержания кремния

Таким образом показано, что в растворах *кремний-германий* при увеличении содержания германия происходит смещение первого пика в сторону меньших энергий. По нашему мнению, эта зависимость обусловлена изменением постоянной решетки твердого раствора *Si-Ge* при изменении компонентного состава, что подтверждается данными рентгенофазового анализа, представленными на рисунке 3.

Список литературы

1. Уханов, Ю. И. Оптические свойства полупроводников / Ю. И. Уханов. – М. : Наука, 1997. – 368 с.

2. Gaiduk, P. I. Strain-relaxed SiGe/Si heteroepitaxial strictures of low threading-dislocation density / P. I. Gaiduk // Thin Solid films. – 2000. – P. 122–123.

Reflection spectra of $Si_{1-x}Ge_x$ films obtained by molecular beam epitaxy were investigated. The displacement of the peaks corresponding to the characteristic points of the Brillouin zone from 2,07 to 3,39 eV in the range of x = (1–0) was found. In our opinion, the displacement is due to the change in the lattice constant of the Si-Ge solid solution.

Чвек Марина Андреевна, студентка физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, marina.chvek.98 @mail.ru.

Научные руководители – *Покотило Юрий Мефодьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры энергофизики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, pokotilo@bsu.by.

Петух Алла Николаевна, кандидат физико-математических наук, зав. учебной лабораторией Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, petuch@bsu.by.

УДК 539.21

В. В. ШЕВЕЛЁВА

КИНЕТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕНИЯ ЦИРКОНИЯ

Изучена кинетика высокотемпературного окисления циркония. С помощью рентгеноструктурного анализа установлено образование оксидных фаз.

Цирконий является одним из основных материалов ядерной энергетики, который используется при изготовлении оболочек твэлов. Однако в случае аварийных ситуаций происходит взаимодействие циркония с теплоносителем (водой), приводящее к его интенсивному окислению и деградации физико-механических свойств. Для снижения скорости окисления оболочек твэлов используют различные методы модифицирования поверхности, в частности, нанесение защитных покрытий, легирование дополнительными элементами, обработка концентрированными потоками энергии. Такого типа модифицирование способствует изменению структурно-фазового состояния приповерхностного слоя и, как следствие, оказывает влияние на диффузионные процессы.

В данной работе рассматривается высокотемпературное окисление циркония, на основе которого будут установлены основные механизмы коррозионных процессов, происходящих в циркониевых сплавах, подвергнутых высокоэнергетическому воздействию компрессионных плазменных потоков.

Объектами исследования в данной работе являлись пластины технически чистого циркония с размерами 10×10 мм и толщиной 2 мм. Образцы отжигали в муфельной печи в воздушной атмосфере в течение одного часа при температурах от 200 °С до 900 °С. Фазовый состав исследовался на основе рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Rigaku Ultima IV в медном излучении (λ = 0,154178 нм) в геометрии Брэгга – Брентано. В экспериментах контролировалось изменение массы образцов, происходящее вследствие насыщения поверхности кислородом. Измерение массы материала осуществлялось на электронных весах с точностью ±0,0001 г.

Высокотемпературное окисление циркония приводит к увеличению массы образца (рисунок 1). Представленные данные свидетельствуют об экспоненциальном росте массы образцов.

При температурах отжига 200–500 °С зафиксирован незначительный прирост массы, не превышающий 1 мг/см^2. При увеличении температуры от 500 до 900 °С прирост массы резко увеличивается, достигает 6–7 мг/см^2, что является результатом увеличения коэффициента диффузии кислорода в решетке циркония, а также происходящим фазовым переходом из низкотемпературной гексагональной плотноупакованной (ГПУ) α-фазы циркония (α-Zr) в высокотемпературную объемноцентрированную кубическую (ОЦК) β-фазу (β-Zr). Известно, что плотность упаковки атомов ОЦК решетки ниже, чем в ГПУ решетке, вследствие чего диффузия кислорода в β-Zr становится более интенсивной.

Присутствие кислорода в решетке циркония приводит к образованию оксидов, наличие которых было выявлено методом рентгеноструктурного анализа (рисунок 2).

На представленной рентгенограмме наблюдается совокупность дифракционных максимумов, соответствующих фазе α-Zr. Согласно представленным результатом формирование оксидных фаз начинается при температуре 500 °С. Обнаружено, что в оксидированном слое циркония образуются оксиды ZrO_2 с различными кристаллическими решетками: моноклинная модификация (m-Zr) и тетрагональная модификация (t-Zr). При температурах ниже 300 °С кислород растворяется в решетке α-Zr и образуется твердый раствор

α-Zr(O). Параметры решетки гексагональной фазы циркония изменяется от 0,3232 до 0,3234 нм (параметр *a*) и от 0,5142 до 0,5148 нм (параметр *c*) при увеличении температуры до 200 °С. Однако при изменении температуры от 300 до 500 °С параметры уменьшаются от 0,3231 до 0,3223 нм (параметр *a*) и от 0,5134 до 0,5124 нм (параметр *c*), что связано с образованием оксида в образце.

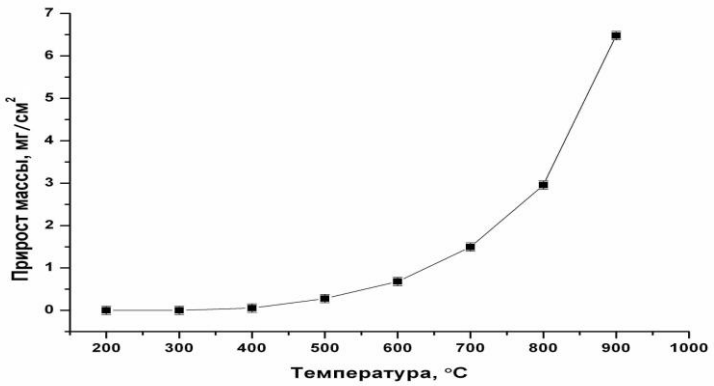


Рисунок 1 – График прироста массы оксида на образцах при различных температурах

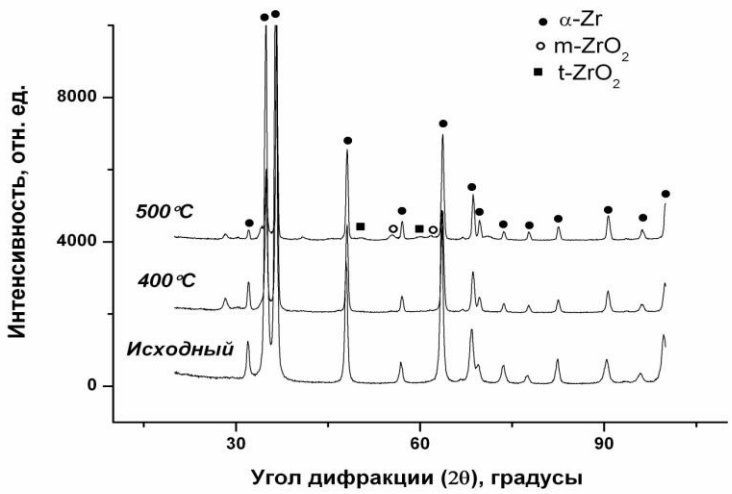


Рисунок 2 – Рентгенограммы циркония после высокотемпературного окисления

Таким образом, в результате эксперимента было показано, что при высокотемпературном окислении образцов циркония в приповерхностном слое металла происходит диффузия кислорода, которая, как следствие, приводит к образованию оксида, приросту массы и изменению структуры материала.

Список литературы

1. Oxidation of metals and alloys / O. Kubaschewski [et al.]. – Butterworths, 1962. – 428 p.
2. Дуглас, Д. Л. Металловедение циркония / Д. Л. Дуглас ; пер.: А. С. Займовский. – М. : Атомиздат, 1975. – 340 с.
3. Биркс, Н. Введение в высокотемпературное окисление металлов / Н. Биркс, Дж. Майер ; пер.: А. А. Штейнберг. – М. : Металлургия, 1987. – 184 с.

The high temperature kinetics of zirconium oxidation is discussed. The oxide formation was revealed by means of X-ray diffraction analysis.

Шевелёва Виктория Викторовна, студентка 3 курса Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, vikulya-sheveleva@mail.ru.

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

УДК 678.073.661.481

А. А. ЮСЕНКО

ВЛИЯНИЕ СМЕСЕЙ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦ РАЗЛИЧНОГО СТРОЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МАЛОНАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ

Поиск новых композиционных материалов сопровождается разработкой эффективных технологий изменения структуры и физико-механических характеристик исходных веществ, а также созданием новых перспективных модификаторов и наполнителей. Представляет интерес применение наноразмерных объектов для модифицирования полимерных материалов и композиций на их основе. Данными исследованиями интенсивно занимаются в ряде научных центров Евросоюза, США, Республики Беларусь, России и др.

Показано, что модифицирование политетрафторэтилена дисульфидом молибдена различной дисперсности приводит к возрастанию износостойкости композиции. Содержание модификатора в композиции составляло 10 % об. Установлено влияние геометрических размеров частиц на триботехнические характеристики композиционного материала. С увеличением значений дисперсности модификатора износостойкость композиционного полимерного материала возрастает. Данный факт позволил сделать вывод о том, что для определенной концентрации модификатора в объеме полимера существует заданный размер частиц, при котором триботехнические характеристики композиции оптимальны [1].

В результатах работы было показано [2]: существенное влияние на износостойкость и коэффициент трения оказывают модификаторы, имеющие развитую поверхность с геометрическими параметрами, находящимися в области 20–40 мкм. В работе [3] установлена взаимосвязь между зарядовой активностью и габитусом частиц, содержащих нанофазы. Таким образом, морфология частиц, применяемых для модифицирования полимерных материалов, оказывает определяющее влияние на физико-механические характеристики создаваемых композиционных материалов. Необходимо отметить, что с увеличением содержания низкоразмерных частиц в объеме полимера происходит их агломерация при превышении критической концентрации.

Возникновение областей, содержащих агломерированные частицы модификатора, должно приводить к уменьшению прочностных характеристик модифицируемых полимерных композиций. В агломерированных частицах значения взаимодействия между частицами модификатора меньше, чем при взаимодействии частицы с окружающими ее полимерными молекулами. В результате этого агломераты частиц выступают в роли концентраторов напряжений при внешних воздействиях и являются трехмерными объемными дефектами в структуре композиционного материала [1].

Согласно современным представлениям, при формировании нанокомозитов, в том числе содержащих механоактивированные частицы, необходимо обеспечивать стабильность процентного содержания модификатора для задания необходимых функциональных характеристик.

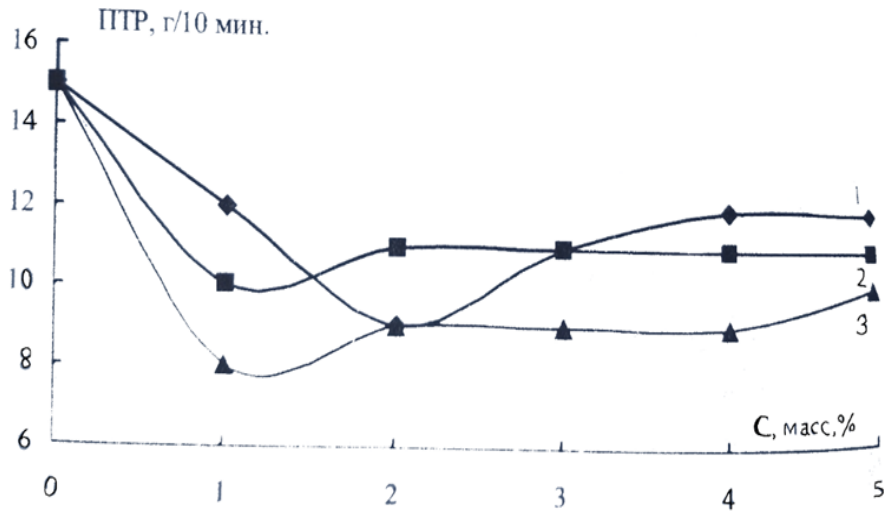
Анализ проведенных многочисленных исследований, имеющихся в литературе [2; 3], показал, что при концентрации модифицирующих веществ органической и неорганической природы от 3 % об. до 15 % об. для получаемого композиционного материала обеспечиваются высокие прочностные характеристики при сохранении эластичных свойств, плотности, стойкости к многократному передеформированию, но в ряде случаев невысокие трибологические характеристики. Для улучшения триботехнических характеристик содержание модификатора увеличивают до 20 % об., что позволяет получить композиционные материалы, обладающие хорошей стойкостью к износу, с достаточно низким коэффициентом трения. Обычно данные композиты эксплуатируются при невысоких скоростях скольжения и небольших нагрузках.

Для увеличения триботехнических характеристик композиционных материалов содержание модификатора повышают до 33 % об. – 35 % об., что позволяет увеличить значения контактных нагрузок, при которых эксплуатируются композиты, термическую стабильность, стойкость к деформированию материала при высоких скоростях скольжения и нагрузках. Получаемые при данных концентрациях модификаторов композиционные материалы применяются для изготовления подшипников скольжения в тяжело нагруженных узлах трения, в качестве подвижных герметизирующих узлов компрессорной техники [3].

В данный момент времени имеется интерес с точки зрения повышения триботехнических характеристик композиционных материалов. Представляют интерес механоактивированные частицы, которые относятся к структурно-активным модификаторам. В ходе механоактивации происходит дополнительное диспергирование частиц, что позволяет получить объекты с предельно малыми размерами частиц. В качестве модифицирующего

агента для улучшения триботехнических характеристик достаточно широко применяют аэросил (SiO_2). Данное соединение после введения в полимерную матрицу вызывает тиксотропный и усиливающий эффекты, увеличивает стойкость композиционного материала к слипанию, расслаиванию, повышает адгезионные характеристики [1].

Использование механоактивированных частиц и их смесей в качестве модифицирующих агентов в полимерных материалах приводит к значительному изменению реологических характеристик (рисунок 1). Влияние данных модификаторов заключается в том, что активная поверхность механоактивированных частиц оказывает существенное влияние на параметры кристаллической решетки, аморфных областей, выражающееся в аномальном поведении фононов, электронов, плазмонов и т. п. Данные структурные изменения приводят к изменению физико-химических характеристик механоактивированных частиц в сравнении с соответствующими массивными объектами [2].



1 – механоактивированный кремень; 2 – механоактивированная смесь ПА6 (30 % масс.) + каолинит (70 % масс.) (ПАК); 3 – смесь механоактивированного кремня (22 % масс.) + механоактивированного ПАК (78 % масс.)

Рисунок 1 – Зависимость показателя текучести расплава полиамида 6 от содержания механоактивированных частиц

Список литературы

1. Полимер-силикатные машиностроительные материалы: физико-химия, технология, применение / С. В. Авдейчик [и др.] ; под науч. ред. В. А. Струка. – Минск : Технология, 2006. – С. 104–109.

2. Механизмы формирования структуры нанокомпозиционных материалов на основе полимерных и олигомерных матриц / В. А. Лиопо [и др.] // Прогрессивные машиностроительные технологии : моногр.: в 2 т. – М. : Изд-во «Спектр», 2012. – Т. 2. – С. 206–222.

3. Введение в физику нанокомпозиционных материалов : моногр. / С. В. Авдейчик [и др.] ; под науч. ред. В. А. Лиопо, В. А. Струка. – Гродно : ГрГУ, 2009.

The search for new composite materials is accompanied by the development of effective technologies for changing the structure and physical and mechanical characteristics of the initial substances, as well as the creation of new promising modifiers and fillers. Application of nanoscale objects for modification of polymeric materials and compositions based on them is of interest. These studies are intensively engaged in a number of research centers of the European Union, the USA, the Republic of Belarus, Russia, etc.

Юсенко Александр Анатольевич, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

Научный руководитель – *Лиопо Валерий Александрович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

УДК 535.391

Д. Н. ЯНУЧЕК

АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЗОНЫ ЛАЗЕРНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ

Разработана и экспериментально реализована методика оперативного контроля за ростом диаметра и глубины кратера, образующегося на поверхности материалов, облучаемых импульсным лазерным излучением со сложной временной структурой.

При обработке материалов лазерным излучением часто возникает необходимость контроля за ходом механических процессов, происходящих непосредственно в зоне взаимодействия лазерного излучения с веществом, что сопряжено с существенными трудностями. Широко применяющиеся интерферометрические и теневые методы не могут быть использованы для исследования деформации металлов, так как металлы непрозрачны для излучения видимого, ультрафиолетового и инфракрасного диапазона. Применение апостериорных методов не позволяет исследовать динамику деформации образца.

Целью данной работы является исследование упругих волн, инициируемых воздействием светового излучения с большой плотностью потока на поверхность твердого тела, определение геометрических параметров источника упругих колебаний и построение принципов использования акустических методик для определения величин, характеризующих область взаимодействия лазерного излучения с веществом.

В качестве источника излучения, воздействующего на металлы и прозрачный диэлектрик, использовался рубиновый лазер ГОР-100М, работавший в режиме свободной генерации, что позволяло получать импульсы длительностью $\tau \sim 1{,}2$ мс с энергией E, варьировавшейся в пределах от 10 до 80 Дж. Излучение воздействующего лазера, пройдя через фокусирующую систему, направлялось на образец из полиметилметакрилата. В качестве фокусирующих использовались как однолинзовые, так и двухлинзовые системы, позволявшие строить на поверхности облучаемого образца изображение круглой диафрагмы.

К тыльной стороне облучаемого образца был прикреплен датчик давления, сигнал с которого подавался на вход второго осциллографа С8-13, запуск которого был синхронизирован с запуском осциллографа, регистрирующего временную форму лазерного импульса. Для регистрации давления в ударной волне, формирующейся в обрабатываемом материале, использовался датчик на основе пьезокерамики ЦТС-19 с устройством для компенсации отражений. Выбор типа датчика был связан со значительным (более чем в два раза) различием его пьезомодулей, вследствие чего преимущественно регистрировалась нормальная к рабочему срезу датчика компонента тензора напряжений σ_{zz}. Полоса пропускания датчика позволяла достоверно регистрировать акустические сигналы с частотами до 1 МГц.

Проведенные исследования показали, что возбуждение акустических волн при действии лазерного импульса со сложной временной формой на поверхность металлов и прозрачных диэлектриков может быть описано в рамках модели нагруженной области с изменяющимися размерами, излучающей волны в упругую среду. При этом временные и спектральные характеристики акустических колебаний, генерируемых при действии на образец каждого пичка лазерного импульса, однозначно связаны с диаметром и глубиной кратера, сформировавшегося на поверхности мишени в момент падения указанного пичка. Таким образом, зная временную форму действующего светового импульса и зарегистрировав возбужденный в зоне взаимодействия лазерного излучения с веществом акустический сигнал, можно, используя временную зависимость давления в акустической волне, созданного первым пичком, определить диаметр и глубину кратера.

Besides, relationship between acoustic signal spectrums and the diameter and depth of the crater formed in metals and transparent dielectrics exposed to solid-state laser radiation in the free and periodic pulse modes was established and studied.

Янучек Денис Николаевич, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, yanuchek.denis@gmail.com.

Научный руководитель – *Васильев Сергей Валерьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехнпки и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, s.vasilijev@grsu.by.

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

УДК 62-519

Е. О. ВОЙТЕХОВСКИЙ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ БИБЛИОТЕК CMSIS И SPL В РАЗРАБОТКЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ ЯДЕР CORTEX M4

Представлен анализ использования возможностей компонентов библиотеки STM32F40x DSP and Standard Peripherals Library, созданной компанией STMicroelectronics на языке Си для своих микроконтроллеров семейства STM32F4xx. На примере программы управления работой светодиода на плате NUCLEO, микроконтроллер STM32F401RET, рассматриваются особенности использования библиотек CMSIS и SPL. Управляющая программа разработана в среде Keil µVision5.

Одним из основных факторов, определяющих стоимость встраиваемых микропроцессорных систем на основе микроконтроллеров, является стоимость разработки управляющего программного обеспечения. Стоимость управляющих программ, в свою очередь, определяется скоростью разработки, надежностью, переносимостью, модифицируемостью и эффективностью их работы. Использование бесплатных «готовых решений» от производителя микроконтроллеров (МК) позволяет существенно сократить затраты на разработку управляющих программ. STM32F40x DSP and Standard Peripherals Library – библиотека, созданная компанией STMicroelectronics на языке Си для своих МК семейства STM32F4xx. Каждое семейство МК STM32 имеет свою библиотеку стандартной периферии. Представляемая библиотека состоит из двух взаимодополняющих компонентов: Cortex Microcontroller Software Interface Standard (CMSIS) и Standard Peripherals Library (SPL). Выбор инструментов CMSIS либо SPL и определяет способ разработки кода управляющих программ для МК.

Библиотека CMSIS – это независимый от производителя уровень абстракции над железом для серии ядер Cortex-M. CMSIS предоставляет простой интерфейс доступа к ядру, его периферии и операционной системе реального времени. С использованием библиотеки CMSIS можно разрабатывать код только с прямой записью в регистры. Каждый периферийный модуль, описанный в Reference Manual, соответствует *указателю на структуру* в библиотеке CMSIS. Поля структуры отвечают за регистры конкретного периферийного модуля. Отсюда следует формат обращения к полям структур: *укзатель_на_структуру -> поле = значение*.

В качестве значений полей структур могут быть использованы как адреса, так и маски. Таким образом, можно говорить о двух вариантах использования библиотеки CMSIS:

1) работа с полями структур путем присвоения им значений-адресов;

2) работа с полями структур путем присвоения им значений-битмасок.

Значения адресов определяются по соответствующей МК документации, а для работы с битмасками необходимо использовать *составной оператор присваивания*, который позволяет учесть значение по умолчанию регистров периферийного модуля.

Использование SPL повышает уровень абстракции, не нужно активно использовать документацию и думать о регистрах. Стандартный проект, использующий SPL, будет включать в себя: файлы CMSIS, файлы SPL и пользовательские файлы. Код программы, использующей SPL, содержит в себе вызовы библиотечных функций, позволяющих достаточно просто программировать работу периферийных модулей. При этом необходимо учесть тот факт, что библиотека разработана на основе принципа «отделения интерфейса от его реализации». В библиотеке каждому периферийному модулю МК соответствуют два типа файлов: файл *ppp.c* и файл *ppp.h*. В h-файле содержатся определение констант, перечислений, структур и прототипы функций для работы с периферийным модулем, а в с-файле – реализация функций.

Каждый периферийный модуль МК *соответствует структуре* в соответствующем библиотечном файле, поэтому для работы с полями структуры вначале необходимо создать ее экземпляр. Отсюда следует формат обращения к полям структур: *экземпляр_структуры.поле = значение*. После определения значений полей структуры вызывается функция конфигурирования или инициализации, устанавливающая выбранные значения.

Рассмотрим разработку управляющей программы для МК STM32F401RET, обеспечивающую переменное включение/выключение светодиода на плате NUCLEO, МК STM32F401RET с некоторым временным

интервалом. Непосредственное управление состоянием контактов МК осуществляется с помощью блока (порта) GPIO. Конкретно светодиод подключен к контакту RA5 модуля GPIOA.

Определим пошаговый алгоритм разработки кода управляющей программы.

1. Подключить заголовочный файл библиотеки stm32f4xx.h. Инструкция препроцессора подключает заголовочный файл stm32f4xx.h библиотеки CMSIS, он содержит структуры и определения для доступа к модулям периферии.

2. Включить тактирование модуля GPIOA. Включение тактирования соответствующего периферийного модуля осуществляется через модуль RCC путем подачи тактового сигнала напрямую с шины, на которой находится данный модуль.

3. Выполнить настройку (конфигурирование регистров) модуля GPIOA для работы светодиода:

3.1) минимальный набор настроек:

- определить режим работы необходимого контакта;
- запрограммировать скорость его работы;
- если вывод работает как выход, то установить его тип;
- запрограммировать вывод с подтягивающим резистором или без.

4. Разработать функцию задержки. Вследствие быстрой работы МК (8 МГц) смена состояний светодиода незаметна, и визуально будет казаться, что его состояние неизменно. Для попеременного включения/выключения светодиода вносится искусственная задержка в виде пустого цикла, который займет МК бесполезными вычислениями на некоторое время.

5. Записать инструкции установки состояния 5-го контакта регистра ODR порта GPIOA в «1» и «0» с учетом функции задержки в теле бесконечного цикла.

На рисунке 1 приведены различные варианты кода пользовательской функции port_config(), определенные выбранным способом решения.

Как видно из рисунка 1, код с использованием библиотеки CMSIS меньше по количеству инструкций и соответственно по скорости исполнения, чем код, использующий библиотеку SPL. К плюсам 2-го способа можно отнести следующее:

- *код стал проще*, как минимум, не нужно знать, что и в какие регистры надо прописать;
- *код стал понятнее*, т. к. использовались функции с вполне говорящими названиями, вместо того чтобы делать какие-то битовые операции и помещать результат непонятно куда;
- *написать такой код* начинающему программисту *гораздо проще и быстрее*, чем читать документацию, чтобы узнать, какие регистры и как нужно проинициализировать.

1-й способ Библиотека CMSIS

1.1

Работа с полями структур с использованием значений-адресов

```
RCC->AHB1ENR = 0x00000001 ;
GPIOA->MODER = 0x00000400;
GPIOA->OSPEEDR =0x00000000;
GPIOA->OTYPER =0x00000000;
```

1.2

Работа с полями структур с использованием значений-битмасок

```
RCC->AHB1ENR |= RCC_AHB1ENR_GPIOAEN ;
GPIOA->MODER |=GPIO_MODER_MODER5_0;
GPIOA->OSPEEDR |= GPIO_OSPEEDER_OSPEEDR0;
GPIOA->OTYPER &=~GPIO_OTYPER_OT_0;
GPIOA->PUPDR &=~GPIO_PUPDR_PUPDR0_0;
```

2-ой способ

Библиотека SPL

```
GPIO_InitTypeDef GPIOA_InitStructure;
RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOA,ENABLE);

GPIOA_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_OUT ;
GPIOA_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_5;
GPIOA_InitStructure.GPIO_OType= GPIO_OType_PP;
GPIOA_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_2MHz;
GPIOA_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL;
GPIO_Init(GPIOA,&GPIOA_InitStructure);
```

Рисунок 1 – Варианты реализации кода функции port_config()

Слабые стороны 2-го способа:

- *код стал медленнее* (как минимум требуется процессорное время на вызовы функций, передачу им параметров и возврат из них) и *больше*;
- *данный подход расслабляет разработчика* и не стимулирует его к изучению документации МК ввиду того, что не нужно уже знать, что и в какие регистры надо прописать.

На практике при разработке управляющих программ для устройств контрактной электроники используют комбинированный метод, основанный на использовании возможностей SPL, но предусматривающий возможность написания отдельных, «критичных участков», кода (объем, скорость исполнения) с использованием библиотеки CMSIS.

Список литературы

1. Reference_manual [Electronic resourse]. – Mode of access: https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/5d/b1/ef/b2/a1/66/40/80/DM00096844.pdf/files/DM00096844.pdf/jcr:content/translations/en.DM00096844.pdf.

2. Datasheet [Electronic resourse]. – Mode of access: https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f401re.pdf.

3. Гриффитс, Дэвид. Изучаем программирование на С / Дэвид Гриффитс, Дон Гриффитс ; пер. с англ. – М. : ЭКСМО, 2013. – 624 с.

The material presents an analysis of the use of the STM32F40x DSP and Standard Peripherals Library components capabilities, created by STMicroelectronics in C for their microcontrollers of the STM32F4xx family. Using the example of the LED control program on the NUCLEO board STM32F401RET microcontroller, considers the features of the use of libraries CMSIS and SPL. The control program is developed in the environment of Keil µVision5.

Войтеховский Егор Олегович, студент 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, voiteh322@gmail.com.

Научный руководитель – *Себровская Галина Петровна*, старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, galina_sebrovskaya@mail.ru.

УДК 53.04

О. В. ГРИГУТЬ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В СИСТЕМЕ MATLAB-SIMULINK

Смоделирована модель измерения сопротивления обмоток силового трансформатора в системе динамического моделирования MatLab-Simulink.

В процессе эксплуатации трансформаторы подвергаются разрушительному влиянию вибрации, воздействию окружающей среды, перегрузкам или некачественному обслуживанию. Измерение сопротивления обмоток позволяет удостовериться в исправности обмоточных проводов, паяных соединений обмоток, а также контактных соединений отводов, переключающих устройств.

Согласно СТП 09110.20.366-08 данный вид испытания производится:

- П – при вводе в эксплуатацию нового электрооборудования и электрооборудования после восстановительного или капитального ремонта и реконструкции;
- К − при капитальном ремонте;
- М − между ремонтами.

Измерение проводится на всех ответвлениях, если в паспорте трансформатора нет других указаний [2].

Допускается два метода измерения сопротивления постоянному току:

- метод падения напряжения;
- мостовой метод при токе, не превышающем 20 % номинального тока обмотки трансформатора.

Метод падения напряжения предпочтителен при испытании трансформаторов III габарита и более, а также всех трансформаторов с регулированием под нагрузкой (РПН).

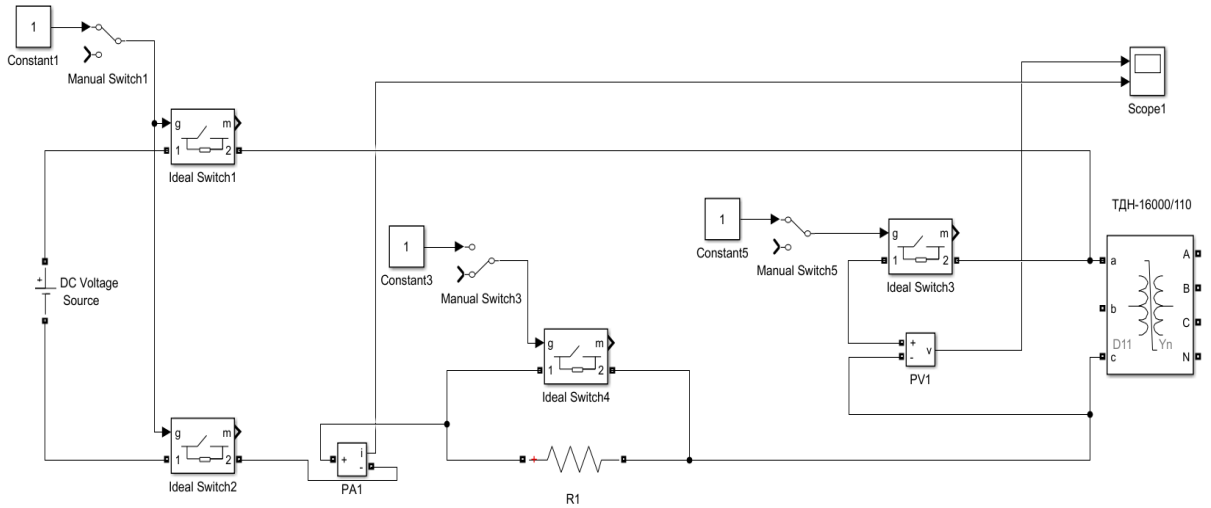
Мостовой метод рекомендуется применять при испытании сухих трансформаторов и масляных трансформаторов I и II габаритов [1].

Для овладения студентами методикой измерения сопротивления методом падения напряжения, была создана модель измерения сопротивления обмоток силового трансформатора и разработана на базе данной модели лабораторная работа в системе динамического моделирования MatLab-Simulink.

В ходе лабораторной работы студентам предлагается:

- ознакомиться с методикой измерения и видами переключающих устройств;
- рассчитать схему замещения трансформатора по каталожным данным;
- ознакомиться с обозначением и типами РПН;
- выполнить измерения сопротивления обмоток стандартной модели нелинейного трансформатора из библиотеки Simpowersystems;
- составить отчет и сделать заключения о (не) пригодности трансформатора.

Модель измерения сопротивления для стандартного блока нелинейного трансформатора из библиотеки Simpowersystems представлена ниже.



ТДН-16000/110 – блок трансформатора, параметры которого рассчитываются исходя из паспортных данных, PA1 – блок амперметра, PV1 – блок вольтметра, Scope – виртуальный осциллограф для снятия графиков U(t) и I(t)

Рисунок 1 – Схема модели измерения

Моделирование проводят для обмоток высокого напряжения A-N, B-N, C-N, низкого – a-b, b-c, c-a. В результате получают графики насыщения обмотки I(t) и падения напряжения на источнике питания U(t).

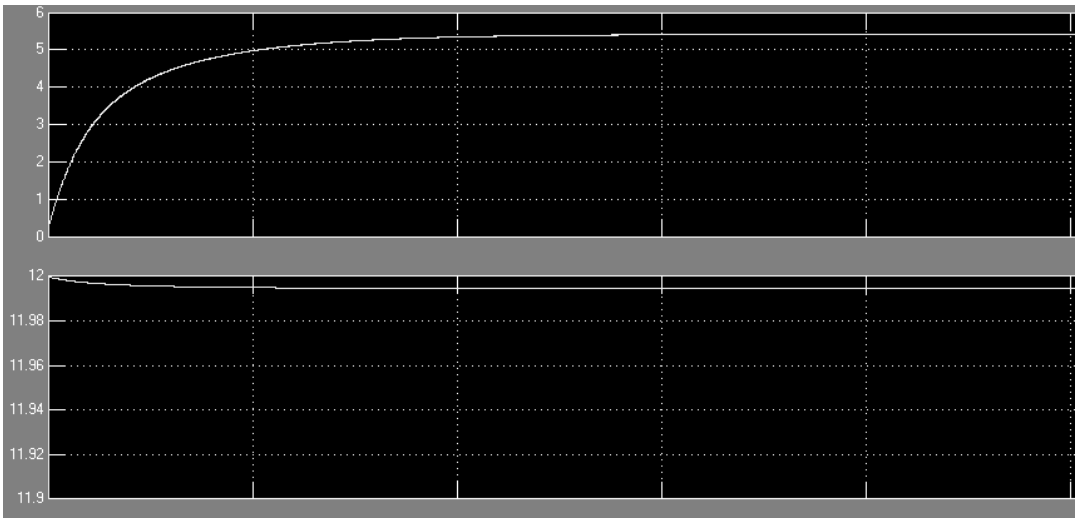


Рисунок 2 – Результаты измерений обмотки A-N (верхний график – график насыщения обмотки I(t); нижний – падения напряжения на источники питания U(t))

По полученным данным рассчитываются сопротивления обмоток постоянному току, значения сравнивают между собой и паспортными значениями трансформатора.

Измеряемая величина	AN	BN	CN	Паспортные данные	Разница, %
U, В	11,994	11,994	11,993		
I, А	5,414	5,4	5,414		
r, Ом	2,21537	2,22	2,21518	2,215	0,2

Проведение данной лабораторной работы в системе MatLab-Simulink позволяет моделировать процессы измерения без дорогостоящего оборудования и обеспечить наглядность выполнения работы.

Использование динамической системы моделирования MatLab-Simulink позволяет проводить лабораторные работы, которые невозможно выполнить на действующем оборудовании, ввиду вопросов связанных с электробезопасностью студентов или высокой стоимостью необходимого оборудования.

Список литературы

1. ГОСТ 3484.1-88 (СТ СЭВ 1070-78) : Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний (с Изменением № 1)
2. СТП 09110.20.366-08 : Нормы и объем испытаний электрооборудования Белорусской энергосистемы.
3. Волчок, В. А. Модель виртуальной лаборатории системотехники на базе MATLAB и SIMULINK / В. А. Волчок, А. Ю. Даукша // Современные информационные технологии в системе научного и учебного эксперимента: опыт, проблемы, перспективы : материалы III междунар. науч.-метод. конф. (Гродно, 14–15 мая 2015 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол. : В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2015. – С. 65–68.

This work is devoted to modeling the processes of measuring the parameters of a transformer, which allows you to verify the health of a transformer.

Григуть Олег Владимирович, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, oleg.pochta93@gmail.com.

Научный руководитель – *Комар Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, зав. кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, v.komar@grsu.by.

УДК 004.021

ДИАС Л. РОСЕЛИНА А., Д. А. КОТОВ

РАСЧЁТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПЛЁНКИ НА ПЛОСКОЙ ПОДЛОЖКЕ, ПОЛУЧАЕМОЙ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Оптимизация равномерности тонких пленок является важным аспектом технологии формирования оптических покрытий. Предложена расчетная модель для улучшения равномерности нанесения тонкой пленки на плоских подложках при магнетронном распылении. Модель позволяет сделать оценку распределения по толщине формируемого покрытия в зависимости от разрядных и геометрических параметров магнетронного распылительного устройства.

Широко используемый метод магнетронного распыления имеет неоднородную область эрозии мишени, и соответственно распределение скорости эрозии мишени является основным фактором, влияющим на распределение толщины пленок, нанесенных при определенных параметрах распыления. Равномерность толщины пленки зависит от источника магнетронного распыления, геометрии мишени, расстояния между мишенью и подложкой [1]. Для моделирования толщины распределения по методу распыления, следует учитывать несколько факторов, таких как угловое распределение распыленных атомов ($P(\theta_T)$). Угловое распределение излучения является функцией угла падения бомбардируемых ионов [2]. Распределение косинуса описывает характеристики излучения источника распыления, которое ведет себя аналогично законам Кнудсена. Также два упрощающих предположения были сделаны для расчета распределения толщины тонкой пленки. Во-первых, необходимо пренебречь эффектами газовой дисперсии, то есть предполагается, что частица проходит линейный путь от точки выброса до точки нанесения на подложку. Во-вторых, после осаждения материала на подложку не происходит диффузионного движения, то есть частицы останавливаются и становятся частью поверхности пленки. Также эффекты эрозии мишени ($F(x)$) могут быть добавлены к модели путем рассмотрения распределения источника, которое получается путем подгонки кривой к измерению глубины мишени. В нашем случае мы корректируем распределение потока ионов с помощью функции (3) на части. Выражение для распределения толщины в этом случае становится [1; 3],

$$T(x_1, y_1) = \iint \frac{F(x)P(\theta_t)\cos(\theta_s)}{R^2} dx dS; \quad (1)$$

где R – расстояние между точечным источником на мишени и точкой P на подложке; θ_s – угол между вектором относительного положения и нормальным вектором подложки в конкретной точке; θ_t – углом между R и единичным нормальным вектором n_t в точке P; dS – элементый интегрирования; ($P(\theta_T)$ – угловое распределение распыленных атомов, которое имеет вид [4]:

$$P(\theta_T) = \cos\theta_T(1 + B\cos^2\theta_T); \quad (2)$$

где B – коэффициент, от которого зависит форма распределения распыленных частиц.

Распределение косинусов соответствует $B = 0$ в (2). $B > 0$ и $B < 0$ соответствуют угловым распределениям надкосинусом и подкосинусом, соответственно. Профиль зоны эрозии имеет вид:

$$F(x) = \begin{cases} A_1 e^{-x/t_1} + C_1 & \text{для } |x| \le R_1 \\ ax^2 + bx + c & \text{для } R_1 < |x| < R_2 \\ B_1 e^{-x/r_1} + D_1 & \text{для } |x| \le R_2 \end{cases} \quad (3)$$

R – расстояние между точечным источником на мишени и точкой P на подложке; θ_s – угол между вектором относительного положения и нормальным вектором подложки в конкретной точке; θ_t – угол между R и единичным нормальным вектором n_t в точке M_0; dS – поверхностный интеграл; A_1, B_1 – начальные значение функции; t_1, r_1 – коэффициент пропорциональности; C_1, D_2 – коэффициент перемены; a, b, c – параметры квадратичной функции, R_1, R_2 – радиусы, в которых функции объединены. Результаты расчета приведены на рисунках 1 и 2. На рисунке 1 расчет был произведен с учетом расстояния 5 мм между подложкой и мишенью.

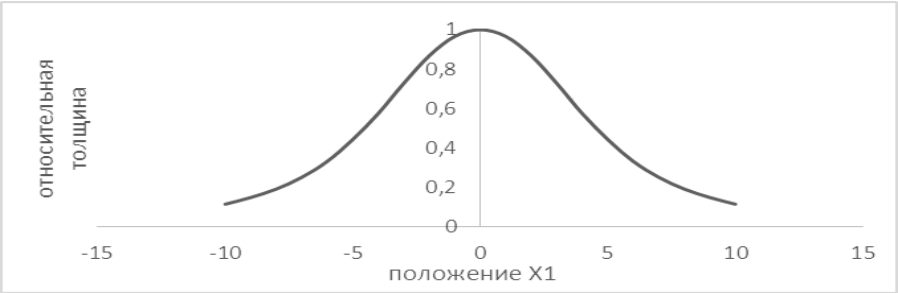


Рисунок 1 – Относительное распределение толщины плёнки в положениях *x*1 на подложке. Расстояние H = 5 мм

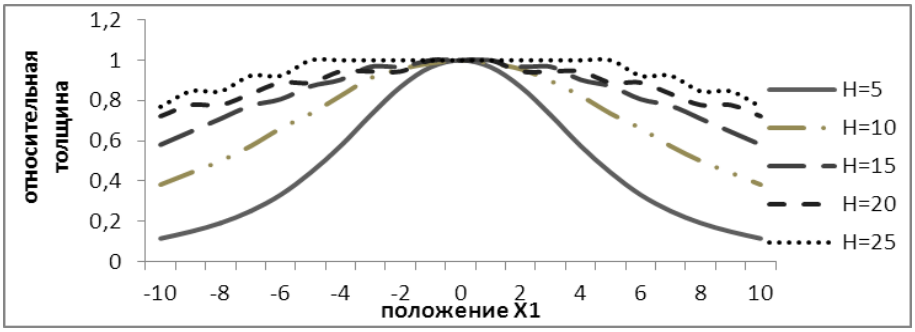


Рисунок 2 – Относительное распределение толщины плёнки в положениях *x*1 на подложке на разных расстояниях между мишенью и подложкой

Как видно на рисунке 2, когда расстояние между подложкой и мишенью (H) больше, распределение пленок является более равномерным. При H = 5 мм, так как положение от центра мишени увеличивается, относительная толщина пленки резко падает; однако для H = 25 мм разница в относительной толщине пленки уменьшается. Следовательно, можно сделать вывод, что с увеличением расстояния от мишени до подложки H распределение толщины пленки в поперечном направлении становится более равномерным.

Была разработана математическая модель для расчета распределения толщины в круглых плоских мишенях с учетом сегментированного профиля эрозии. Теоретические аспекты процедуры расчета были объяснены выше. Модель была применена с учетом расстояния между мишенью и подложкой. Результаты показывают, что модель является полезным инструментом для определения не интуитивных требований, которые легче обнаружить с помощью вычислительного анализа (т. е. оптимального значения H).

Список литературы

1. Simulation and Optimization of Film Thickness Uniformity in Physical Vapor Deposition / B. Wang [et al.] // Coatings. – 2018. – Vol. 8, № 9. – P. 325.

2. Fundamental processes in sputtering of atoms and molecules / P. Sigmund [et al.] // Dan. Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Medd. – 1993. – Vol. 43, № 1.

3. Broadway, D. M. Achieving desired thickness gradients on flat and curved substrates / D. M. Broadway, Y. Y. Platonov, L. A. Gomez // X-Ray Optics, Instruments, and Missions II / International Society for Optics and Photonics, 1999. – Vol. 3766. – P. 262–275.

4. Yamamura, Y. Contribution of anisotropic velocity distribution of recoil atoms to sputtering yields and angular distributions of sputtered atoms / Y. Yamamura // Radiation Effects. – 1981. – Vol. 55, № 1–2. – P. 49–55.

Optimizing the uniformity of thin films is an important aspect for optical coatings. This article proposed a mathematical model to improve the uniformity of a thin film in flat substrates during magnetron sputtering, which includes the characteristic aspects of radiation sources of the material, the distribution of the film thickness and the geometric effects of device configurations.

Диас Лусена Роселина А., аспирант кафедры микроэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, Diazr89@gmail.com.

Научный руководитель – *Котов Дмитрий Анатольевич*, кандидат технический наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, kotov@bsuir.by.

УДК 537.62

А. О. КОЗЛОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОРАЗМЕРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Выполнено моделирование одноразмерных периодических структур с целью определения эффективности возбуждения поверхностных плазмонных поляритонов в функции периода и геометрических параметров структуры.

Современный этап развития магнитооптики тонких плёнок можно охарактеризовать возникновением и развитием новых прикладных направлений. Интегральная магнитооптика обеспечивает передачу и обработку оптических сигналов, которые распространяются в тонких плёнках прозрачных магнетиков, в которых сформированы топологические элементы и структуры при помощи современных методов тонкоплёночной технологии и литографии [1].

Метод конечных разностей во временной области (англ. Finite Difference Time Domain, FDTD) – один из наиболее популярных методов численной электродинамики, который основан на дискретизации уравнений Максвелла, записанных в дифференциальной форме. В уравнениях Максвелла изменение электрического поля *E* (частная производная) зависит от распределения в пространстве магнитного поля *H* (ротор). Аналогично, изменение поля *H* зависит от распределения в пространстве поля *E* [2] (рисунок 1*а*).

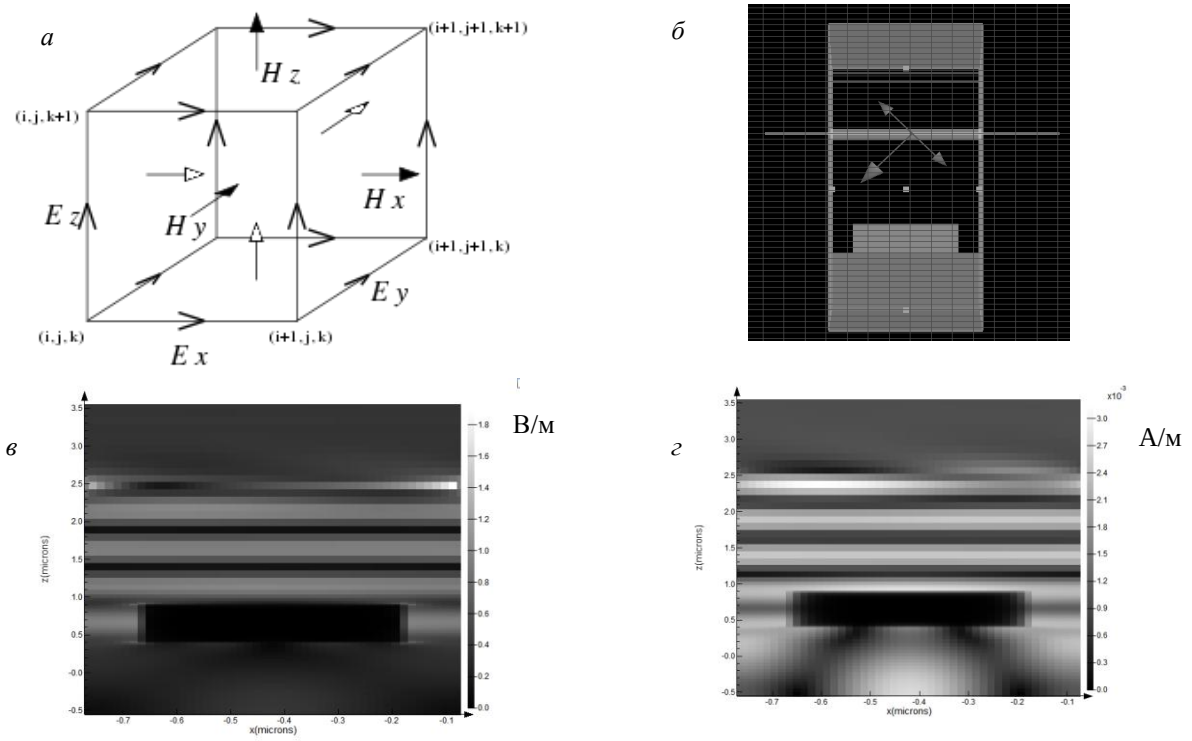


Рисунок 1 – Модель расчёта методом конечных разностей (*а*), геометрия моделируемого объекта (*б*), рассчитанные изменения электрического (*в*) и магнитного (*г*) полей для объекта

Конечно-разностные уравнения позволяют определить поля E и H на данном временном шаге на основании известных значений полей на предыдущем. На рисунке 1 указаны поля в ячейке сетки FDTD. Сетки для электрического (E) и магнитного (H) полей смещены по отношению друг к другу на половину шага дискретизации времени и по каждой из пространственных переменных (x, y, z).

В данном случае выполнено моделирование одноразмерных периодических структур с целью определения эффективности возбуждения поверхностных плазмонных поляритонов в функции периода и геометрических параметров структуры. В качестве двухслойной структуры использована решётка золота на плёнке феррит-граната. Моделирование выполнено с использованием программного обеспечения Lumerical FDTD.

Внешний вид моделируемого объекта с указанным направлением распространения электромагнитного излучения, мониторами представлен на рисунке 1*б*. После моделирования можно наглядно увидеть изменение интенсивности электрического поля (вольт/метр) в зависимости от координат на плоскости (рисунок 1*в*). На рисунке 1*г* наглядно показано изменение магнитного поля (ампер/метр) в зависимости от координат на плоскости.

Следующий этап – это проведение эксперимента, в ходе которого можно сравнить рассчитанные путём моделирования данные с экспериментальными.

Анализируя результаты моделирования, можно отметить, что данные материалы лучше всего пропускают именно магнитную составляющую электромагнитного поля. Плёнка феррит-граната практически по всем координатам пропускает электрическую и магнитную составляющие электромагнитного поля, за исключением некоторых областей. Решётка золота же в данном случае реагирует на электромагнитное поле только по краям, не пропуская его в центр. В центральной же части явно наблюдается эффект отражения. На границе двух материалов, особенно по краям, наблюдается усиление интенсивности электрического поля.

Список литературы

1. Звездин, А. К. Магнитооптика тонких плёнок / А. К. Звездин, В. А. Котов. – М. : Наука, 1988. – 192 с.

2. Метод конечных разностей во временной области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.-org/wiki/Метод_конечных_разностей_во_временной_области.

In this paper, one-dimensional periodic structures are simulated to determine the efficiency of the excitation of surface plasmon polaritons as a function of the period and the geometric parameters of the structure.

Козлов Артём Олегович, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, dereas111@gmail.com.

Научный руководитель – *Стрекаль Наталья Дмитриевна*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, nat@grsu.by.

УДК 53.043

А. А. КУРАПЦОВА

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРУ КРЕМНИЙ/ОКСИД ЦИНКА

Приводятся результаты моделирования влияния солнечного света на электронно-дырочные процессы, проходящие в гетероструктуре кремний/оксид цинка. Моделирование проводилось в среде Comsol Multiphysics. Исследовалось влияние длины волны солнечного излучения на выходной фототок и скорость генерации носителей заряда гетероструктуры p-Si/n-ZnO.

Широкозонные полупроводниковые оксиды металлов в настоящее время используются во многих сферах, благодаря своим уникальным электрическим и оптическим свойствам. Оксид цинка является прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 3,4 эВ. Оксид цинка ZnO находит широкое применение в различных областях фотовольтаики: солнечных элементах, сенсорах молекулярного состава газа, фотокаталитическом разложении воды. Также оксид цинка используется для очистки воды и воздуха от органических загрязнителей [1]. Целью данной работы является исследование электрических свойств гетероструктуры кремний/оксид цинка (p-Si/n-ZnO) в условиях солнечного излучения.

Моделирование электронно-дырочных процессов проводилось с помощью пакета Comsol, в котором используется двумерная диффузионно-дрейфовая модель для моделирования токопереноса в полупроводниках и модель электромагнитных волн, основанная на уравнениях Максвелла.

Гетероструктура, изображенная на рисунке 1, обладает следующими параметрами: длина для кремния и оксида цинка 4 мкм и 1 мкм соответственно, высота 1 мкм, глубина структуры 1 мкм.

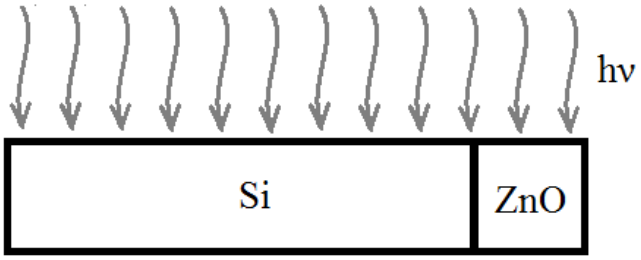


Рисунок 1 – Конфигурация исследуемой структуры

Использованные параметры для кремния и оксида цинка соответственно: относительная диэлектрическая постоянная 11,7 и 8,5; подвижность электронов 1450 см^2/(В·с) и 200 см^2/(В·с); подвижность дырок 500 см^2/(В·с) и 50 см^2/(В·с); ширина запрещенной зоны 1,12 эВ и 3,4 эВ; сродство к электрону 4,05 эВ и 4,3 эВ; степень легирования $N_d = 10^{18}$ см$^{-3}$ и $N_a = 10^{16}$ см$^{-3}$; время жизни электронов и дырок 500 мкс в кремнии и 0,97 нс в оксиде цинка. Температура 300 К. Действительная часть коэффициента преломления для оксида цинка $n_{ZnO} = 2$. Действительная часть коэффициента преломления для кремния n_{Si}, а также мнимая часть коэффициента преломления k_{ZnO} и k_{Si} заданы таблично в зависимости от длины волны [3; 4].

При облучении излучением мощностью $5 \cdot 10^{-9}$ Вт (плотность излучения 1 кВт/м^2) получена зависимость фототока от длины волны излучения (рисунок 2).

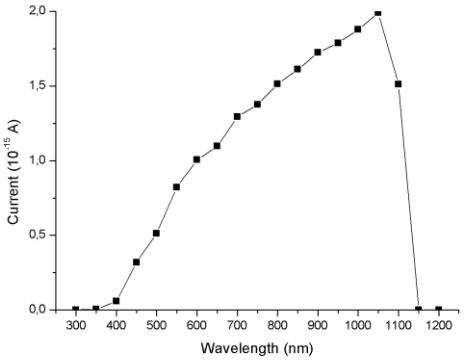


Рисунок 2 – Зависимость тока короткого замыкания от длины волны излучения

Ширине запрещенной зоны кремния соответствует энергия излучения с длиной волны 1108 нм, и для оксида цинка 368 нм. Как видно из рисунка 1, ощутимый вклад в ток дают носители заряда, сгенерированные в кремнии, при облучении светом с длиной волны меньше 1050 нм. Генерация носителей заряда в оксиде цинка слабо влияет на ток, в частности, по причине малой площади поглощения.

Распределение поверхностной концентрации сгенерированных электронов для разных длин волн представлено на рисунке 3.

Под действием электрического поля в области пространственного заряда электроны, сгенерированные в кремнии, дрейфуют в область запрещенной зоны оксида цинка, а дырки, сгенерированные в оксиде цинка, – в область запрещенной зоны кремния. Благодаря высоким потенциальным барьерам гетероперехода в оксиде цинка накапливается избыточная концентрация электронов.

Таким образом, возможно протекание фотокаталитических реакций восстановления при облучении гетероструктуры p-Si/n-ZnO светом с длиной волны находящейся в диапазоне солнечного излучения [4]. На фотокаталитическую активность структуры в основном оказывает влияние только генерация зарядоов кремнии.

Полученные результаты необходимы для исследования электронных процессов, протекающих на поверхности оксида цинка, которые обуславливают его фотокаталитические свойства.

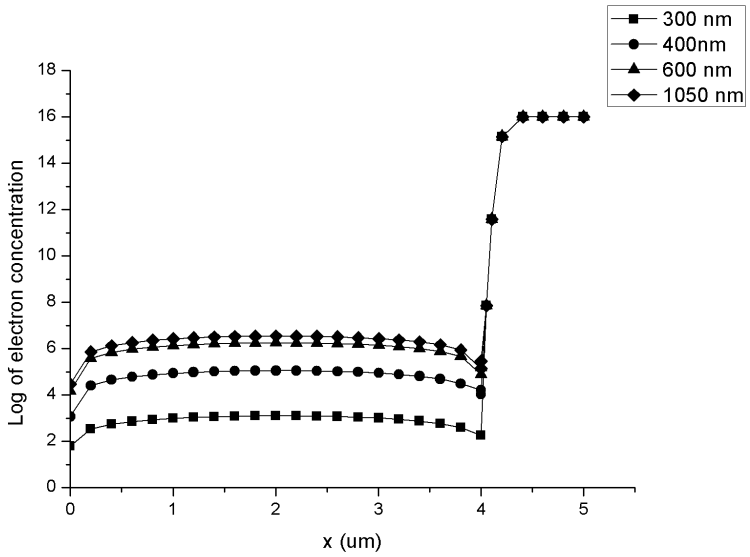


Рисунок 3 – Логарифм концентрации электронов на поверхности структуры для разных длин волн

Список литературы

1. Повышение активности фотокатализаторов на основе ZnO, обработанных в плазме высокочастотного разряда / Н. А. Савастенко [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т. 83, № 5. – С. 715–723.

2. Green, M. A. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300K including temperature coefficients / M. A. Green // Sol. Energ. Mat. Sol. Cells 92, 2008. – P. 1305–1310.

3. Determination of optical parameters of zinc oxide nanofibre deposited by electrospinning technique / H. S. Bolarinwa [et al.] // Journal of Taibah University for Science. – November 2017. – Vol. 11, iss. 6. – P. 1245–1258.

4. Спектральные распределения яркости излучения при спектрометрировании Земли из космоса / Б. И. Беляев [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2012. – Т. 79, № 4. – С. 669–675.

In this paper the results of modeling the effect of sunlight on electron-hole processes occurring in a silicon / zinc oxide heterostructure are present. The simulation was carried out in the Comsol Multiphysics environment. The effect of the solar radiation wavelength on the output photocurrent and the rate of charge carrier generation of the p-Si / n-ZnO heterostructure was studied.

Курапцова Анна Андреевна, аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, anku21qwerty@gmail.com.

Научный руководитель – *Данилюк Александр Леонидоович*, кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, danilyuk@nano-center.org.

УДК 535.34

Н. В. ЛАХМИЦКИЙ

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРОВ ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ

Приведены результаты анализа электронных спектров поглощения смесей пегилированного индотрикарбоцианинового красителя и исходной формы красителя без полиэтиленгликолей в растворах малополярного о-дихлорбензола. Разработана методика определения концентрации примеси исходного красителя в образцах пегилированного индотрикарбоцианинового красителя.

Задача выделения спектров поглощения отдельных компонент, как правило, разбивается на два этапа. На первом этапе доступными средствами селективного анализа стремятся установить спектральные свойства

одной или нескольких компонент [1]. На втором этапе интерполяционными методами определяют спектры оставшихся центров поглощения. Второй этап обычно автоматизируется с помощью программных продуктов на основе современных языков.

Данная работа посвящена автоматизации разделения спектров поглощения смесей двух индотрикарбоцианиновых красителей с одинаковым хромофором, отличающихся наличием объемных заместителей – полиэтиленгликолей. Подобная система выбрана по причине своей относительной простоты для отработки алгоритмических подходов. Представленные красители разработаны в рамках проекта по созданию фотосенсибилизатора для фотодинамической терапии онкологических заболеваний. Краситель с шифром ПК220 является структурной модификацией красителя с шифром ПК154 и отличается более высокой растворимостью в воде и биосовместимостью. Модификация заключалась в привитие к концевым группам красителя двух цепочек полиэтиленгликолей (ПЭГ) с молекулярной массой 300 Да. Дополнительной мотивацией к изучению подобной системы служила необходимость в контроле присутствия ПЭГ в структуре молекул после проведения одной из последних стадий синтеза ПК220, т. е. определение наличия примеси ПК154 в полученной партии ПК220.

Согласно данным работы [2] в малополярных органических растворителях в спектрально-люминесцентных свойствах указанных красителей обнаруживаются значительные различия, которые определяются состоянием равновесия ионных форм молекул красителей. В частности, было установлено, что раствор молекулы ПК154 в малополярных растворителях (хлороформ, о-дихлорбензол) находится в виде равновесной смеси свободных ионов и ионных пар, в то время как наличие полиэтиленгликолей в структуре ПК220 приводит к смещению равновесия в сторону увеличения доли ионных пар. Также было показано, что в полярных и малополярных органических растворителях отсутствует агрегация указанных красителей. Можно предполагать, что в бинарной смеси красителей в малополярных растворах отсутствуют специфические бимолекулярные взаимодействия, а спектр поглощения смеси в идеальных условиях может быть представлен как сумма спектров поглощения отдельных красителей.

Точное определение концентрации красителей в смеси осложняется присутствием дополнительных примесей: продукты реакции предыдущих стадий синтеза, несвязанный ПЭГ. Также остается открытым вопрос, как влияет присутствие в растворе ПК220 на состояние равновесия ионных форм ПК154. В связи с этим определение концентрации красителей в смеси разумно выполнить с помощью интерполяционных методов.

В основе метода лежит аппроксимация спектра поглощения в малополярном о-дихлорбензоле смеси ПК220 и ПК154 при микромолярных концентрациях суммой индивидуальных спектров поглощения данных красителей в этом же растворителе.

Молярный коэффициент и форма спектра поглощения «чистого» ПК220 в о-дихлорбензоле постоянны при изменении концентрации в диапазоне $5\cdot10^{-7}$–$5\cdot10^{-6}$ М (рисунок 1*а*), благодаря чему могут считаться константами при определении примеси ПК154 в смеси с ПК220. Перераспределение молекул ПК154 между различными ионными формами при изменении концентрации влечет за собой заметные деформации спектра поглощения (рисунок 1*б*). В связи с этим спектр поглощения наиболее подходящего для расчета раствора ПК154 в о-дихлорбензоле выбирался из серии спектров поглощения ПК154 при различных концентрациях в цикле последовательных итераций путем минимизации среднеквадратичного отклонения экспериментального спектра образца и суммы индивидуальных спектров ПК154 и ПК220 с варьируемыми коэффициентами, которые и определяют молярную концентрацию каждого красителя в растворе. Точность выполненной аппроксимации контролировалась с помощью критерия χ^2. Выполнение расчетов автоматизировано в виде консольного приложения с помощью среды разработки Visual Studio 2017.

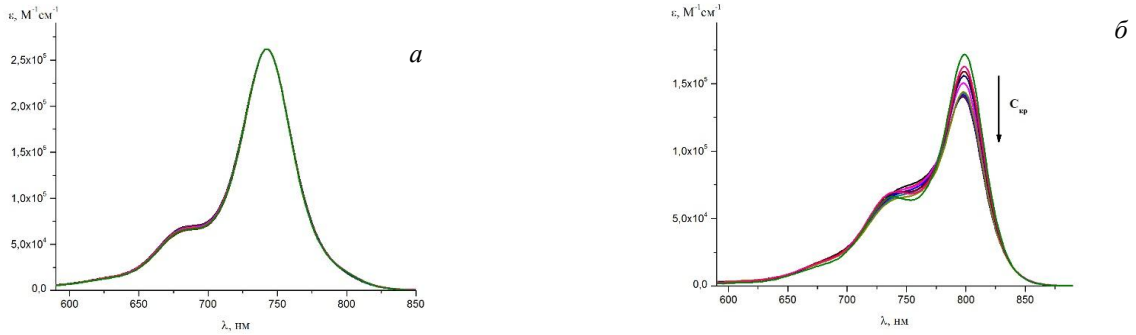


Рисунок 1 – Молярный коэффициент поглощения растворов ПК220 (*а*) и ПК154 (*б*) в о-дихлорбензоле при изменении концентрации в диапазоне $5\cdot10^{-7}$–$8\cdot10^{-6}$ М

Данная методика была опробована на образцах с известными по приготовлению концентрациями ПК220 и ПК154. В дальнейшем планируется применение данной методики в экспериментах по определению условий длительного хранения субстанции фотосенсибилизатора на основе ПК220.

Список литературы

1. Тарасов, Д. С. Анализ спектральных свойств многокомпонентных растворов нового индотрикарбоцианинового красителя / Д. С. Тарасов, К. Н. Каплевский, М. П. Самцов, Е. С. Воропай // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2015. – № 2. – С. 9–12.

2. Тарасов, Д. С. Влияние объемных заместителей на способность генерации синглетного кислорода индотрикарбоцианиновыми красителями / Д. С. Тарасов, М. П. Самцов, А. А. Луговский, А. С. Сташевский // Материалы и структуры современной электроники : материалы VIII междунар. науч. конф., Минск, 10–12 окт. 2018 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2018. – С. 341–345.

The results of the study of solutions in low-polar o-dichlorobenzene of binary mixtures of pegylated indotricarbocyanine dye and the original form of the dye without polyethylene glycols were presented. A method for determining the impurity concentration of the initial dye in samples of pegylated indotricarbocyanine dye has been developed.

Лахмицкий Никита Васильевич, студент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, nikita7828@gmail.com.

Научные руководители – *Тарасов Дмитрий Сергеевич*, научный сотрудник лаборатории спектроскопии Института прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, dmitrij-tarasov@list.ru.

Самцов Михаил Петрович, доктор физико-математических наук, доцент, Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, samtsov@bsu.by.

УДК 539.1

НГУЕН КУАНГ ШАН

СТАЦИОНАРНЫЕ СОСТОЯНИЯ МОДЕЛИ РАБИ

Рассмотрен эффективный метод описания состояний модели Раби, основанный на операторном методе (ОМ) решения уравнения Шредингера. Решена стационарная задача модели Раби в рамках ОМ, проведен анализ диапазона применимости полученных решений и сравнение этогот результата с приближением вращающейся волны (ПВВ).

Двухуровневая система (ДУС) является одной из важнейших моделей в современной квантовой оптике [1], которая используется в качестве основы для описания взаимодействия между резонансными полями и веществом. Это система, в которой рассматривается взаимодействие монохроматического электромагнитного поля с частотой, близкой к одной из частот перехода между двумя энергетическими состояниями атома. Тогда переходами между другими энергетическими уровнями можно пренебречь, и только два упомянутых состояния играют существенную роль в этом процессе. Одно из состояний описывает стационарное основное состояние атома, а другое состояние соответствует возбужденному состоянию атома. Эта модель обычно используется для многих теоретических исследований в рамках представления реального атома как системы, обладающей только двумя собственными состояниями значениями энергии. Эта простейшая модель была названа моделью Раби (МР).

Сама МР описывает систему, состоящую из ДУС, взаимодействующую с одномодовым квантовым полем в рамках дипольного приближения $e^{ik\vec{r}} \approx 1$. Ее гамильтониан может быть введен в следующем виде [2]:

$$\hat{H} = \frac{1}{2}\Delta\hat{\sigma}_3 + \hat{a}^+\hat{a} + f(\hat{\sigma}_+ + \hat{\sigma}_-)(\hat{a} + \hat{a}^+), \tag{1}$$

где используется система единиц $\hbar = c = 1$, а энергия фотона выбирается в качестве энергетического масштаба, так, что $\omega = 1$; Δ представляет собой разницу между атомными энергетическими уровнями в этих же единицах, резонансный случай соответствует условию $\Delta = 1$; f – безразмерная константа связи ДУС-поля; $\hat{a}^+$, $\hat{a}$ – операторы рождения и уничтожения фотонов соответственно; $\hat{\sigma}_3$, $\hat{\sigma}_\pm$ – матрицы Паули.

Система, описываемая гамильтонианом (1), имеет дополнительный интеграл движения, который можно записать в виде:

$$\hat{P} = \hat{\sigma}_3 \hat{S} = \hat{\sigma}_3 e^{i\pi \hat{a}^+ \hat{a}}, \quad \left[\hat{H}, \hat{P}\right] = 0. \tag{2}$$

Собственные векторы и собственные значения МР зависят от двух квантовых чисел и удовлетворяют следующей системе уравнений:

$$\hat{H}\left|\psi_{np}\right\rangle = E_{np}\left|\psi_{np}\right\rangle, \quad \hat{P}\left|\psi_{np}\right\rangle = p\left|\psi_{np}\right\rangle, \tag{3}$$

где $p = \pm 1$ определяет четность, а $n = 0, 1, 2, \ldots$ – квантовое число для возбужденных состояний поля.

Приближение вращающейся волны (ПВВ) приводит к модели Джейнса-Каммингса (МДК). В рамках ПВВ так называемые антивращающие слагаемые $\hat{\sigma}_+ \hat{a}^+$ и $\hat{\sigma}_- \hat{a}$ опущены в точном гамильтониане (1). В результате можно вывести выражение для собственных значений энергии МДК в виде:

$$E_n^{(\pm)} = n + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\Delta - 1)^2 + 4f^2(n+1)}. \tag{4}$$

Во многих работах было показано, что для количественного анализа систем с параметрами f и ε ($\varepsilon \equiv \sqrt{\langle \bar{n} \rangle}$ выражается через среднее число фотонов), изменяющимися в достаточно широких пределах, нужно выйти за рамки ПВВ и использовать исходный МР (1) вместо МДК. ОМ позволяет найти точные численные и равномерно-пригодные аналитические решения для собственных векторов и собственных значений системы во всем диапазоне изменения этих параметров. Введем новые операторы рождения и уничтожения с помощью параметра u, который будет определен позже.

$$\hat{b} = \hat{a} + u, \qquad \hat{b}^+ = \hat{a}^+ + u. \tag{5}$$

Гамильтониан МР (1) преобразуется к виду:

$$\hat{H}_{OM} = \frac{1}{2}\Delta\hat{\sigma}_3 + \hat{b}^+\hat{b} + u^2 - 2uf\hat{\sigma}_1 + (-u + f\hat{\sigma}_1)(\hat{b} + \hat{b}^+). \tag{6}$$

Из-за смешивания основного и возбужденного состояний ДУС разложим собственные векторы по полному набору в форме:

$$\left|\psi_{np}\right\rangle = \sum_{k=0}^{\infty}\sum_{s=\pm} C_{ks}^{np}\left|k, u\right\rangle \chi_s, \tag{7}$$

где C_{ks}^{np} – искомые коэффициенты разложения; верхняя группа индексов определяет соответствующие стационарные состояний, нижняя группа индексов – индексы суммирования, χ_s – возбужденное и основное состояния ДУС.

Подставив (7) в уравнение Шредингера (3) с гамильтонианом (6) и спроецировав полученное выражение на состояние $\left|k, u\right\rangle \chi_s$, можно получить

$$\begin{gathered}\left(k + u^2 - 2ufp - E_{np}\right)C_{kp}^{np} + \left(-u + fp\right)\left(\sqrt{k+1}C_{k+1,p}^{np} + \sqrt{k}C_{k-1,p}^{np}\right) + \\ + \frac{1}{2}p\Delta\sum_{m=0}^{\infty} S_{km}(u)C_{mp}^{np} = 0,\end{gathered} \tag{8}$$

где функция $S_{km}(u)$ определяется следующим образом:

$$\begin{gathered}S_{km}(u) = S_{mk}(u), \\ S_{km}(u) = (-1)^m e^{-2u^2}\sqrt{\frac{m!}{k!}}(2u)^{k-m} L_m^{k-m}\left(4u^2\right), \qquad k \geq m,\end{gathered} \tag{9}$$

$L_n^a(x)$ – обобщенные многочлены Лагерра.

Выбирая из (8) случай $k = n$ и $k \neq n$ и решая полученные уравнения относительно величин E_{np} и C_{kp}^{np}, получаем итерационную последовательность:

$$E_{np}(i) = n - f^2 + \frac{1}{2} p\Delta S_{nn}(fp) + \frac{1}{2} p\Delta \sum_{m \neq n} S_{nm}(fp) C_{mp}^{np}(i-1),$$

$$C_{kp}^{np}(i) = \delta_{kn} - (1-\delta_{kn}) \left[k - f^2 + \frac{1}{2} p\Delta S_{kk}(fp) - E_{np}(i-1) \right]^{-1} \times \tag{10}$$

$$\times \frac{1}{2} p\Delta \sum_{m \neq k} S_{km}(fp) C_{mp}^{np}(i-1).$$

где i – номер итерации.

Обратите внимание, что в формуле u выбран так, что $u = fp$. Этот выбор оптимален для ОМ в нулевом приближении.

На рисунках 1 видно, что ПВВ действует только до первого пересечения уровней с разной четностью.

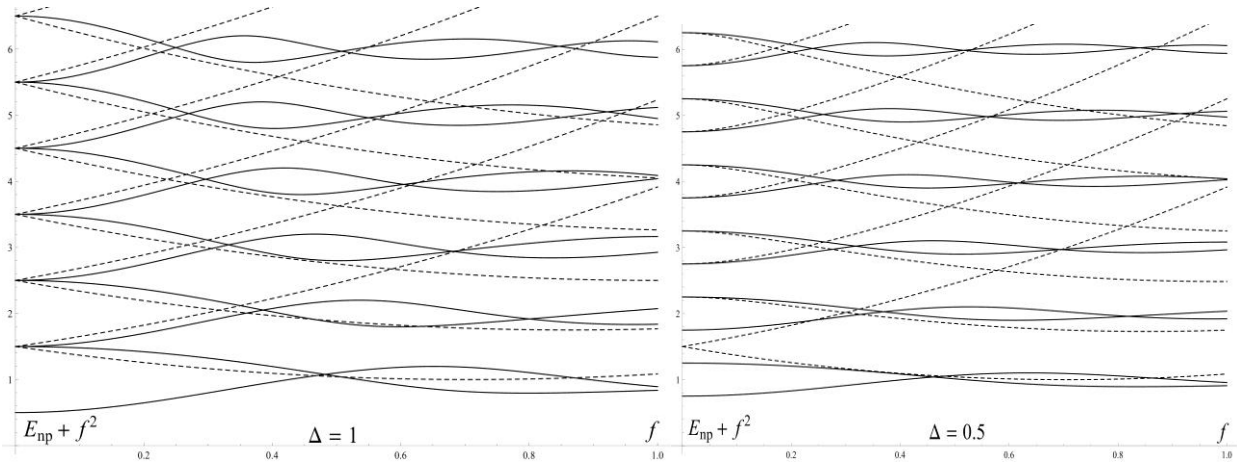


Рисунок 1 – Энергетические уровни МР как функция константы связи *f* в случаях $\Delta = 1$ и $\Delta = 0.5$. Сплошные линии соответствуют решению ОМ, пунктирные линии описывают случай ПВВ

Таким образом, найдено решение стационарного состояния МР за рамками ПВВ. Показано, что операторный метод решения уравнения Шредингера дает возможность описания данной квантовой системы при произвольных значениях их параметров.

Список литературы

1. Frasca, M. A modern review of the two-level approximation [Electronic resource] / M. Frasca. – 2003. – Mode of access: http://arxiv.org/abs/quant-ph/0209056v2. – Date of access: 27.02.2003.

2. Rabi, I. I. Space quantization in a gyrating magnetic field / I. I. Rabi // Phys. Rev. – 1937. – Vol. 51. – P. 652–654.

3. Feranchuk, I. D. The operator method of the approximate description of the quantum and classical systems / I. D. Feranchuk, L. I. Komarov // J. Phys. A. : Math. Gen. – 1984. – Vol. 17, № 16. – P. 3111–3133.

We have introduced a very effective method to describe eigenstates of the Rabi model that are valid within the whole range of the parameter variation. The operator method was introduced in the paper [3], this method is very effective in analyzing various problems of quantum mechanics and quantum statistics.

Нгуен Куанг Шан, аспирант физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, quangsanbsu@gmail.com.

Научный руководитель – *Феранчук Илья Давыдович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики и астрофизики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, feranchuk@bsu.by.

УДК 537.311.322

М. В. РЕМИЗЕВИЧ

ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ И СИНХРОНИЗАЦИЯ БИСТАБИЛЬНЫХ ЛОВУШЕЧНЫХ СОСТОЯНИЙ

Приводятся результаты моделирования электронного переключения и синхронизации бистабильных ловушечных состояний диоксида гафния с использованием модели бистабильного осциллятора.

В настоящее время наноструктуры на основе диоксида гафния перспективны для использования в энергонезависимой резистивной памяти с произвольной выборкой (RRAM). Оксид гафния имеет высокую диэлектрическую проницаемость, относительно высокую энергия запрещенной зоны, и образует термодинамически устойчивый интерфейс с кремнием. Электрический пробой диэлектрика приводит к переключению в состояние с низким сопротивлением и создание высокой плотности ловушек, что делает возможным долговременное хранение заряда (до 10^6–10^7 с). Поэтому методы изготовления наноразмерного диоксида гафния на кремнии изучаются, разрабатываются наноструктуры на его основе. Электрические, структурные и спектроскопические характеристики, а также особенности гафния диоксида, возникающие в результате пробоя, изучаются [1; 2].

В этой области практические результаты уже достигнуты, основным из которых является производство стабильного наноразмерного слоя диоксида гафния, переключаемого с низким потенциалом. Тем не менее, есть еще множество нерешенных проблем, связанных с выявлением наиболее важных механизмов, связанных с переключением диоксида гафния из состояния с высоким сопротивлением в состояние с низким сопротивлением. Одной из таких проблем является связанные с наличием случайного телеграфного шума свойства диоксида гафния. В данной работе, исходя из гипотезы о бистабильном характере ловушечных состояний, представлены результаты моделирования синхронизации переключения бистабильных ловушечных состояний в элементах резистивной памяти.

Модель. Моделирование переключения бистабильных ловушечных состояний в оксиде металла проводим с использованием модели бистабильного осциллятора в предположении, что его переключение индуцируется шумом и описывается уравнением кинетики обобщенной конфигурационной координаты ловушки $x(t)$ [3]. Для моделирования синхронизации двух симметрично связанных бистабильных осцилляторов (ловушек) используем систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} dx/dt &= ax + bx^2 + cx^3 + \gamma(y-x) + A\cos(\Omega t + \phi) + \sqrt{2D}\xi_1(t) \\ dy/dt &= (a+\Delta)y + by^2 + cy^3 + \gamma(x-y) + A\cos(\Omega t + \phi) + \sqrt{2D}\xi_2(t) \end{aligned}, \quad (1)$$

где x, y – обобщенные координаты двух связанных ловушечных состояний, характеризующих вид их потенциальной энергии, a, b, c – параметры, A, Ω, φ – амплитуда, частота и фаза колебаний ловушечного центра, D – интенсивность шума, $\xi_{1,2}(t)$ – функции, генерирующие белый шум, γ – коэффициент связи, Δ – параметр расстройки (отклонение частоты от резонансной частоты) второй системы относительно первой.

Проведены расчеты как не синхронизированных, так и синхронизированных ловушечных состояний. Для первого случая показано, что бистабильный потенциал ловушечного центра под действием слабой периодической модуляции совершает переход из одного состояния в другое только под действием шума. Воздействие шума приводит к переключению ловушечного состояния в диоксиде гафния из одного метастабильного состояния в другое за время порядка нескольких наносекунд. С увеличением интенсивности шума растет разброс значений выходного сигнала $y(t)$, происходит переключение и образуются метастабильные состояния. С увеличением амплитуды периодического воздействия частота переключений из одного состояния в другое растет. С ростом частоты периодического воздействия увеличивается частота переключений, а с увеличением фазы увеличивается время нахождения ловушечного центра в метастабильном состоянии.

В данной модели переход бистабильных ловушечных состояний в высокопроводящее состояние (верхний метастабильный уровень), стимулированный действием шума или прямой активацией электронным ударом, происходит одновременно за счет процесса стохастической синхронизации под действием шума. Связь между ловушками может осуществляться либо за счет кулоновского взаимодействия, либо за счет дипольного. Далее приведены результаты моделирования стохастической синхронизации двух взаимодействующих ловушек в условиях воздействия шума.

Результаты расчетов с помощью системы уравнений (1) представлены на рисунке 1. Как видно из рисунка 1, переключение между метастабильными состояниями двух симметрично связанных бистабильных осцилляторов (ловушечных центров) под действием шума происходит синхронно на определенном временном интервале.

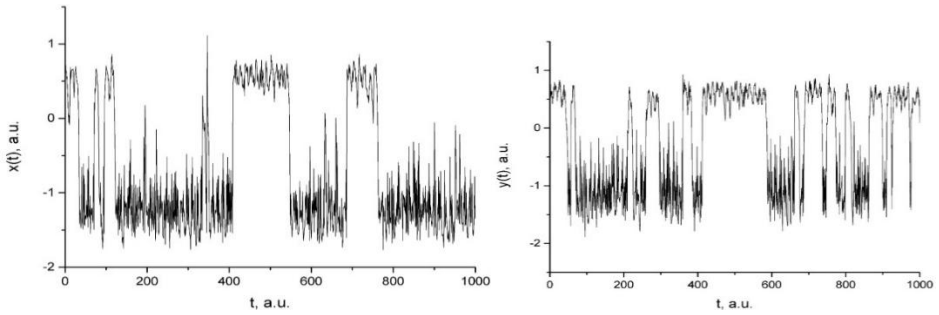


Рисунок 1 – Переходы между метастабильными состояниями двух симметрично связанных бистабильных осцилляторов (ловушек) под действием вынуждающей силы и шума

Полученные результаты моделирования параметров ловушечных центров, переключения и синхронизации из низкопроводящего состояния в высокопроводящее в наностуктурах с оксидом гафния в условиях приложения электрического поля показали не только приемлемость их с общефизической точки зрения, но и удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.

Проведенное моделирование указывает на тот факт, что комплексное понимание (или выявление) механизмов переключения сопротивления в RRAM ячейках должно включать, кроме рассмотрения миграции ионов, рост проводящих волокон (филаментов) и их разрыв, также включать захват и освобождение электронов на ловушках, в том числе их захват и освобождение; на метастабильные состояния. Экспериментальное определение и численная характеристика этих состояний имеют большое значение для увеличения рабочей частоты RRAM памяти.

Список литературы

1. Recent progress in resistive random access memories: Materials, switching mechanisms, and performance / F. Pan [et al.] // Materials Science and Engineering Report. – 2014. – Vol. 83, № 1. – P. 1–59.

2. Device and SPICE modeling of RRAM devices / P. Sheridan [et al.] // Nanoscale. – 2011. – Vol. 3, № 9. – P. 3833–3840.

3. Stochastic resonance / L. Gammaitoni [et al.] // Rev. Mod. Phys. – 1998. – Vol. 70, № 1. – P. 223–287.

Simulations of electronic switching and synchronization of bistable trap states of hafnium dioxide using the model of a bistable oscillator are presented in this paper.

Ремизевич Максим Владиславович, магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, maxonremiz@mail.ru.

Научный руководитель – *Данилюк Александр Леонидович*, кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, danilyuk@bsuir.by.

УДК 621.311

Н. А. СТАРОВОЙТОВ

ВЛИЯНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НАПОЛНИТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНУЮ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрена методика расчета эффективной теплопроводности композита со структурой наполнителя в виде фрактальных кластеров.

Контактная теплопроводность играет важную роль в процессах переноса энергии. В частности, для контактирующих макроповерхностей отсутствуют даже обоснованные предпосылки. Наиболее надежным способом, как обычно, является экспериментальный. Зона контакта двух поверхностей фактически является многофазной, причем структура не может быть однозначно определена. Кроме того, подобные задачи контактной теплопроводности играют важную роль в определении эффективных характеристик композиционных систем [2].

Если зону контакта рассматривать как композиционную систему, то для расчёта эффективной теплопроводности может быть использована теория перколяции и теория фракталов. Как известно [4; 5],

перколяционный кластер является фрактальным. Поэтому в области порога перколяции (0,57 – для плоского случая и 0,39 – для объемного случая) можно считать кластер фрактальным.

Были выполнены расчеты эффективной теплопроводности композита для различных соотношений коэффициентов теплопроводности матрицы и модификатора. Расчеты выполнялись с помощью программы, разработанной в ГрГУ им. Я. Купалы [6], которая основана на методе теплового потока с возможность генерировать структуру наполнителя в виде фрактальных кластеров. На рисунке 1 представлены расчетные кривые относительного эффективного коэффициента теплопроводности, когда отношение коэффициента теплопроводности наполнителя к коэффициенту теплопроводности матрицы равно соответственно 10, 150, 500.

Как видно из рисунка, зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от фрактальной размерности структуры наполнителя заметна при высоких значениях отношения теплопроводности наполнителя и матрицы. Расчеты показали, что фрактальная размерность по сравнению с концентрацией наполнителя является более информативной.

Рассмотренная методика была использована при исследовании контактной теплопроводности.

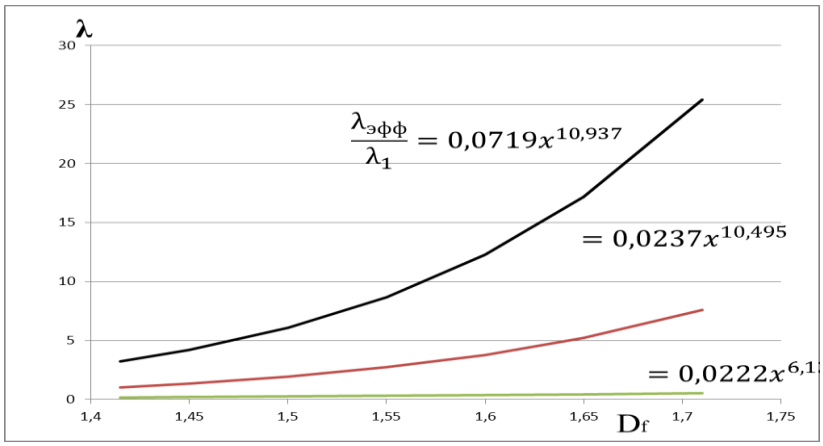


Рисунок 1 – Графики зависимости коэффициента теплопроводности от фрактальной размерности

Разработана программа, генерирующая структуры наполнителя матрицы. Методом теплового потока реализованы алгоритмы и программа расчета эффективной теплопроводности композита. Построены зависимости эффективной теплопроводности от структуры и концентрации наполнителя матрицы. Разработанная методика использована для расчета контактной теплопроводности.

Список литературы

1. Старовойтов, Н. А. Модели контактной теплопроводности / Н. А. Старовойтов // Материалы VII респ. науч. конф. студ., магист. и аспир. (Гомель, 25 апр. 2018 г.) / ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: Д. Л. Коваленко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ, 2018. – С. 280–283.
2. Старовойтов, Н. А., Модель теплопроводности бинарной композиционной системы / Н. А. Старовойтов, А. А. Дубровник // XX респ. науч.-практ. конф. молодых ученых (Брест, 10 мая 2018 г.). – Брест : БрГУ, 2018.
3. Старовойтов, Н. А. Моделирование теплопроводности в зоне контакта твердых тел / Н. А. Старовойтов // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки : материалы студ. Междунар. науч.-практ. конф. (Новосибирск, 16 апр. 2018 г.). – Новосибирск : Науч. изд-во «СибАК», 2018.
4. Займан, Дж. Модель беспорядка. Теоретическая физика однородно неупорядоченных систем / Дж. Займан ; пер. с англ. – М. : Мир, 1982. – 592 с., илл.
5. Никитин, А. В. Фрактальная размерность перколяционных кластеров / А. В. Никитин, В. Л. Радюн // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 1999. – № 2. – С. 52–56.
6. Белко, А. В. Влияние двойных электрических слоев дисперсных частиц на структуру и механизмы образования фрактальных кластеров в дисперсных системах / А. В. Белко, Н. Н. Бабарика, А. В. Никитин // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2019 . – Т. 9, № 1. – С. 68–77.

Старовойтов Никита Александрович, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, nik.lik2012@yandex.ru

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, k_lv@mail.ru.

УДК 535.34

А. В. ФЕЛЬШЕРУК

КОМПЛЕКСНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ МОНОСЛОЯ ГРАФЕНА В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Представлены результаты моделирования поверхностной проводимости и комплексной диэлектрической проницаемости графена в терагерцовом частотном диапазоне. Полученные частотные зависимости показали, что управлять проводимостью и диэлектрической проницаемостью графена можно путем изменения значения химического потенциала.

За последнее десятилетие исследователи пришли к выводу, что на границе между проводником и диэлектриком возможно получить поверхностные плазмоны с той же частотой, что и внешние электромагнитные волны, но с намного меньшей длиной волны. Это позволит использовать плазмоны в наноструктурах для переноса информации внутри интегральной микросхемы. Плазмонные межсоединения стали бы настоящим прорывом в области повышения рабочих частот интегральных микросхем. В этом плане перспективным направлением для решения подобной задачи является исследование плазмонных колебаний в терагерцевом диапазоне частот и, в частности, с использованием графена на диэлектрической подложке. Однако на этом пути еще предстоит решить ряд не только технологических, но и физических задач по возбуждению, распространению и детектированию плазмонных колебаний с контролируемыми параметрами.

В данной работе представлены результаты моделирования поверхностной проводимости и диэлектрической проницаемости в однослойной графеновой наноструктуре в зависимости от величины химического потенциала μ и температуры в терагерцовом частотном диапазоне. В качестве модели поверхностной проводимости графена было использовано следующее выражение [1]:

$$\sigma_S(\omega) = \sigma_{\text{int}ra}(\omega) + \sigma_{\text{int}er}(\omega)\,, \tag{1}$$

$$\sigma_{\text{int}ra}(\omega) = -j\frac{e^2 kT}{\pi\hbar^2(\omega - j2\Gamma)}\left(\frac{\mu}{kT} + 2\ln\left(\exp\left(\frac{-\mu}{kT}\right)+1\right)\right), \tag{2}$$

$$\sigma_{\text{int}er}(\omega) = \frac{e^2}{4\hbar}\left[H(\omega/2) + j\frac{4\omega}{\pi}\int_0^\infty \frac{H(\Omega) - H(\omega/2)}{\omega^2 - 4\Omega^2}d\Omega\right], \tag{3}$$

где Γ – скорость рассеяния электронов, $\hbar$ – редуцированная постоянная Планка, k – постоянная Больцмана, T – температура, c – скорость света, e – заряд электрона, ω – круговая частота, функции

$$H(\Omega) = \frac{\sinh\left(\frac{\hbar\Omega}{kT}\right)}{\cosh\left(\frac{\hbar\Omega}{kT}\right) + \cosh\left(\frac{\mu}{kT}\right)}\,, \tag{4}$$

В рассматриваемом диапазоне частот $\sigma_{\text{int}er}(\omega) << \sigma_{\text{int}ra}(\omega)$, т. е. вкладом межзонных переходов в проводимость можно пренебречь [1]. Таким образом, поверхностная проводимость графена может быть описана в рамках теории Друде.

В задачах электродинамики используется эффективная диэлектрическая проницаемость графена, в уравнения Максвелла входит объемная удельная проводимость σ, которая выражается через поверхностную проводимость. Для монослоя графена в рассматриваемом диапазоне частот вводится следующая комплексная диэлектрическая проницаемость [2]:

$$\varepsilon(\omega, \mu) = 1 + \frac{j\sigma}{\varepsilon_0\omega}. \tag{5}$$

Поверхностная и объёмная проводимости связаны соотношением $\sigma = \sigma_S / d$, где d – толщина графена.

На рисунке 1 приведены частотные зависимости действительной и мнимой части поверхностной проводимости монослоя графена при различных значениях химического потенциала. Величина действительной части поверхностной проводимости графена пропорциональна $1/\omega^2$, а величина мнимой части пропорциональна $-1/\omega$ в рассматриваемом частотном диапазоне. При изменении химического потенциала от 0,1 эВ до 0,5 эВ величина действительной части поверхностной проводимости графена изменяется в пределах

от 0,03 мкСм до 15 мкСм, а величина мнимой части поверхностной проводимости графена изменяется в пределах от –930 мкСм до –63 мкСм.

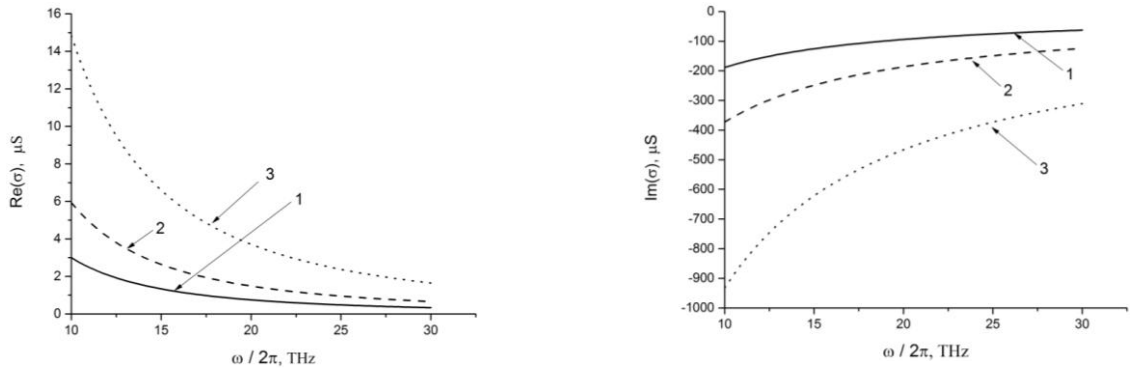


Рисунок 1 – Частотные зависимости действительной и мнимой части поверхностной проводимости монослоя графена при различных химических потенциалах μ (1 – μ = 0,1 эВ; 2 – μ = 0,2 эВ; 3 – μ = 0,5 эВ)

На рисунке 2 приведены частотные зависимости действительной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости монослоя графена при различных значениях химического потенциала.

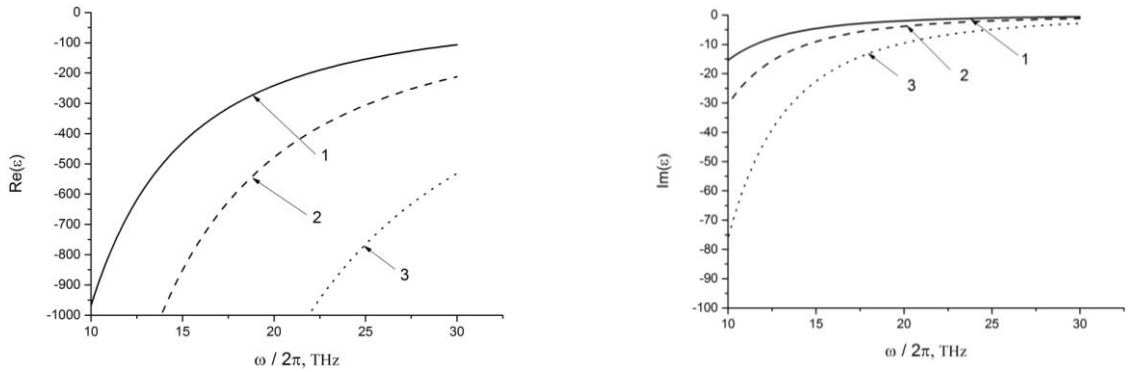


Рисунок 2 – Частотные зависимости действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости монослоя графена при различных значениях химического потенциала μ (1 – μ = 0,1 эВ; 2 – μ = 0,2 эВ; 3 – μ = 0,5 эВ)

Из графиков на рисунке 2 следует, что при различных значениях химического потенциала действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости монослоя графена пропорциональна $-1/\omega^2$, а мнимая часть диэлектрической проницаемости пропорциональна $-1/\omega^3$ в рассматриваемом частотном диапазоне. При изменении химического потенциала от 0,1 эВ до 0,5 эВ величина действительной части диэлектрической проницаемости монослоя графена изменяется в пределах от –1000 до –108, а величина мнимой части поверхностной проводимости графена изменяется в пределах от –76 до –0,58.

Таким образом, проведено моделирование параметров однослойной графеновой наноструктуры в зависимости от химического потенциала и температуры. Полученные частотные зависимости показали, что управлять проводимостью и диэлектрической проницаемостью графена можно путем изменения значения химического потенциала, величина которого может регулироваться, например, потенциалом полевого электрода, внедрением примесей, созданием дефектов, или изменением числа слоев графена.

Список литературы

1. Andryieuski, A. Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: effective surface conductivity approach / A. Andryieuski, A. V. Lavrinenko // Optics express. – 2013. – Т. 21, №. 7. – С. 9144–9155.

2. Голованов, О. А. Проводимость графена в терагерцовом и инфракрасном диапазонах частот / О. А. Голованов, Г. С. Макеева, В. В. Вареница // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 26–33.

The surface conductivity and the dielectric permittivity of graphene monolayer were modeled in a single-layer graphene nanostructure, depending on the chemical potential and temperature. The obtained frequency dependences have shown that in the frequency range considered, it is possible to control the surface conductivity and the dielectric permittivity of graphene monolayer by changing the value of the chemical potential.

Фельшерук Андрей Викторович, аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, felsheruk1994@gmail.com.

Научный руководитель – *Данилюк Александр Леонидович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университето информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, danilyuk@bsuir.by.

УДК 37.016:53

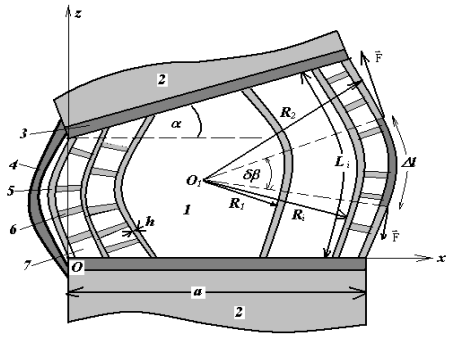
А. В. ЧЕКЕЛЬ

МЕТОД РАСЧЁТА ДАВЛЕНИЙ В МЕЖПОЗВОНКОВОМ ДИСКЕ ШЕЙНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА

Представлен метод расчёта давлений в межпозвонковом диске шейного отдела позвоночника. С помощью экспериментальных данных расчитана площадь диска в ортостатическом положении.

Для анализа процессов, происходящих в межпозвонковых дисках, необходимо рассмотреть строение позвонково-двигательного сегмента (рисунок 1). Сегмент представляет собой два позвонка (2), которые связаны передней и задней упругими продольными связками (4), между которыми заключен межпозвонковый диск, состоящий из пульпозного ядра (1) и фиброзного кольца. Фиброзное кольцо это набор из 10–12 мембран (5), в него так же входят эластичные волокна восстанавливающие форму диска после движения (6). Пространство между слоями заполнено фиброзной тканью (7).

Движение позвонков ограничено связками, поведение которых не определено как для ортостатического положения, так и при движении в люой плоскости. Увеличение длины связок приводит к возрастанию давления внутри межпозвонкового диска, что влияет на массообменные процессы между самим диском и питающей средой, а также деформации замыкательных пластинок тел позвонков.



1 – пульпозное ядро, 2 – тела смежных позвонков, 3 – замыкательная пластинка, 4 – продольная связка, 5 – мембрана, 6 – эластические волокна, 7 – фиброзная ткань

Рисунок 1 – Двумерная модель позвонково-двигательного сегмента в сагиттальной плоскости

Деформирование замыкательных пластинок и тел позвонков, а также питание межпозвонкового диска возможны только при градиенте давления между диском и телами позвонков.

В позвонково-двигательном сегменте интерес представляет межпозвонковый диск, вязкоупругие свойства которого позволяют осуществлять движение во всех плоскостях. Непосредственно исследовать межпозвонковый диск при движениях позвоночника практически невозможно, поскольку на рентгенограммах он не определяется. О внутридисковом давлении можно судить по объемам, занимаемым диском при движении позвоночника.

При сгибании позвоночника объем межпозвонкового диска не может уменьшиться мгновенно, следовательно, происходит удлинение связок, что приводит к возрастанию давления в диске. Вследствие возрастания давления в ядре объем, занимаемый диском, уменьшается, и часть его массы уходит в тела позвонков через замыкательные пластинки.

Значения объемов позволяют оценить напряжения, возникающие в продольных связках, фиброзном кольце и в пульпозном ядре. Считается, что для формы связки выполняется условие: она представляет собой фигуру, для которой объем ограниченный ею, будет максимальным при минимальной площади ее поверхности. Вдоль связки сила натяжения считалась постоянной. При проецировании объема на площадь в сагиттальной

плоскости связка будет принимать форму дуги окружности. Силы натяжения $\vec{F}$ (рисунок 1) будут образовывать результирующую, которая создаст давление P внутри диска, определяемое по формуле:

$$Pdldy = \frac{ES}{L} dLd\beta,$$

где E – модуль Юнга, S – поперечное сечение связки, L – ее первоначальная длина, dL – удлинение связки при растяжении, $dldy$ – элемент поверхности связки.

Удлинение связки вычислим исходя из условия: проецированный объем (площадь) диска не может измениться мгновенно при движении позвоночника. Необходимо вычислить площадь диска в ортостатическом положении и при наклоне позвонково-двигательного сегмента.

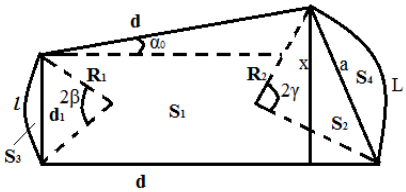


Рисунок 2 – Схема расчёта площади диска в вертикальном положении

$$S_1 = \frac{d_1 + (d_1 + d_1 \cdot \cos\alpha_0)}{2} \cdot d \cdot \cos\alpha_0,$$

$$S_2 = \frac{1}{2} \cdot (d - d \cdot \cos\alpha_0) \cdot (d_1 + d \cdot \sin\alpha_0),$$

$$S_3 = \frac{\pi 2\gamma}{180} \cdot R_1^2 - \frac{1}{2} \cdot d_1 \cdot R_1 \cdot \cos\beta, \quad S_4 = \frac{\pi 2\gamma}{180} \cdot R_2^2 - R_2^2 \cdot \sin\gamma \cdot \cos\gamma,$$

где $l = R_1 2\beta$; $L = R_2 2\gamma$ – длина мышцы между позвонками в вертикальном положении.

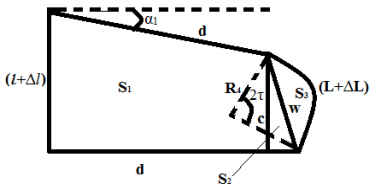


Рисунок 3 – Схема расчёта площади диска в наклоне

$$S_1 = \frac{(l + \Delta l) + (l + \Delta l - d \cdot \sin\alpha_1)}{2} \cdot d \cdot \cos\alpha_1,$$

$$S_2 = \frac{1}{2} \cdot (d - d \cdot \cos\alpha_1) \cdot (l + \Delta l - d \cdot \sin\alpha_1), \quad S_3 = \frac{\pi 2\tau}{180°} \cdot R_4^2 - R_4^2 \cdot \sin\tau \cdot \cos\tau.$$

С помощью экспериментальных данных была расчитана площадь диска в ортостатическом положении 191,68 мм^2. Далее методом подбора было определено удлинение связки, при котором сохранялось равенство площадей межпозвонковых дисков в вертикальном положении и в наклоне: $\Delta L = 3$ мм, $\Delta l = 1{,}68$ мм.

Список литературы

1. Жарнов А. М. Биомеханические процессы в позвонково-двигательном сегменте шейного отдела позвоночника при его движении / А. М. Жарнов, О. А. Жарнова // Российский журнал биомеханики. – 2014. – Т. 18, № 1. – С. 14.

Чекель Артём Владимирович, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, a.chekel@mail.ru.

Научный руководитель – *Жарнов Александр Михайлович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, a.zharnow@grsu.by.

СЕКЦИЯ 3.
ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 533.9.082.5;543.423;621.373.826

В. А. АКУЛИЧ, А. И. КОЛБАСИН, М. П. ПАТАПОВИЧ

АППАРАТУРНЫЙ КОМПЛЕКС ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Эксперименты проводились с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1 (производство совместного белорусско-японского предприятия «LOTIS TII»). Исследования показали, что переход от одноимпульсной к двухимпульсной абляции при неизменной энергии и мощности лазерного излучения приводит к многократному увеличению интенсивности спектральных линий элементов.

Анализ практически любого изучаемого объекта – сложная аналитическая задача. Главные причины затруднений анализа биологических субстратов – индивидуальность состава, многокомпонентность [1–3]. Из этого вытекает необходимость приспособления даже, казалось бы, несложных стандартных методов и методик к особенностям состава и физико-химической структуре каждого исследуемого объекта, т. е. в каждом конкретном случае требуется проведение в той или иной мере значительной исследовательской работы.

Лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1 (пр-во СП «LOTIS TII» Минск, Беларусь) предназначен для качественного, полуколичественного и количественного определения состава твердых, жидких и газообразных материалов посредством анализа эмиссионных спектров плазмы, возбуждаемой излучением двухимпульсного Nd:YAG-лазера с активной модуляцией добротности резонатора.

Исследуемое излучение из оптического волокна проходит через двухлинзовый конденсор, светофильтр и попадает на входную щель полихроматора SDH-1, оптическая схема которого представлена на рисунке 1. После прохождения входной щели излучение с помощью поворотного зеркала ПЗ-1 направляется на коллиматорное зеркало. Параллельный пучок лучей от коллиматора попадает на дифракционную решетку, которая раскладывает излучение на монохроматические составляющие. С помощью сферического камерного зеркала и поворотного зеркала ПЗ-2 в фокальной плоскости спектрографа создается совокупность монохроматических изображений входной щели, образующая анализируемый спектр образца [3].

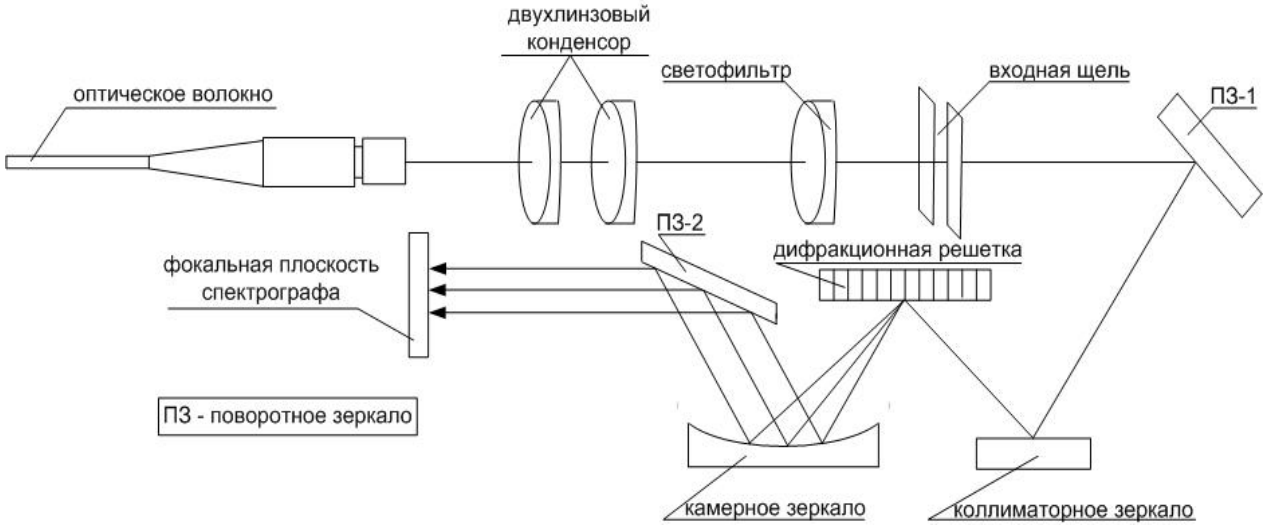


Рисунок 1 – Оптическая схема полихроматора SDH-1

Данный прибор позволяет оперативно и точно подобрать оптимальные условия для селективного определения ряда элементов с высоким качеством спектра, проводить математическую обработку результатов анализа и получать микрофотографию поверхности образца.

Программное обеспечение спектрометра LSS-1 (LaesSpectrometer) заметно ускоряет проведение анализа объектов различной природы и дает возможность управлять параметрами лазера, такими, как энергия накачки, временной интервал между сдвоенными лазерными импульсами, число импульсов в точку. Кроме того, имеется возможность проводить количественный анализ различных веществ как в твердой, так и в жидкой фазе и сохранять зарегистрированные спектры в формате MS Office Excel для последующей обработки [2]. В качестве примера на рисунке 2 приведен фрагмент спектра биообразца при воздействии серии одиночных и сдвоенных лазерных импульсов (ОЛИ и СЛИ).

Программа LaesSpectrometer предназначена для обеспечения управления лазерами фирмы «Lotis TII». Она позволяет управлять режимами работы лазера, снимать (сканировать) и визуализировать зависимости энергий лампы накачки и пироприемников от времени и от задержки запуска затвора в реальном масштабе времени, сохранять графики энергий в файлах на диске, загружать из файла и просматривать ранее сохраненные графики, проводить сканирование энергий лампы накачки и пироприемников в двух стандартных режимах, создавать произвольные алгоритмы сканирования. Пункт головного меню «Спектр» содержит в себе следующие подпункты: «Выбор методики контроля» и «Исследовательский режим», первый из которых предназначен для выбора методики, на основании которой в дальнейшем будет производиться контроль исследуемого образца.

Калибровка диапазона по длинам волн для каждого устройства регистрации спектра (спектрометра) проводиться индивидуально. Для начала калибровки необходимо провести регистрацию спектра желательно достаточно чистых, однородных материалов, т. к. нужно будет однозначно идентифицировать пики на полученных спектрах [2; 3]. Для этого необходимо иметь спектры ряда материалов с тем, чтобы иметь возможность идентифицировать пики на всем спектральном диапазоне. Второй подпункт, или «Исследовательский режим», предназначен для работы с файлами ранее полученных спектров исследуемого образца. В исследовательском режиме, в зависимости от выбранной вкладки производиться качественный и количественный анализ состава материала, указание пиков на спектре подлежащих контролю в создаваемой методике.

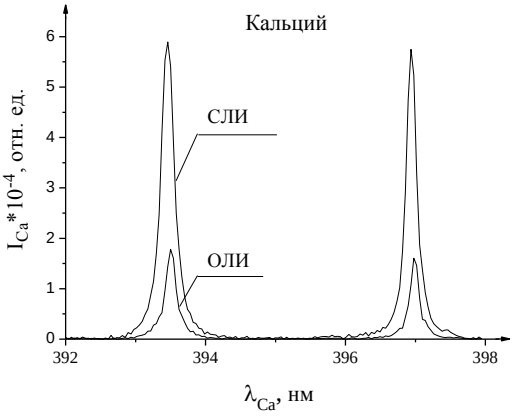


Рисунок 2 – Фрагмент спектра при воздействии ОЛИ и СЛИ

Для проведения качественного и (или) количественного анализа состава исследуемого материала создается методика контроля, суть которой в том, что заранее определяется перечень контролируемых элементов входящих в состав материала. Методики количественного анализа создаются на основании набора стандартных образцов для конкретного типа сплава [3]. Набор стандартных образцов, на основании которых строится методика, должен быть аттестован и для каждого образца известны характеристики содержания элементов в процентах.

Методики качественного анализа можно построить и без наличия стандартных образцов, достаточно на каком-либо спектре указать положение контролируемых спектральных линий.

Таким образом, спектрометры являются достойными предпочтительными аппаратурными комплексами, позволяющими программно изменять параметры регистрации спектров и подбирать оптимальные условия для анализа разнообразных, в том числе и биологических объектов.

Список литературы

1. Патапович, М. П. Атомно-эмиссионный спектрометрический анализ развития нарушения обмена макро- и микроэлементов в организме человека : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.05 / М. П. Патапович. – Минск, 2014. – 136 л.

2. Ермалицкая, К. Ф. Двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия многокомпонентных сплавов и функциональных покрытий : дис. … канд. физ.-мат. наук : 01.04.05 / К. Ф. Ермалицкая. – Минск, 2010. – 140 л.

3. Атомно-эмиссионный многоканальный спектральный анализ: научное и практическое применение / Е. С. Воропай [и др.] // Вестн. Белорус. гос. ун-та, Сер. 1. – 2009. – № 1. – С. 14–20.

The experiments were performed using laser double-pulse atomic emission spectrometer LSS-1 (production of a joint Belarusian-Japanese company «LOTIS-TII»). Studies have shown that the transition from single- to double-pulse ablation at a constant laser energy and power leads to a multifold increase in the intensity of spectral lines of elements.

Акулич Валентин Александрович, студент 4 курса уровня среднего специального образования факультета электросвязи Белорусской государственной академии связи, Минск, Беларусь,VAAKU2019@mail.ru.

Колбасин Анатолий Игоревич, студент 2 курса уровня высшего образования факультета электросвязи Белорусской государственной академии связи, Минск, Беларусь.

Научные руководители – *Патапович Мария Петровна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и физики факультета инжиниринга и технологий связи Белорусской государственной академии связи, Минск, Беларусь, mpetpat@mail.ru.

Зажогин Анатолий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

УДК 37.016:53

П. П. БАНЦЕВИЧ

НАЗНАЧЕНИЕ, КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Описываются назначение, классификация и основные принципы построения электрических сетей, которые представляют собой совокупность электроустановок для передачи и распределения электрической энергии.

Электрической сетью (ЭС) называется совокупность электроустановок для передачи и распределения электроэнергии, состоящая из подстанций, линий электропередачи, токопроводов, аппаратуры присоединения, защиты и управления. Электрические сети, обеспечивающие электроснабжение промышленных предприятий и городов – это в основном сети на напряжение выше 1 кВ [1].

Электрические сети различаются по роду тока, напряжению, режиму нейтрали, конструктивным признакам. ЭС делят на сети переменного и постоянного тока. В основном сети выполняются по системе трёхфазного переменного тока частотой 50 Гц. Эта система позволяет осуществлять трансформацию электроэнергии и передачу её на дальние расстояния. В сетях переменного тока широко применяются однофазные ответвления к однофазным электроприёмникам. В ЭС могут включаться установки повышенной (до 10 кГц) и высокой (выше 10 кГц) частоты с целью обеспечения надёжной работы отдельных технологических установок. [2]

Для классификации электрических сетей используется несколько критериев. Основные критерии:

1. По напряжению:

Каждая из сетей характеризуется номинальным напряжением. Оно соответствует номинальному напряжению электроприёмников, подключенных к этой сети. Сети напряжением ниже 1000 В называют сетями низкого напряжения. Сети напряжением выше 1000 В называют сетями высокого напряжения.

2. По назначению:

По назначению сети бывают межсистемные, системообразующие районных энергосистем, питающие и распределительные.

Межсистемные – сети напряжением 330 кВ и выше, объединяющие две районные энергосистемы или крупные узловые подстанции энергосистем.

Системообразующие районных энергосистем – сети напряжением 110, 220 кВ, которые объединяют отдельные подстанции в единую районную энергосистему.

Питающие линии – это линии напряжением 35, 110, 220 кВ, по которым электрическая энергия от подстанций энергосистемы поступает на приемную подстанцию предприятия (главную понизительную подстанцию ГПП).

Распределительные сети – это сети напряжением 35, 10, 6, 0,4 кВ, иногда 110 кВ, по которым электрическая энергия распределяется между отдельными потребителями внутри предприятия.

3. По виду потребителя:

- городские;

- сельские;
- сети промышленных предприятий;
- промысловые сети;
- внутрицеховые сети;
- внутренняя проводка (это сети, расположенные внутри помещения).

Сети промышленных предприятий предназначены для распределения электроэнергии внутри предприятия. Они относятся к внутризаводской системе электроснабжения, обеспечивают распределение электроэнергии на 1–3 уровнях системы электроснабжения на напряжении выше 1 кВ.

К этим сетям можно отнести и сети, питающие промышленные предприятия, обеспечивающие передачу электроэнергии от энергетических систем к предприятию.

Сети городов предназначены в основном для распределения электроэнергии от источников питания на напряжении 6–10 кВ через трансформаторные подстанции 6–10/0,4–0,23 кВ и на напряжении 0,38/0,22 кВ – до ввода в здание.

4. *По конфигурации схемы:*

Схемы делятся на разомкнутые (радиальные, магистральные и смешанные) и замкнутые (простые и сложные).

5. *По режиму заземления нейтралей:*

- с глухозаземлённой нейтралью;
- с эффективно заземлённой нейтралью;
- с изолированной нейтралью;
- сети с нейтралью, заземлённой через активные сопротивления или дугогасящий реактор.

6. *По конструктивному исполнению:*

Выделяют воздушные сети, кабельные линии, токопроводы [3].

Электрическая сеть должна отвечать следующим основным требованиям:

- надежность электроснабжения, обусловленная категориями электроприемников, обеспечиваемых электроэнергией через сеть;
- экономичность – капитальные вложения и эксплуатационные расходы на электрическую сеть должны быть минимальными при достаточной надежности электроснабжения. Важным фактором при этом является выбор рационального напряжения электрической сети, которое определяет соответствующее оборудование, линии электропередачи, потери мощности и энергии в сети;
- обеспечение электроэнергией требуемого качества – показатели качества электроэнергии у потребителей не должны выходить за пределы значений, установленных ГОСТ;
- безопасность и удобство эксплуатации;
- возможность перспективного развития без коренной реконструкции.

Реализация этих требований предполагает выполнение систем электроснабжения, их электрических сетей по различным схемам, построение которых осуществляется в соответствии со следующими основными принципами:

1) «децентрализация» трансформирования электроэнергии и максимальное приближение источников высокого напряжения к потребителям электроэнергии. Это приводит к уменьшению потерь электроэнергии, повышению надежности электроснабжения;

2) все элементы электрической сети (линии, трансформаторы) должны, как правило, находиться под нагрузкой, «холодный» резерв не предусматривается;

3) применение раздельной работы линий и трансформаторов, что обуславливает меньшие токи короткого замыкания, упрощение релейной защиты и автоматики сети;

4) применение глубокого секционирования на всех уровнях системы электроснабжения;

5) возможность выполнения монтажа индустриальными методами – сборка из укрупненных блоков и узлов заводского изготовления (комплектных РУ и ТП и др.);

6) при разработке схем электроснабжения предусматривается возможность организации технического (внутрипроизводственного) учета расхода электроэнергии и управления распределением электроэнергии, например, отключение малозагруженных трансформаторов ТП и перевод их нагрузок на оставшиеся в работе трансформаторы.

Список литературы

1. Ус, А. Г. Электроснабжение промышленных предприятий и гражданских зданий : учеб. пособие / А. Г. Ус, Л. И. Евминов. – Минск : НПООО «ПИОН», 2002. – 457 с.

2. Щербаков, Е. Ф. Электроснабжение объектов строительства / Е. Ф. Щербаков, Д. С. Александров, А. Л. Дубов. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 404 с.

3. Назначение и виды электрических сетей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://lektsii.com/2-78655.html. – Дата доступа: 01.03.2019.

This article describes the purpose, classification and basic principles of building electrical networks, which are a combination of electrical installations for the transmission and distribution of electrical energy.

Банцевич Павел Петрович, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, 06pavel08@mail.ru.

Научный руководитель – *Ситкевич Татьяна Анатольевна*, кадидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, sittan@tut.by.

УДК 621.35.035

А. Л. БАРАХОЕВ, В. В. ТУБОЛЬЦЕВ

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРА ОЗОНА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Представлены результаты разработки схемы регулируемого высоковольтного импульсного источника питания для работы в составе генератора озона технологического назначения. Приведены структурная схема генератора озона, осциллограммы управляющих сигналов для работы выходного высоковольтного каскада, выполненного на базе тиристорного полумостового преобразователя.

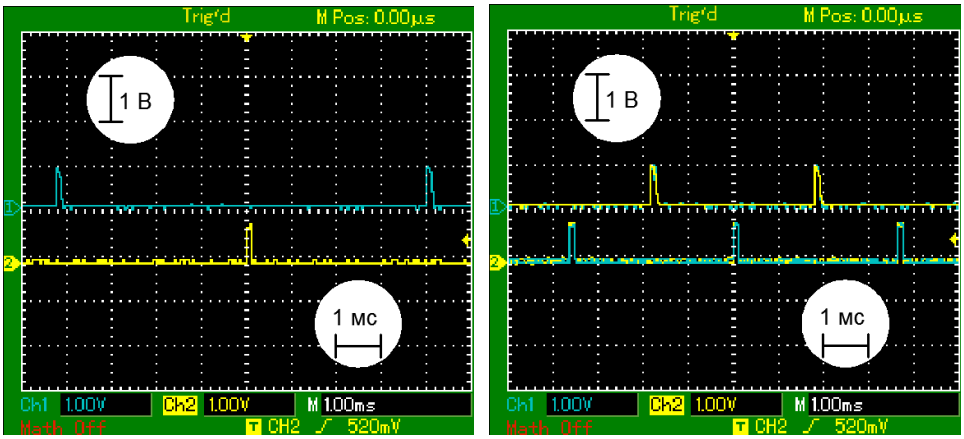
Озон представляет собой аллотропную модификацию кислорода, молекула которого состоит из трёх атомов кислорода. В реакциях с большинством веществ озон – сильный окислитель, что обусловлено низкой энергией отрыва атома О от молекулы O_3 (107 кДж/моль) и высоким значением энергии сродства к электрону молекулы озона (2,26 эВ). Высокая химическая активность делает перспективным использование озона для очистки воды, устранения запахов, стерилизации медицинских инструментов, в технологических процессах производства изделий электронной техники и т. д. [1–3].

В настоящее время разработано большое количество конструкций устройств для получения озона, различающихся используемым для генерации озона видом разряда (коронный или барьерный), геометрическими параметрами разрядных камер, источниками питания и т. д. Для проведения процессов активации газообразной среды нами использовано устройство генерации озона в результате барьерного разряда, конструктивно представляющее собой реактор из нескольких трубчатых коаксиальных электродов с шириной газового промежутка $d \approx 1$ мм между диэлектрическим чехлом и заземлённым электродом, выполненным в виде цилиндра из нержавеющей стали.

Для питания электроразрядной системы использован источник высокого переменного напряжения с регулируемой частотой импульсов от 250 до 500 Гц на основе полумостового тиристорного резонансного инвертора. Структурная схема генератора озона и источника питания показана на рисунке 1.

Рисунок 1 – Структурная схема генератора озона технологического назначения

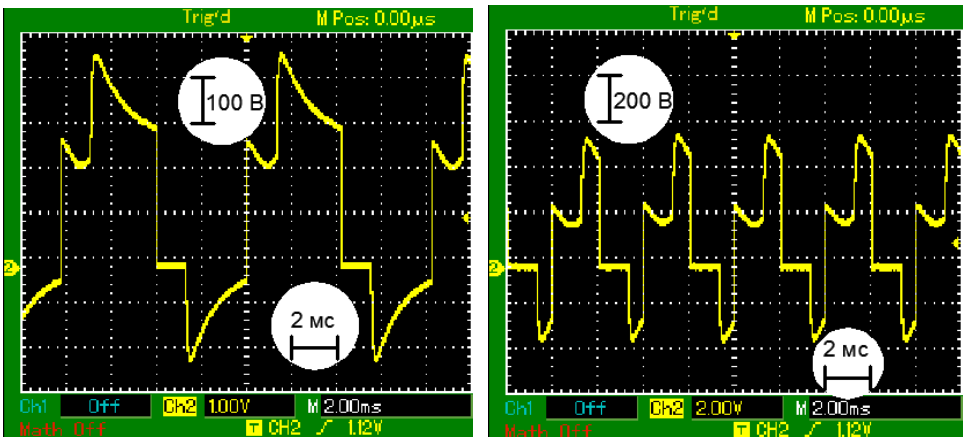
Форма управляющих импульсов показана на рисунке 2. Особенностью работы высоковольтного источника питания является то, что при изменении частоты низковольтных управляющих импульсов в диапазоне рабочей полосы частот инвертора (в нашем случае в пределах от 250 до 500 Гц), на его выходе формируются высоковольтные импульсы напряжения, величина которых пропорциональна частоте управляющих импульсов. Последовательный резонансный контур в составе инвертора образован ёмкостью и индуктивностью в виде первичной обмотки высоковольтного трансформатора. При работе полумостового тиристорного преобразователя происходит поочерёдная коммутация начала и конца первичных обмоток высоковольтных трансформаторов с цепями заряда-разряда подключаемых емкостей полумостовой схемы инвертора.



а *б*

Рисунок 2 – Форма управляющих импульсов (*а* – *f* ≈ 250 Гц, *б* – *f* ≈ 500 Гц)

Форма импульсов напряжения при разной частоте управляющих импульсов на тиристорах показана на рисунке 3.



а *б*

Рисунок 3 – Форма импульсов напряжения на тиристорах

Регулятор частоты управляющих импульсов инвертора обеспечивает возможность изменять амплитудные значения напряжения на электродах разрядной системы от 7,8 до 13,0 кВ.

Список литературы

1. Разумовский, С. Д. Озон и его реакции с органическими соединениями / С. Д. Разумовский, Г. Е. Заиков. – М. : Наука, 1974. – 322 с.

2. Лунин, В. В. Физическая химия озона / В. В. Лунин, М. П. Попович, С. Н. Ткаченко. – М. : Изд-во МГУ, 1998. – 480 с.

3. Wood, P. C. Critical Process Variables for UV-Ozone Etching of Photoresist / P. C. Wood, T. Wydeven, O. Tsuji // Surface Chemical Cleaning and Passivation for Semiconductor Processing : Materials Research Society, Symposium Proceedings, Pittsburgh, PA, 1993 / edited by G. S. Higashi, E.A. Irene, and T. Ohmi. – Pittsburgh, PA, 1993. – P. 237–242.

Power supply for DBD ozone generator was developed. The structural scheme of the generator and electrical characteristics of the power supply are presented. Presents drawings with the forms of control pulses of impulses depicted on them.

Барахоев Андрей Леонидович, аспирант кафедры электронной техники и технологии факультета компьютерного проектирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, andreibarahoev@gmail.com.

Тубольцев Владислав Васильевич, магистрант кафедры электронной техники и технологии факультета компьютерного проектирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, tuboltsev.vlad@gmail.com.

Научный руководитель – *Бордусов Сергей Валентинович*, доктор технических наук, профессор кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, bordusov@bsuir.by.

УДК 004.021

С. Н. БЕЛОФОСТ

ПОЛУЧЕНИЕ ДАННЫХ КЛАВИАТУРНОГО ПОЧЕРКА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

Исследуется клавиатурный почерк – поведенческая биометрическая характеристика, которую описывают следующие параметры: скорость ввода, время между нажатиями, время удержания, частота возникновения ошибок, ускорение ввода, частота нажатия определенных клавиш.

Существует множество различных комбинаций использования параметров для составления датасета.

Для сбора данных был написан скрипт на языке Python, с использованием библиотеки для получения данных с клавиатуры – «keyboard».

Основной алгоритм скрипта собирает данные для формирования датасета на основе следующих параметров: скорость ввода, время между нажатиями, время удержания, частота возникновения ошибок.

Алгоритм учитывает и обрабатывает паузы при вводе, разделяя данные на выборки.

Скрипт был установлен на устройства десятка пользователей, далее в качестве примера будут приведены результаты двух случайных пользователей: п1, п2.

1. Скорость ввода измеряется в полных нажатиях в секунду.
2. Время между нажатиями определяется длинной интервала между нажатием вниз одной клавиши до нажатия вниз второй клавиши, деленное на количество полных нажатий в сессии.
3. Время удержания определяется длиной интервала между нажатием вниз до нажатия вверх, деленное на количество полных нажатий в сессии.
4. Количество ошибок определяется количеством нажатий клавиш Delete, Backspace.
5. Количество нажатий определяется суммированием всех полностью нажатых клавиш в течение сессии.

Сессия – время, в течение которого собирается элемент выборки до паузы.

Пауза – установленная временная константа, при превышении которой сессия будет записана как элемент выборки.

В качестве примера представлена часть датасета п2 (рисунок 1).

	input_speed	time_between_clicks_avg	pressing_time_avg	error_frequency	key_count
5	5.281839	0.187900	0.095754	0.025641	39
6	5.217023	0.184278	0.086442	0.111111	27
7	6.095651	0.156871	0.102666	0.100000	10

Рисунок 1 – Отображение собранных данных

Для сравнения представлены графики отношения п1 и п2 (рисунок 2).

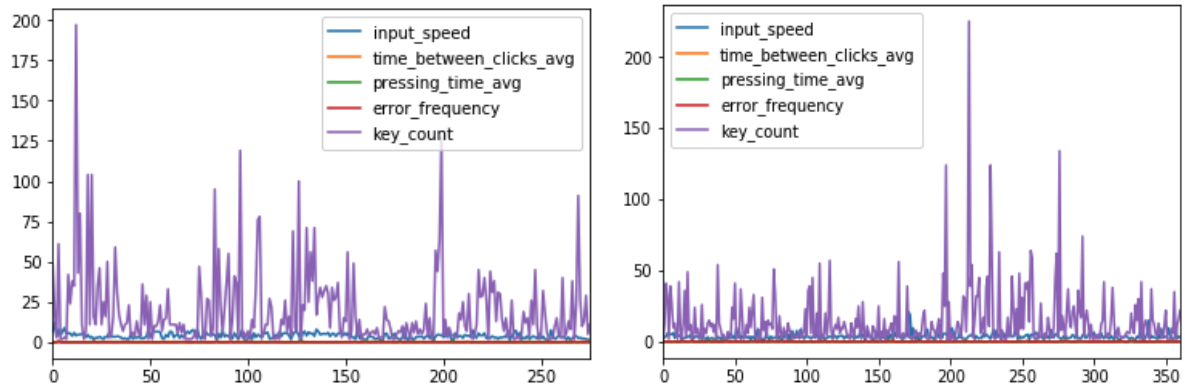


Рисунок 2 – Графики отношения параметров

На более подробных графиках показана разница корреляционных зависимостей двух разных пользователей (рисунок 3).

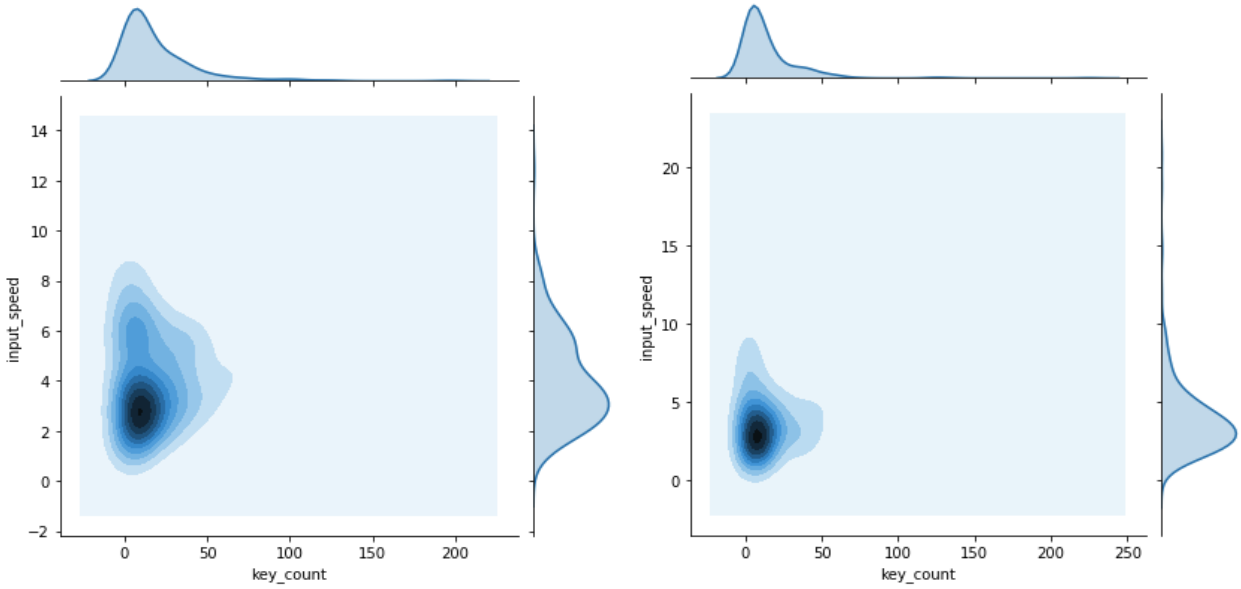


Рисунок 3 – Корреляция скорости к количеству нажатий

В заключение стоит отметить, что для повышения точности аутентификации с использованием преобразователя «биометрия – код» доступа необходимо увеличить количество подбираемых параметров для датасета, тем самым увеличится число возможных комбинаций для подсчёта корреляции.

Список литературы

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.securitylab.ru/blog/personal/aguryanov/29985.php. – Дата доступа: 09.03.2019.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://vuzlit.ru/1045108/harakteristiki_klaviaturnogo_pocherka. – Дата доступа: 09.03.2019.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://scienceforum.ru/2015/article/2015015614/.– Дата доступа: 09.03.2019.
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://habr.com/ru/company/ods/blog/323210/. – Дата доступа: 09.03.2019.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://seaborn.pydata.org/generated/seaborn.heatmap.html. – Дата доступа: 09.03.2019.

The paper assesses the biometric characteristics of users based on their keyboard handwriting.

Белофост Сергей Николаевич, магистрант факультета математики и информатики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, belserhey@gmail.com.

Научный руководитель – *Ассанович Борис Алиевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, bas@grsu.by.

УДК 620.9

М. А. ДАНИЛОВ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Произведен анализ эффективности системы электроснабжения собственных нужд на примере электростанции в г. Аксу (Павлодарская область, Республика Казахстан). Предложены рекомендации по повышению эффективности и приведены предполагаемые итоги внедрения данных рекомендаций.

Одной из основных задач, решаемой в промышленной электроэнергетике, является снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. В настоящее время потери электроэнергии в электрических сетях Казахстана в зависимости от класса напряжения составляют от 5 % до 20 %, что выше по сравнению с уровнями потерь в странах ОЭСР. Это обстоятельство свидетельствует об актуальности повышения эффективности транспортировки электроэнергии в Казахстане.

При реализации известных способов повышения эффективности систем электроснабжения (выбор рациональных уровней напряжений; уменьшение длин и плотностей тока в линиях электропередачи; мощности и числа трансформаторов) узловыми вопросами в области дальнейшего повышения эффективности систем являются:

1) оценка роли силовых трансформаторов напряжением 6–35/0,4 кВ с позиций энергосбережения и обеспечения качества электроэнергии, так как именно через них обеспечивается более 80 % потребности в электроэнергии;

2) исследование распространения электромагнитных помех в электротехнических системах;

3) решение проблем, связанных с использованием конденсаторных установок для компенсации реактивной мощности.

В качестве примера, под понятием «эффективное использование электроэнергии» или «повышение эффективности электроснабжения» понимают отношение теоретического минимума работы, необходимой для осуществления данного технологического процесса, к фактически затраченной полезной работе. Следует констатировать, что повышение эффективности по одной из целевых задач, как правило, приводит к повышению эффективности системы электроснабжения по одной или нескольким другим целевым задачам. Например, замена ламп накаливания или газоразрядных ламп на энергосберегающие обеспечивает снижение потребления электроэнергии в 5–6 раз и значительно повышает эксплуатационную эффективность электрических сетей, питающих эти лампы.

Собственные нужды крупных электростанций, работающих на сжигании угля, являются достаточно энергоёмкими, что определяет необходимую оптимизацию параметров их систем электроснабжения. Так, на электростанции в городе Аксу (Павлодарская область, Республика Казахстан) с установленной мощностью 2450 МВт (6 энергоблоков с мощностью 300 МВт, 2 энергоблока с мощностью 325 МВт), мощность, отдаваемая в электрическую сеть СН, составляет порядка 25 МВт на каждый энергоблок. Такая мощность соизмерима с мощностью, необходимой для среднего промышленного предприятия.

Анализ существующей системы электроснабжения собственных нужд станции показал, что при её значительной протяженности и разветвлённости, имеет место отсутствие каких-либо специальных организационных мер и технических средств по выполнению программы энергосбережения. Неоправданные потери электроэнергии определяются отсутствием устройств для компенсации реактивной мощности, использованием устаревшего парка электрических двигателей напряжением 6 кВ.

Использование устаревшего электротехнического оборудования (силовые трансформаторы 6/0,4 кВ, коммутационные аппараты) в определённой мере также снижают технико-экономические показатели системы электроснабжения .

Даже самые приближенные расчеты показывают, что потери мощности в электрической сети собственных нужд составляют порядка 3500–4200 кВт. Только при установке компенсирующих устройств в узлах нагрузки на предприятии (СН) с круглосуточным режимом работы потери мощности значительно уменьшатся и составят 1250–1700 кВт.

Отсюда следует, что в целях повышения эффективности системы электроснабжения необходимо провести глубокий анализ по выявлению причин, определяющих неоправданные потери электроэнергии, дать комплексную оценку её эффективности.

Список литературы

1. Федотов, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий : учеб. для вузов / А. А. Федотов, В. В. Каменева. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 472 с., ил.
2. Производство и распределение электрической энергии : электротехнический справочник / под общ. ред. проф. МЭИ И. Н. Орлова (гл. ред.) [и др.]. – 7-е изд., испр. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988.
3. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций : справочные материалы для курсового и дипломного проектирования : учеб. пособие для вузов / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1989.

The analysis of the efficiency of auxiliary power supply system was carried out by the example of a power plant with an installed capacity of 2,450 MW. Recommendations for improving efficiency are offered and the expected results of implementation of these recommendations are presented.

Данилов Михаил Андрианович, магистрант энергетического факультета Павлодарского государственного университета имени С. Торайгырова, Павлодар, Казахстан, kirov-sin@mail.ru.

Научный руководитель – *Волгин Михаил Евграфович*, кандидат технических наук, доцент, Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, Павлодар, Казахстан, volgin_m@mail.ru.

УДК 621.373.826

Е. О. ЕРЁМИНА

ПОЛИХРОМАТОР ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Предложена оптическая схема полихроматора изображения для спектроскопии с пространственным разрешением. Выполнен анализ качества изображения, формируемого данным прибором, показывающий возможность формирования изображений с шириной спекральных линий порядка 10 нм с приемлемым пространственным разрешением.

Одним из наиболее приоритетных направлений спектроскопии является спектроскопия с пространственным разрешением (встречается в литературе как гиперспектроскопия). Результаты исследования объектов методами спектроскопии с пространственным разрешением представлены в виде массива спектральной информации I(x, y, l), получившего название «спектрального гиперкуба» [1].

Типы гиперспектроскопии определяются способом получения спектрального гиперкуба. В настоящем докладе рассматривается метод, позволяющим получать спектральную информацию объектов, находящихся в нестационарном состоянии. Таким методом в спектроскопии с пространственным разрешением является метод мгновенной спектроскопии (в англоязычной литературе встречается как snapshot spectroscopy) [2]. Суть этого метода – получение спектрально-пространственной информации (проецирование спектрального гиперкуба на детектор) за один акт измерения.

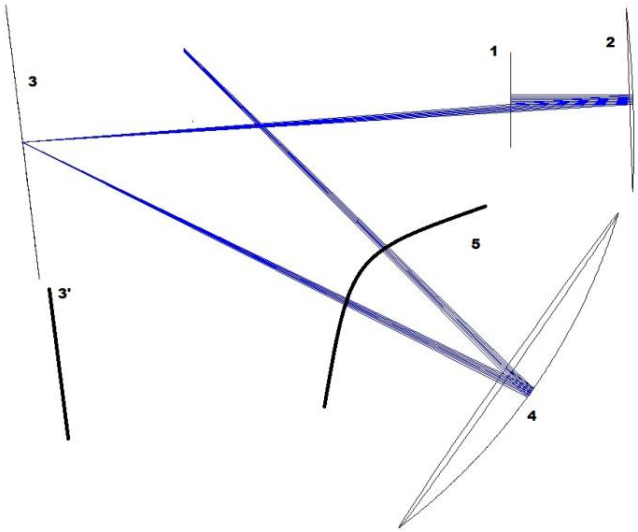
Дисперсионный прибор, позволяющий в одном акте измерения регистрировать набор квазимонохроматических изображений, уместно назвать полихроматором изображений. Некоторые чисто концептуальные предложения по схемной архитектуре имеются. В то же время очевидно, что для реализации работоспособного прибора требуется решить задачу формирования множества изображений по возможности с более высоким разрешением, но только для набора выделяемых длин волн λ_k. Решение этой задачи требует поиска схем, обеспечивающих минимальные аберрационные искажения, минимизацию дефокусировок для всех точек поля на фотоприёмнике [3].

В настоящей работе предложена оптическая схема полихроматора изображения, выполнен анализ качества изображения, формируемого прибором.

Оптическая схема строится с использованием исключительно зеркальной оптики, что снимает проблемы хроматической аберрации, а также позволяет потенциально использовать предлагаемую структуру для работы в разных спектральных диапазонах (от УФ до ИК). Рассматриваемый в настоящей работе вариант имеет спектральный диапазон 400–700 нм и ширины выделенных спектральных интервалов $\lambda_k \approx 10$ нм. Схема приведена на рисунке 1 и может рассматриваться как схема спектрографа с входной щелью *1*, коллиматорным объективом *2*, дифракционной решёткой *3* и камерным объективом *4*.

Прибор предназначен для работы с бесконечно удалёнными объектами. Особенностью схемы является расположение дифракционной решётки на расстоянии от коллиматорного объектива, равном фокусному расстоянию этого объектива. Таким образом, объектив формирует на поверхности дифракционной решётки изображение бесконечно удалённого объекта. Схема спектрографа построена как сфероцентрическая [4]: центр

сферического зеркала (камерного объектива) совпадает с центром решётки. В рассматриваемом варианте радиус зеркала выбран равным 200 мм (фокусное расстояние – 100 мм).



1 – входная щель; 2 – коллиматорный объектив; 3 – дифракционная решётка, 3' – плоскость изображения; 4 – камерный объектив; 5 – область монохроматических изображений входной щели

Рисунок 1 – Принципиальная схема полихроматора изображения

Оптическая ось зеркала наклонена на небольшой угол в плоскости, перпендикулярной плоскости дисперсии (на схеме рисунка 1 – вверх). При отсутствии дополнительных элементов такая схема передаёт изображение объекта с поверхности в плоскость *3'* непосредственно над ней. Линией *5* на рисунке показана область формирования на фокальной плоскости камерного объектива монохроматических изображений входной щели. В этой области на оптической оси пучков, отражённых от камерного зеркала, может быть размещена щель, ограничивающая спектр некоторым диапазоном $\Delta\lambda_k$, соответственно в плоскости *3'* формируется квазимонохроматическое изображение. Перемещением щели вдоль линии *5* реализуется выбор λ_k, прибор может работать как монохроматор изображения.

Для преобразования схемы в вариант полихроматора изображения вдоль линии *5* устанавливается блок спектральной селекции, составленный из отдельных узких зеркал (размер в направлении развёртки спектра порядка 2 мм), выполняющих функцию зеркальных щелей спектрального прибора. Зеркала направляют отражённые пучки в направлениях, приближённо перпендикулярных плоскости дисперсии (вверх). Каждое из зеркал имеет собственный угол наклона, обеспечивающий разведение пучков для различных λ_k и отсутствие перекрытия отдельных квазимонохроматических изображений.

Построение схемы полихроматора выполнено в редакторе Zemax. Анализ размеров пятен рассеяния (в целом менее 20 мкм) показал возможность формирования изображений с $\lambda_k \approx 10$ нм с приемлемым качеством (пространственным разрешением).

Список литературы

1. Guolan Lu, Baowei Fei, Medical hyperspectral imaging: a review, Journal Of Biomedical Optics , Atlanta, 2014.
2. Michael Eismann, Hyperspectral remote sensing, Bellingham, Washington, 2012.
3. Andrew Bodkin, A. Sheinis, A. Norton,Video-Rate Chemical Identification and Visualization with Snapshot Hyperspectral Imaging, Los Angeles.
4. Тарасов, К. И. Спектральные приборы / К. И. Тарасов. – Л. : Изд-во «Машиностроение», 1968.

The optical sheme of imaging polychromator for hyperspectroscopy is suggested. According to the image analysis of the device, it is possible to form spectral lines about 10 nm in width with the acceptable spatial resolution.

Ерёмина Екатерина Олеговна, студентка физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, verona.56@list.ru.

Научный руководитель – *Гулис Игорь Михайлович*, доктор физико-математических наук, профессор, физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, gulis@bsu.

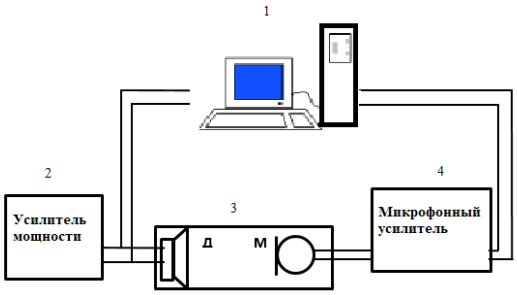
УДК 53.072

К. В. ЖУРАВСКАЯ

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ

Предложен вариант построения лабораторной работы по измерению фазовым методом скорости распространения звука, используя изготовленные усилители и бесплатное (условно бесплатное) программное обеспечение цифрового осциллографа и генератора сигналов.

Упругие волны представляют собой распространение в пространстве деформаций среды: деформаций растяжения-сжатия в продольных волнах и деформаций сдвига в поперечных. В жидкостях и газах возможны только деформации растяжения-сжатия, поэтому в них могут распространяться только упругие продольные волны. В твёрдых телах возможны оба типа деформаций, поэтому в них могут распространяться как продольные, так и поперечные волны, которые имеют разные скорости. Скорость тех и других волн зависит от упругих характеристик тела и его плотности, температуры среды, но не зависит от частоты колебания. Под скоростью, в данном случае, понимают фазовую скорость, то есть скорость распространения данной фазы колебания, например, максимума смещения точки [1]. Скорость звука экспериментально может быть определена различными методами. В настоящей работе используется измерение скорости распространения звука посредством измерения сдвига фаз. Данный метод позволяет экспериментальным путем определить длину звуковой волны λ, что позволит в лабораторных условиях вычислить скорость звука в выбранной среде. В качестве исследуемых сред были выбраны три состояния: твердое, жидкое и газообразное. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1. Установка состоит из звукового генератора (ЗГ), электронного осциллографа (ЭО), динамического усилителя (ДУ), микрофонного усилителя (МУ) и акустического волновода. При этом генератор и осциллограф реализованы программно, с использованием ресурсов стандартных аудиоинтерфейсов персонального компьютера.



1– ПЭВМ; 2 – усилитель мощности; 3 – акустический волновод; 4 – микрофонный усилитель

Рисунок 1 – Экспериментальная установка

В качестве источника звуковых волн используется электродинамическая головка. С выхода звуковой карты ПЭВМ подается электрический сигнал синусоидальной формы заданной частоты, который поступает на усилитель и, далее, на источник звука. Для усиления звукового сигнала используется усилитель мощности, работа которого заключается в преобразовании маломощного сигнала в более мощный в частотных пределах от 16 Гц до 20 кГц. В качестве такого усилителя используется усилитель на микросхеме TDA 2030. Интегральная микросхема TDA 2030 предназначена для изготовления усилителей класса АВ. Это наиболее известный класс усилителей мощности низкой частоты [3]. Работа выходного каскада в режиме АВ обеспечивает достаточно высокий КПД и минимальные искажения. Микросхема TDA 2030 в используемом динамическом усилителе обеспечивает выходную мощность 10–12 Вт на нагрузке 4 Ома и при напряжении питания от 12 до 36 В [2].

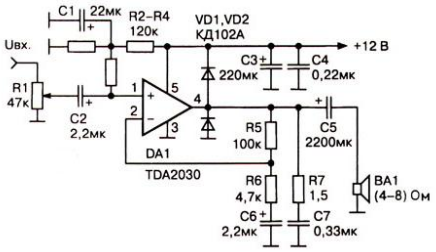


Рисунок 2 – Схема электрическая принципиальная усилителя мощности

Принимает звуковую волну конденсаторный микрофон, который расположен на другом конце акустического волновода. В качестве микрофонного усилителя был выбран усилитель низкой частоты на основе JRC4558D.

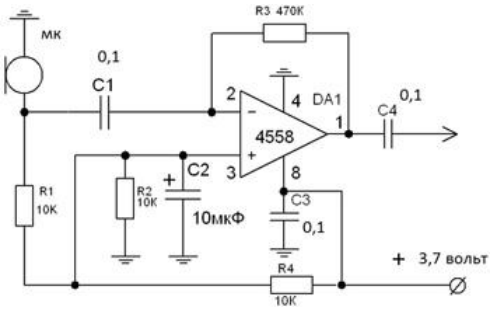


Рисунок 3 – Схема электрическая принципиальная микрофонного усилителя

В акустическом волноводе устанавливается режим бегущей волны. Динамик возбуждает колебания частиц воздуха, порождая в воздухе сгущения и разрежения частиц, которые движутся по направлению распространения волны со скоростью *v*. Звуковые волны достигают микрофона *M* и порождают в его цепи переменное напряжение той же частоты *v*, которую излучает динамик. Сравнение осциллограмм излученного и принятого сигнала производится графически с применением популярного программного обеспечения для использования звуковой карты ПЭВМ в качестве цифрового запоминающего осциллографа.

Список литературы

1. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Т.VI : Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1986. – 736 с.
2. Radiolub.ru [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://radiolub.ru/page/usilitel-na-mikrosheme-tda2030-k174un19. – Дата доступа: 05.11.2018.
3. Joyta.ru [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.joyta.ru/5809-mikrosxema-usilitel-tda2030-opisanie/. – Дата доступа: 05.11.2018.

Proposed laboratory work for measuring the speed of sound, using the phase method and made by the author amplifiers and free software digital oscilloscope and signal generator.

Журавская Карина Валерьевна, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, sa451giu32@mail.ru.
Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, german@grsu.by.

УДК 621.396

Ю. Ю. ЖУКОВСКИЙ, В. И. КУРГАНСКИЙ, Е. В. ЖУК

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ КЛИЕНТОВ В СФЕРЕ УСЛУГ

Представлен процесс исследования улыбок, являющихся критерием оценки качества услуг. Чем больше клиент улыбается, тем качественнее обслуживание.

Исследования показывают, что важен эмоциональный след, который остается у клиентов от полученных услуг. Чтобы им управлять, его нужно измерять [1]. Измерив время, в течение которого клиенты улыбаются, получаем показатель качества обслуживания клиентов [2].

В данном исследовании в качестве параметра, характеризующего счастливое состояние человека, была выбрана улыбка. Для проведения эксперимента по определению уровня счастья, необходимо измерить смещение губ и время, в течение которого оно наблюдалось. Определяя длины векторов смещения крайних точек губ (маркеры 48 и 54 на рисунке 1), можно получить сигнал дискретного времени, соответствующий среднему смещению во время появления улыбки.

Выполняя нормализацию смещения, получаем модифицированную формулу для её среднего значения:

$$D_l(t_k) = \frac{\left(p\left(l_{48}(1), l_{48}(k)\right) + p\left(l_{54}(1), l_{54}(k)\right)\right)/2}{p\left(l_{48}(1), l_{54}(1)\right)},$$

где $\rho(l_m(k+1), l_m(k) = \sqrt{\Delta x_{k+1,k}{}^2 + \Delta y_{k+1,k}{}^2}$ – длина вектора, определенная с использованием евклидова расстояния для положения ориентира в момент времени k и $k + 1$.

Это выражение позволяет учитывать среднее смещение относительно начального положения губ. Оно удобно, поскольку не зависит от размера лица. Далее получаем дискретные значения смещений маркеров губ для каждого кадра, которые хранятся в специальной базе данных улыбок. Для получения характеристики улыбки используется обработка массива маркеров выражения улыбки. Полученные временные значения показывает, как долго улыбался клиент и улыбался ли вообще. Исходя из формулы, можно строить статистику удовлетворенности покупателей.

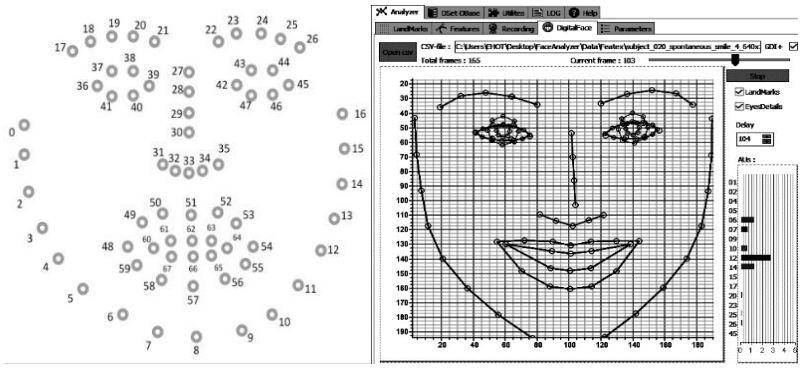


Рисунок 1 – Маркеры и их использование для детектирования улыбки

Данная технология может применяться не только в области продаж, для анализа удовлетворенности клиентов, но и в области маркетинговых исследований – для изучения привлекательности товаров потребления, в области исследования качества рекламы, а также при исследовании харизматических качеств персонала, принимаемого на работу в сферу торговли.

Список литературы

1. Распознавание эмоций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://vc.ru/marketing .
2. Smile-Index [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://911.prolan.ru/technology/smile-index.html.

This work presents the process of smiles research, which are the criterion for assessing the quality of services.

Жуковский Юрий Юрьевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, yura-921@mail.ru.
Курганский Вячеслав Игоревич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kurganskivyacheslav@gmail.com.
Жук Елизавета Васильевна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, elizabeth.zh@mail.ru.
Научный руководитель – *Ассанович Борис Алиевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, bas@grsu.by.

УДК 625.87:621.793

А. И. ЗАНЬКО, А. А. ЯСЮНАС

ПОЛУЧЕНИЕ ПЛЁНОК SiO_2 МЕТОДОМ CVD С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛОСКОГО ИСТОЧНИКА ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЫ

Разработана технология химического осаждения диоксида кремния из парогазовой смеси в плазме высокой плотности. Описан реактор для CVD осаждения. Представлены результаты экспериментальных исследований параметров плёнок диоксида кремния в зависимости от режимов их получения.

В настоящее время актуальной задачей является разработка низкотемпературных методов получения диэлектрических материалов в виде тонких высококачественных пленок различного функционального назначения. Использование высокотемпературных процессов для синтеза подобных слоев приводит к

возникновению и развитию структурных дефектов в полупроводниковых структурах, термической деформации подложек, перераспределению примесей в созданных структурах, что неизбежно вызывает снижение выхода годных приборов. Одним из современных способов получения пленочных материалов является метод химического осаждения из газовой фазы (Chemical Vapour Deposition – CVD) с различными типами активации газовой фазы. Его частный случай, плазмостимулированное химическое осаждение из газовой фазы (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition – PECVD).

Метод химического осаждения из газовой фазы является одним из наиболее распространенных методов формирования тонких пленок и покрытий, применяемых в микроэлектронике (SiO_2, Si_3N_4 и др.). При использовании в данной технологии плазменной активации осаждаемых веществ (PECVD), увеличивается эффективность и скорость процесса за счет значительного снижения температур (80–350 °С). Генерация такой технологической среды осуществляют за счет подачи высокочастотного поля при частоте 13,56 МГц в источнике индуктивно связной плазмы. Образование покрытий при осаждении проходит в несколько стадий: образование в плазме радикалов и ионов, адсорбция на поверхности и перегруппировка адсорбированных атомов. Метод плазмохимического осаждения обеспечивает высокую адгезию и химическую чистоту продукта, осаждаемого из газовой фазы, позволяет наносить однородные по составу и толщине покрытия на детали сложной конфигурации.

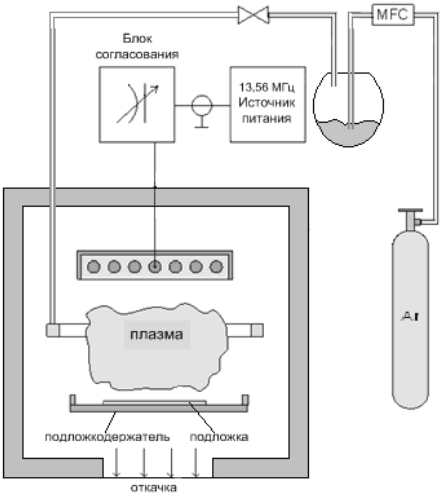


Рисунок 1 – Схема установки для осаждения диэлектрических плёнок

Для реализации метода был разработан цилиндрический реактор осаждения пленок SiO_2 для микроэлектроники, схема реактора представлена на рисунке 1. Габаритные размеры реактора позволяют обрабатывать подложки диаметром до 200 мм. Реактор представляет собой камеру с плоским генератором плазмы высокой плотности индукционного типа, работающим на частоте 13,56 МГц, блоком согласования, подложкодержателем и кольцевым газораспределителем. Для создания парогазовой смеси рабочего вещества используется газ-носитель – аргон, который пропускается через емкость с жидкообразным пленкообразующим реагентом. Поток аргона задается через регулятор расхода газа – РРГ-12.

Равномерность осаждения пленки SiO_2 зависит от параметров технологического процесса. Наиболее важными параметрами процесса являются: давление в рабочей камере, скорость и равномерность осаждения пленки. Как видно из рисунков 2 и 3, при повышении рабочего давления скорость осаждения увеличивается, а равномерность ухудшается. Это связано с повышением концентрации пленкообразующего вещества при увеличении давления, которое приводит к повышению неравномерного осаждения по краю реактора, где имеет место основной проток парогазовой смеси. На ухудшение равномерности начинают влиять газодинамические процессы, проходящие в рабочем объеме, которые зависят от геометрических параметров реактора.

Для определения из представленных графиков равномерности и максимальной скорости осаждения необходимо выбрать рабочий диаметр обрабатываемого образца (например, 190 мм), для этого диаметра на рисунке 2*б* мы находим диапазон рабочих давлений, при которых достигается равномерное осаждение, для 190 мм это давление до 5 Па. Из графика рисунка 2*а* определяем максимальную скорость осаждения – 17 нм/мин., далее находим неравномерность осаждения, она составит 2 %. Следовательно, для равномерного осаждения на образец диаметром 190 мм необходимо поддерживать рабочее давление менее 5 Па, максимальная достижимая скорость для данного диаметра осаждения составит 20 нм/мин., неравномерность составит менее 2 %.

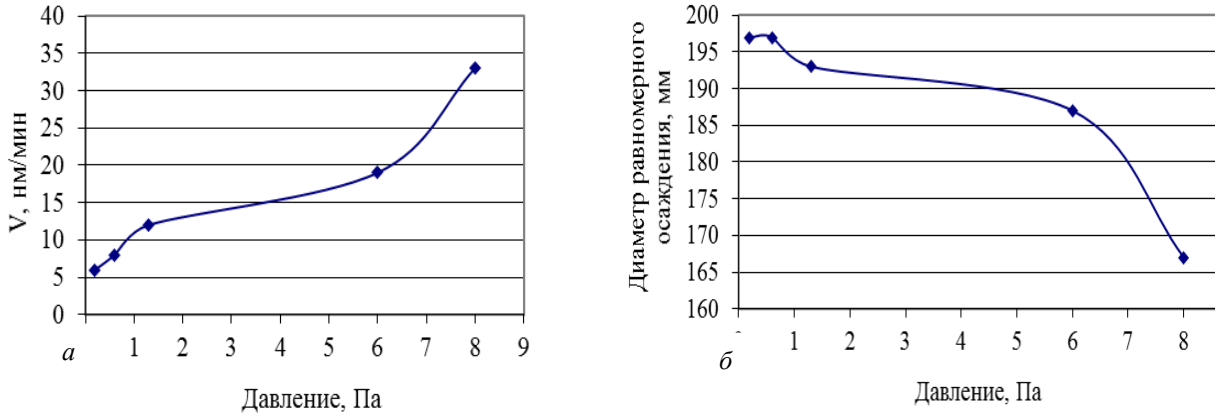


Рисунок 2 – Зависимость параметров осаждаемых плёнок от давления: а) скорость осаждения; б) равномерность

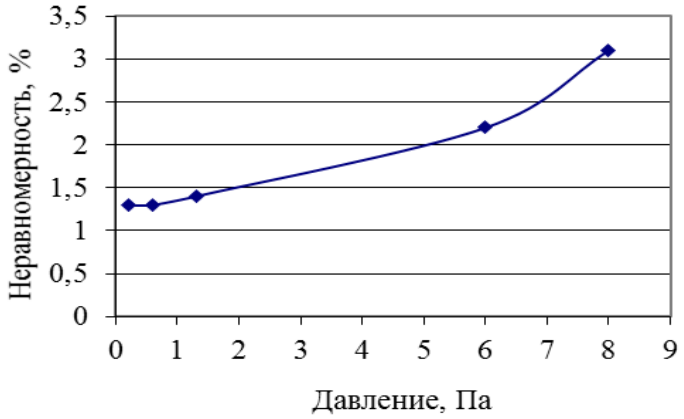


Рисунок 3 – Зависимость неравномерности осаждаемых плёнок от давления

Как видно из графиков, неравномерность осаждения составляла менее 3 % во всем диапазоне рабочих режимов на подложках диаметром 150–196 мм и менее 1,5 % – на подложках диаметром менее 190 мм. Для достижения равномерности осаждения на подложке диаметром более 200 мм необходимо использовать подложкодержатель диаметром более 235 мм. По результатам экспериментального исследования описанная технология может применяться в микроэлектронике.

Список литературы

1. Сысун, В. Источники плазмы высокой плотности на основе индукционно-связанного разряда / В. Сысун // Известия вузов. – 2000. – № 5. – С. 101–131.

2. Hittorf, W. Inductively coupled plasma / W. Hittorf // Applied Physics. – 1984. – № 21. – P. 90–139.

3. Boogaard, A. Deposition of High-Quality SiO2 Insulating Films at Low Temperatures by means of Remote PECVD / A. Boogaard, R. Roesthuis. – 2008. – С. 452–456.

The technology of silicon dioxide chemical deposition from a vapor-gas mixture in a high-density plasma was developed. A CVD deposition reactor is described. The experimental study results of the silicon dioxide films parameters depending on the modes of their production are presented.

Занько Андрей Иванович, аспирант 1 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, zanko.andrei@inbox.ru.

Ясюнас Александр Алексеевич, научный сотрудник Научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, alex.yasunas@gmail.com.

Научный руководитель – *Котов Дмитрий Анатольевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, kotov@bsuir.by.

УДК 533.9.03

Ю. В. ЗАПОРОЖЧЕНКО, Е. В. ЯЦЕВИЧ, А. В. АКСЮЧИЦ

ИЗМЕНЕНИЕ АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ В ПЛАЗМЕ АТМОСФЕРНОГО РАЗРЯДА

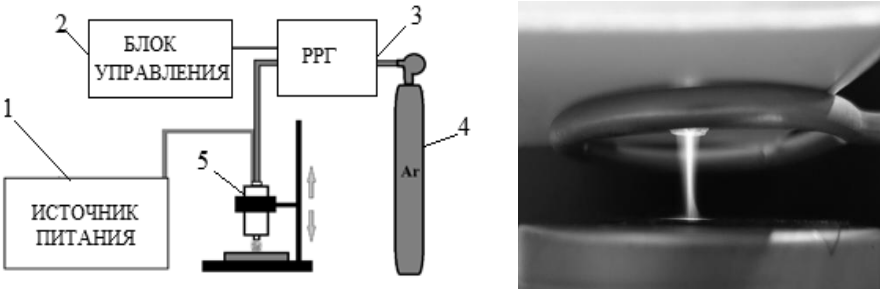
Поверхность кремниевой пластины обрабатывалась плазмой атмосферного давления. Обработка в плазме диэлектрического барьерного разряда привела к значительному увеличению адгезии. Адгезия измерялась как коэффициент трения. Зависимость коэффициента трения кремния от режимов обработки изучалась с помощью атомно-силового микроскопа.

Важную роль в науке и технике занимают процессы очистки поверхностей подложек и деталей различной природы, а также их модификация перед последующими технологическими процессами. Перспективной является обработка в плазме диэлектрического барьерного разряда при атмосферном давлении. Ее важнейшей особенностью являются сочетание достоинств традиционной ионно-плазменной обработки с низкой себестоимостью таких процессов, обусловленной отсутствием необходимости в дорогостоящем вакуумном оборудовании.

Оценка изменения поверхностной адгезии кремния производилась на основе расчета сил воздействующих на кантилевер атомно-силового микроскопа.

Для проведения плазменной обработки использовался экспериментальный комплекс, состоящий из разрядной системы, системы питания и системы подачи рабочего газа (рисунок 1*а*).

Диэлектрический барьерный разряд формировался в устройстве коаксиального типа (рисунок 1*б*). Данная разрядная система позволяет формировать плазменный факел длиной до 3 см, с зоной обработки диметром в 1 см. В качестве плазмообразующего газа используется аргон.



а *б*

1 – источник питания; 2 – блок управления индикации и питания; 3 – регулятор расхода газа; 4 – баллон; 5 – разрядная система

Рисунок 1 – Схематичное изображение экспериментального комплекса (а) и фото плазменного факела (б)

Оценка величины адгезии поверхности монокристаллического кремния проводилась на основе определения коэффициента трения с помощью атомно-силового микроскопа NT-206 [1].

Активация поверхности заключается в формировании химически активного поверхностного слоя за счет образования оборванных связей в процессе обработки. Для количественного описания влияния плазмы атмосферного разряда на свойства поверхности кремния проводилось исследование зависимости изменения коэффициента трения от времени обработки (при фиксированном расстоянии от источника плазмы) и от расстояния от источника плазмы до обрабатываемой поверхности (при фиксированном времени обработки).

Обработка проводилась при мощности разряда $P \approx 25$ Вт, расходе плазмообразующего газа $L \approx 300$ л/ч.

Для исследования зависимости усиления эффекта от длительности обработки, время обработки варьировалось от 1 до 5 минут с интервалом в одну минуту. Расстояние между торцом разрядной системы и образцом – 10 мм. На основании полученных экспериментальных измерений атомно-силового микроскопа, путем усреднения значений отклонений зонда при проходе в прямом и обратном направлении, построен график зависимости коэффициента трения от времени обработки (рисунок 2).

Из представленной на рисунке 2 зависимости следует, что основной эффект от обработки достигается за 3 минуты, а далее наблюдается насыщение. Поэтому целесообразно производить обработку поверхности кремниевой пластины в течение не более 3–4 минут. Дополнительное увеличение времени обработки требует дополнительных затрат энергии без значительного увеличения адгезии.

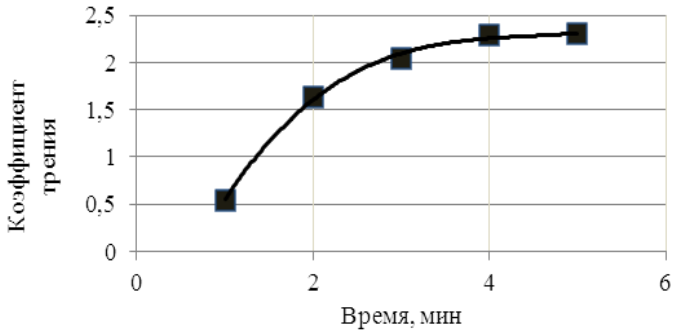


Рисунок 2 – График зависимости коэффициента трения от времени обработки

Исследование зависимости коэффициента трения от расстояния между торцом разрядной системы и образцом проводилось при обработке в течение 4 мин. Расстояние изменялось в пределах от 5 до 35 мм.

Приведенная на рисунке 3 экспериментальная зависимость показывает наличие экстремумов. Это говорит о разных условиях обработки вдоль по сечению плазменного факела. Поэтому максимальное изменение коэффициента трения наблюдается при обработке на расстоянии 2–2,5 см. Данное расстояние соответствует видимой длине плазменного факела.

Рисунок 3 – График зависимости коэффициента трения от расстояния

Такая зависимость, вероятно, обусловлена увеличением количества активных частиц в формируемом потоке при движении газа от торца разрядной системы.

В результате экспериментальных исследований зависимости силы трения от времени обработки установлено, что основной эффект от обработки достигается за 3–4 минуты. Это показывает, что обработка имеет большую эффективность при малых затратах энергии. Также проведены исследования зависимости сил трения поверхности кремния при обработке в разных частях факела. Результаты показали, что максимальный эффект достигается на расстоянии 20–25 мм.

Список литературы

1. Методическое пособие по выполнению лабораторной работы «Определение коэффициента трения различных поверхностей МЭМС-акселерометра производства НИИ радиоматериалов». – Минск : БНТУ, 2017. – 12 с.

The silicon wafer surface was processed by atmospheric pressure plasma. Atmospheric plasma treatment resulted in a significant increase in adhesion. The adhesion was measured as a coefficient of friction. The dependence of the friction coefficient of the silicon on the treatment modes was studied by the atomic force microscope.

Запорожченко Юлия Владимировна, магистрант кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, yliyazaporozchenko@gmail.com.

Яцевич Екатерина Вадимовна, магистрант кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, k_yatsevich@mail.ru.

Аксючиц Александр Владимирович, магистрант кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, alex.ak11996@mail.ru.

Научный руководитель – *Котов Дмитрий Анатольевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, kotov@bsuir.by.

УДК 621.311

Р. С. КАДАЧ

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АРТЕЗИАНСКИХ СКВАЖИН В д. НОВАЯ ГОЖА

Система водоснабжения представляет собой комплекс сооружений для обеспечения определенной группы потребителей водой в требуемых количествах и требуемого качества. Кроме того, система водоснабжения должна обладать определенной степенью надежности, т. е. обеспечивать снабжение потребителей водой без недопустимого снижения установленных показателей своей работы в отношении количества или качества подаваемой воды (перерывы или снижение подачи воды или ухудшение ее качества в недопустимых пределах) [1].

После того как будет определен необходимый объем водопотребления объекта и будут собраны сведения о возможных для использования природных источниках, может быть выбран источник и намечена схема водоснабжения.

Система водоснабжения (населенного места или промышленного предприятия) должна обеспечивать получение воды из природных источников, ее очистку, если это вызывается требованиями потребителей, и подачу к местам потребления. Для выполнения этих задач служат следующие сооружения, входящие обычно в состав системы водоснабжения: водоприемные сооружения, при помощи которых осуществляется прием воды из природных источников; водоподъемные сооружения, т. е. насосные станции, подающие воду к местам ее очистки, хранения или потребления; сооружения для очистки воды; водоводы и водопроводные сети, служащие для транспортирования и подачи воды к местам ее потребления; башни и резервуары, играющие роль регулирующих и запасных емкостей в системе водоснабжения.

Общая схема водоснабжения может видоизменяться в зависимости от конкретных условий. Если, например, вода источника не требует очистки, из схемы выпадают очистные и связанные с ними сооружения. При расположении источника на более высоких отметках, чем снабжаемый водой объект, вода может быть подана самотёком, и поэтому нет необходимости в устройстве насосных станций. Расположение водонапорных башен и резервуаров зависит от рельефа местности. В некоторых системах используется несколько источников водоснабжения, что ведёт к увеличению числа основных сооружений. При большой разности отметок на территории объекта иногда устраивают так называемое зонное водоснабжение, т. е. отдельные сети для районов города, расположенных на разных отметках, с отдельными насосными станциями. Иногда сооружают повысительные насосные станции, забирающие воду из основной сети города и подающие её в возвышенные районы.

В деревне Новая Гожа на данный момент существует две артезианские скважины для населения без насосных станций, сооружений для очистки воды и водонапорных башен. Включение насосов осуществляется посредством электроконтактного манометра – это простой и надёжный прибор для управления насосом в зависимости от изменяемого давления. Электроконтактный манометр представляет собой обычный стрелочный манометр, дополненный двумя стрелками, задающими величину давления включения и величину давления отключения, и контактными группами, замыкающими или размыкающими основной стрелкой. Такой способ управления насосам морально устаревший, т. к. при изменении давления в системе электродвигатель насоса постоянно отключается и обратно включается, следовательно, большое количество раз используются пусковые токи (максимальные токи при работе электродвигателя), также это уменьшает ресурс его работы.

Для модернизации энергосистемы артезианских скважин необходимо старые погружные насосы заменить новыми, для их выбора необходимо знать:

– глубину скважины – расстояние от поверхности земли до дна;
– диаметр скважины;
– дебет скважины (производительность);
– статический уровень воды;
– динамический уровень;
– напор насоса. Для его определения необходимо воспользоваться формулой:

$$H = H_{гео} + H_{потер} + H_{своб},$$

где H – значение требуемого напора погружного насоса; $H_{гео}$ – перепад высот между местом нахождения насоса и наивысшей точкой системы водоснабжения; $H_{потер}$ – сумма всех потерь в трубопроводе (трение воды о материалы труб, а также давление на поворотах труб и в тройниках, как правило составляет 10 % расстояния трубопровода); $H_{своб}$ – свободный напор на излив (для комфортного пользования сантехприборами данное значение необходимо брать 15–20 м, минимальное допустимое значение 5 м).

Для лучшего контроля водоснабжения, снижения затрат на обслуживающий персонал и повышения эффективности электрооборудования используются системы автоматизации и диспетчеризации. Автоматизация необходима для адекватного управления погружным насосом, а также для контроля его состояния.

Диспетчеризация служит для отдалённой связи между оборудованием и персоналам, которая осуществляется посредством GSM связи [2].

Для того чтобы продлить ресурс электродвигателя, а также снизить расходы на электроэнергию, вместо электроконтактного манометра в данный момент используются высокочастотные преобразователи. При этом снижаются пусковые токи в 4–5 раз, обеспечивается плавный пуск асинхронного электродвигателя; а при повышении давления он уменьшает обороты электродвигателя, но не отключает его, тем самым минимизируется количество пусковых токов.

В подземной воде Республики Беларусь наблюдается повышенное содержание железа (до 20 мг/л), а также других соединений, которые ухудшают ее показатели и свойства. Технические нормативно-правовые акты Республики Беларусь регламентируют содержание железа в питьевой воде не более 0,3 мг/л [3].

В нашей стране наиболее распространенным методом для очистки воды от железа является установка станций обезжелезивания. Обезжелезивание воды – это её фильтрование через зернистую загрузку с предварительной глубокой либо упрощенной аэрацией. Регенерация фильтров осуществляется водовоздушной либо водяной промывкой. При этом доля воды, расходуемой для промывки, может достигать до 10 % от общего расхода очищаемой воды.

В случае аварии на трансформаторной подстанции и отключения основного источника питания во вводное устройство скважин устанавливается розетка для подключения передвижной дизельной электростанции.

Электрическая схема питания артезианских скважин и станции обезжелезивания представлена на рисунке 1.

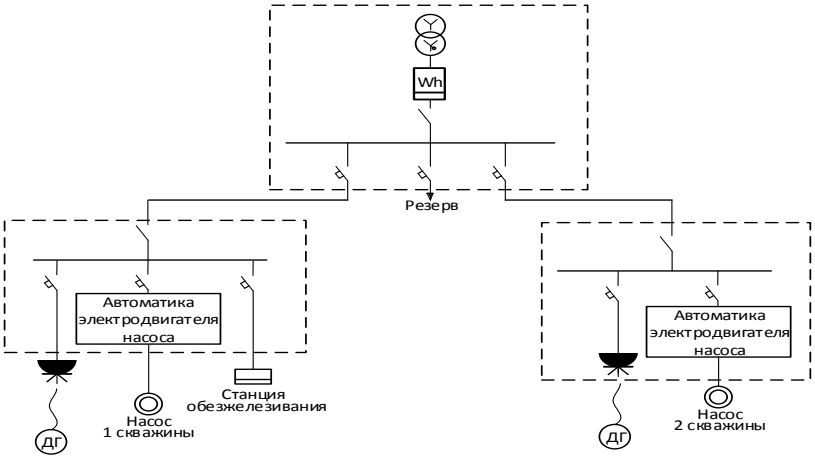


Рисунок 1 – Схема электроснабжения артезианских скважин

Для обеспечения подачи воды в трубопровод системы потребителя под давлением используются водонапорные башни, ёмкость которой равномерно распределяет подачу воды при одновременно большом потреблении. Также водонапорные башни служат резервным источником водообеспечения потребителей при возникновении неисправностей или аварийном отключении электропитания до приезда аварийной бригады с дизельной электростанцией [4].

Данная система водоснабжения снижает расходы на электроэнергию, упрощает контроль за скважиной и снижает расходы на обслуживающий персонал. Кроме того, обеспечивает потребителей водой лучшего качества при бесперебойном поступлении.

Список литературы

1. Абрамов, Н. Н. Водоснабжение / Н. Н. Абрамов. – М. : Стройиздат, 1974. – 480 с.
2. Зуев, К. И. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения / К. И. Зуев. – Владимир : ВлГУ, 2016. – 224 с.
3. Первов, А. Г. Технологии очистки природных вод / А. Г. Первов. – М. : АСВ, 2016. – 600 с.
4. Принцип работы водонапорной башни [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://yarsmp.ru/page/water-tower-work-principle. – Дата доступа: 01.12.2018.

This article is about modernization of the electrical supply with the help of modern technologies. The author showed the modernization of the system of electricity supply.

Кадач Руслан Сергеевич, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, Ruselkadach@mail.ru.

Научный руководитель – *Ситкевич Татьяна Анатольевна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, sittan@tut.by .

УДК 620.199

А. А. КАЛИНОВ, Е. Г. КЛЁНИН

ТЕРМОРЕГУЛЯТОР ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ НА КОРРОЗИЙНУЮ СТОЙКОСТЬ

Разработан и изготовлен терморегулятор, который входит в состав автоматизированной установки для проведения испытаний образцов на коррозийную стойкость. Изготовленный модуль поддерживает необходимую температуру раствора, имеет возможность установки гистерезиса, позволяет использовать нагреватели с мощностью до 4 кВт.

В лабораториях часто возникает потребность исследования коррозийной стойкости образцов [1]. Для этого материалы нужно подвергать продолжительному, циклическому влиянию агрессивных сред. С данной задачей справляется «Автоматизированная установка для проведения испытаний на коррозийную стойкость» [2]. Поскольку испытания должны проводиться при постоянной температуре, то данная установка должна быть оснащена терморегулятором.

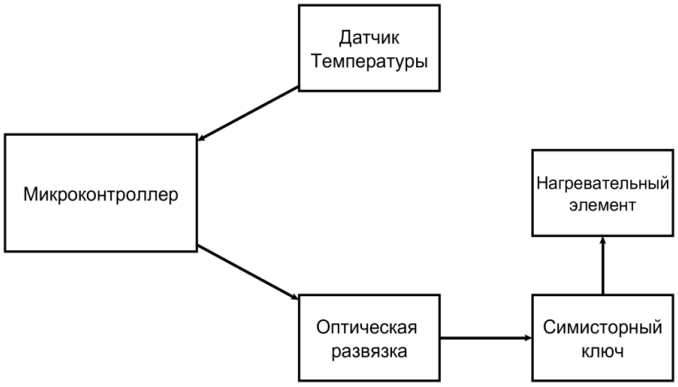


Рисунок 1 – Блок-схема терморегулятора

Для реализации устройства, в качестве основного управляющего элемента был выбран микроконтроллер компании Atmel – ATmega 328P [3]. Для получения значений температуры раствора используется датчик Dallas DS18B20 с диапазоном измерений от –55 до +125 °С. Для нагрева емкости с раствором допускается использовать электрическую плитку с мощностью до 4 кВт. Для коммутации нагревательного элемента используется симистор BTA24-600CWRG. Программа для микроконтроллера написана на языке «С», алгоритм представлен на рисунке 3.

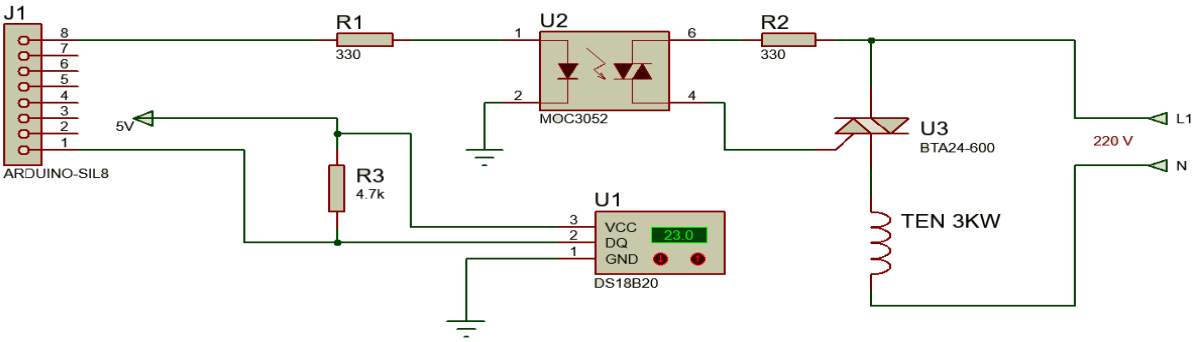


Рисунок 2 –Электрическая схема терморегулятора

Данное устройство будет использоваться в научной лаборатории рентгеноструктурного анализа кафедры общей физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы и позволит упростить и автоматизировать процесс определения коррозионной стойкости материалов, а также процесс изготовления печатных плат.

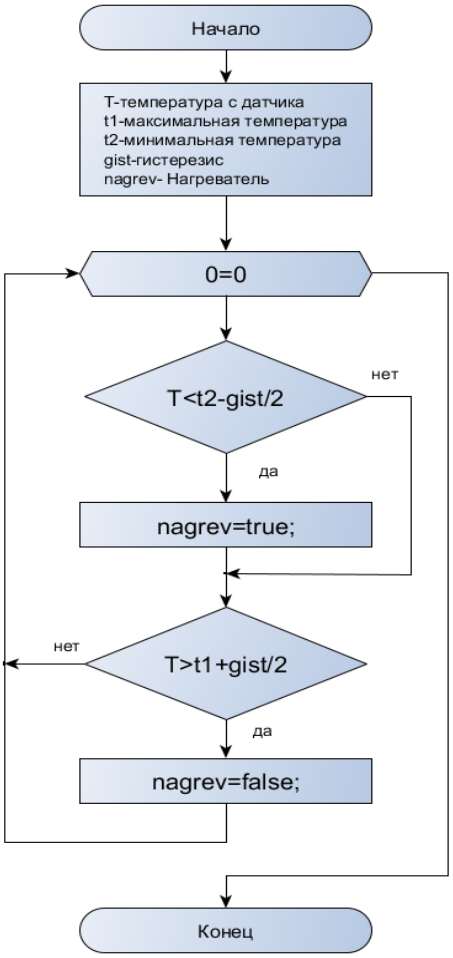


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма

Список литературы

1. Studfiles [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа: http://www.studfiles.ru/preview/6144952/page:4/. – Дата доступа: 14.04.2017.

2. Калинов, А. А. Автоматизированная установка для испытания образцов на коррозийную стойкость / А. А. Калинов // Физика конденсированного состояния : материалы XXVI междунар. науч.-практ. конф. аспир., магистр. и студ. (Гродно, 20 апр. 2018 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2018. – С. 160–162.

3. Atmel [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа: http://www.atmel.com/ru/ru/. – Дата доступа: 22.11.2016.

4. Калинов, А. А. Программно-аппаратный комплекс для удаленного мониторинга состояния помещений / А. А. Калинов // Физика конденсированного состояния : материалы XXV междунар. науч.-практ. конф. аспир., магистр. и студ. (Гродно, 19 апр. 2017 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2017. – С. 182–183.

5. Герман, А. Е. Основы автоматизации эксперимента : лабораторный практикум / А. Е. Герман, Г. А. Гачко. – Гродно : ГрГУ, 2005.

During the work, a thermostat was developed and manufactured, which is part of an automated installation for testing samples for corrosion resistance. The manufactured module maintains the required temperature of the solution, has the ability to install hysteresis, allows the use of heaters with a capacity of up to 4 KW.

Калинов Александр Алексеевич, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kalinovsasha@yandex.ru.

Клёнин Егор Германович, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, e_g1gor@mail.ru.

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

УДК 004.021

П. А. КЕДАЛО

МОДЕЛЬ И ЭКСПЕРИМЕНТ МНОГОУРОВНЕВОГО ДОСТУПА К МЕДИЦИНСКИМ ДАННЫМ

Целью исследования является разработка электронной медицинской карты и сервиса для управления и организации работы в медицинском учреждении, поэтому было решено произвести эксперимент, связанный с безопасностью доступа к медицинским данным, чтобы использовать полученные результаты в дальнейшей работе. Приведены модель и алгоритм организации доступа к медицинским данным, описаны результаты эксперимента, демонстрирующего безопасность процедур доступа.

Существует множество алгоритмов для шифрования и доступа пользователя к данным, под доступом к данным имеется в виду вход пользователя на ресурс, с целью получения данного доступа. На рассмотрении были следующие варианты авторизации:

1) с помощью логина и пароля;
2) с помощью логина, пароля и sms-оповещения;
3) с помощью логина, пароля и ключа на съёмном носителе;
4) с помощью биометрических данных;

Авторизация с помощью логина и пароля не является надежным способом безопасного входа в аккаунты. Больше 80 % утечки данных происходит по причине использования ненадежных и украденных паролей, многофакторная аутентификация и одноразовые sms-коды добавляют еще один уровень безопасности, но они всё равно являются уязвимым способом авторизации, дополнительный ключ на сьёмном носителе увеличивает безопасность ещё на один уровень, но не все устройства имеют возможность работать со сьёмным носителем и для работы этого метода требуется дополнительный программное обеспечение и особые условия на устройстве, без которых, данный метод не будет функционировать.

4 марта 2019 года проходил консорциум W3C и FIDO Alliance, на нём объявили о том, что спецификация WebAuthn является официальным web-стандартом для безопасного входа с помощью мобильных устройств. Данное нововведение является значительным шагом к повышению безопасности входа с мобильного устройства.

Спецификация WebAuthn предполагает использование для входа в учетные записи наиболее удобных для пользователей устройств. Согласно новому стандарту, мобильные приложения и Web-сервисы должны включать данную функцию, чтобы пользователи имели возможность войти в систему с помощью мобильных устройств, биометрических данных или ключей безопасности Fast IDentity Online.

Изучив спецификацию WebAuthn, а также недостатки этого варианта авторизации, было выявлено, что биометрические данные имеют шумы, которые могут затруднить доступ к аккаунту, но идея хранения индивидуального клиентского хэша на каждом устройстве локально делает авторизацию более безопасной, так как эта конфиденциальная информация никогда не хранится на сервере и не покидает устройство пользователя. Для создания более безопасного входа требуется многоуровневый доступ, то есть помимо локальных данных нужны данные на сервере, такие как пароль и дополнительный хэш пользователя. Поскольку авторизация с помощью ключа на стороннем носителе является очень безопасным способом, то были учтены недостатки и рассмотрен вариант с хранением ключа, то есть хэш-файла на облачном сервере пользователя. Поскольку на данный момент такие сервисы как gmail.com, mail.ru, yandex.ru создаёт площадки, которые являются полноценными помощниками пользователей во многих сферах, и каждый пользователь получает достаточно большой функционал, включая почтовые сервисы, сервисы для передвижения, мобильные помощники, облачные хранилища, социальные сети, сервисы оплаты, то эти сервисы были рассмотрены как один из вариантов многоуровневой авторизации, включая хранение хэш-файла на личных облачных хранилищах каждого пользователя. Из всего вышеперечисленного были сделаны выводы и создана концепция и модель многоуровневого доступа к медицинским данным. Первый этап создания многоуровневого доступа заключается в авторизации через один из интерфейсов gmail.com, mail.ru, yandex.ru средствами официального API. Схема авторизации показана на рисунке 1.

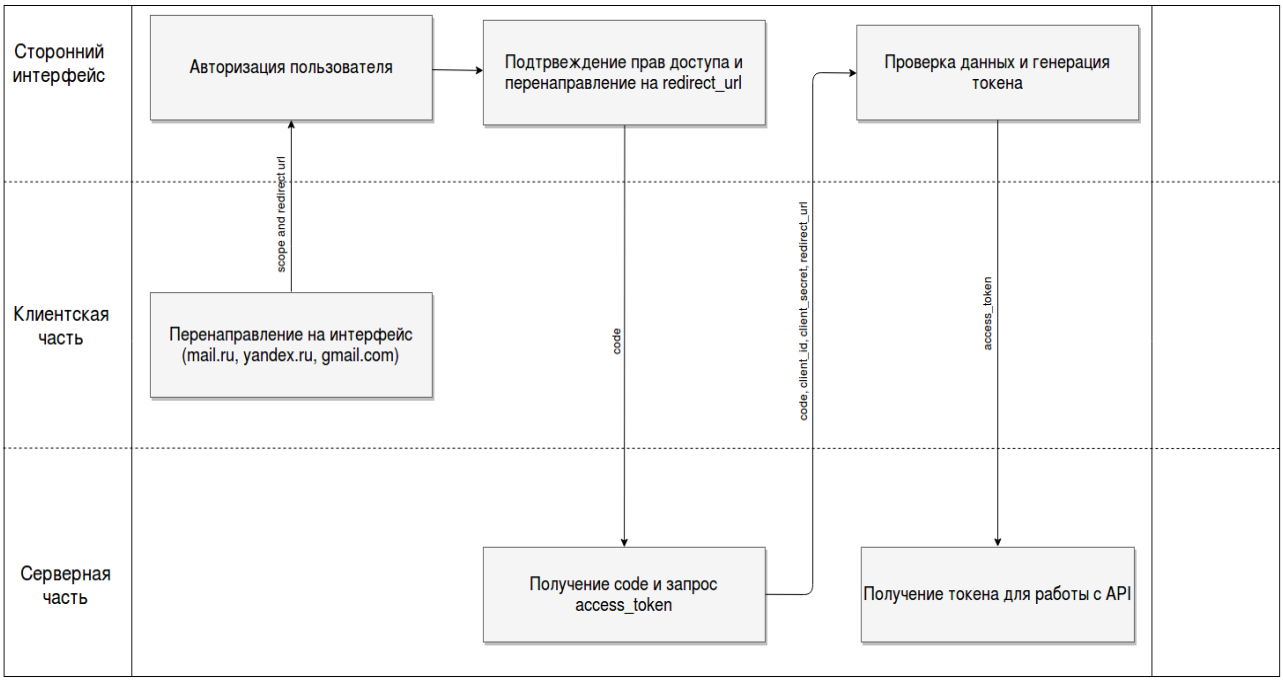


Рисунок 1 – Схема авторизации через сторонний интерфейс

Второй этап – пользователь с помощью произвольного движения курсором мыши, произвольных кликов мыши или touch на мобильных устройствах, создаёт локальный хэш, эти данные передаются на сервер, где повторно хэшируется с помощью случайных данных и для определённого user agent data создаётся ключ(хэш-файл) на облачном диске пользователя в том сервисе, через который он авторизовался. Локальный хэш хранится только в браузере или устройстве, с помощью которого выполнялась авторизация пользователем. Данный хэш-файл будет использоваться в дальнейшем для авторизации.

В ходе эксперимента программно был получен локальный хэш 04d439c3094481cb92c-27a7ef720288-a4afe854b963499de87a0c9627f66f324ff34c224f5f9f3cc9a2f705f2f8edc1cafc52478bcf13b6d91ea67dc8b857e5f и сохранён в браузере, далее программно был создан в облачном хранилище Google Drive openSSL хэш-файл размером 2048 bit 2ecc8a5ae2f27419c3f4ecf0d39d98bd863d82448ac8596e8c0f12e24ab94184b459fa4ccf61ad23-ffd0f7d055571a1752295749935fba10ab499c2a3ad78a07.key, которые в дальнейшем использовались для авторизации.

Третий этап – после успешно созданного хэш-файла пользователь заполняет форму регистрации и на указанный номер телефона генерируется, поступает sms с паролем для одного из этапов многоуровневого доступа. Схема первичного входа/регистрации показана на рисунке 2.

После того как пользователь прошёл регистрацию, он сможет авторизоваться, сделав следующие шаги:

1. Вход на ресурс с помощью gmail.com, mail.ru, yandex.ru, на стороне сервера проводится проверка user agent data и хэш-файла на облачном диске данного аккаунта, в алгоритм проверки входит локальный хэш пользователя.

2. Ввод пароля.

Также возможно добавить новую точку входа, для этого нужно будет после входа с помощью gmail.com, mail.ru, yandex.ru сгенерировать новые хэши и хэш-файл для данной точки доступа, но для этого шага нужно будет ввести sms-код, который поступит на телефон пользователя. Аналогичные действия нужны будут при утере пароля, только после ввода sms-код на номер мобильного телефона придёт новый сгенерированный пароль. Возможно удалить старые точки входа, для этого требуется авторизоваться и ввести sms-код, который поступил на телефон.

В конце стоит отметить, что данная модель безопасности устраняет все формы кражи паролей, повторных атак и риски фишинга.

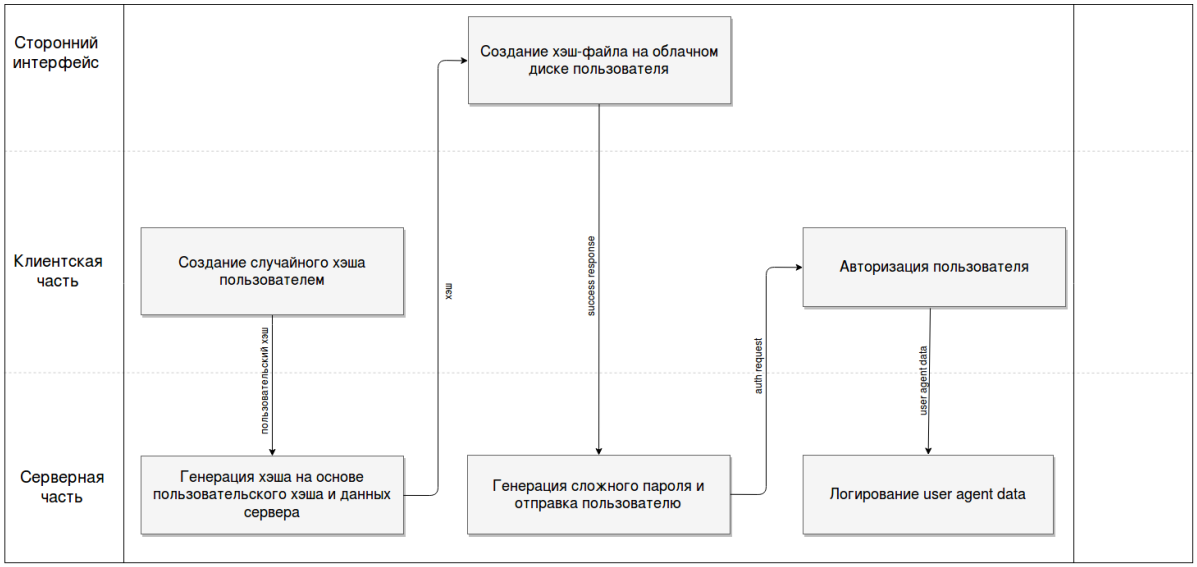


Рисунок 2 – Схема генерации хэшей и паролей

Список литературы

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.w3.org. – Дата доступа: 06.03.2019.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://habr.com. – Дата доступа: 01.03.2019.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://tproger.ru. – Дата доступа: 23.02.2019.
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://web-in-security.blogspot.com. – Дата доступа: 12.01.2019.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: acunetix.com. – Дата доступа: 07.03.2019.

A model and algorithm for organizing access to medical data and the results of an experiment demonstrating the security of access procedures have been studied in this work.

Кедало Павел Александрович, магистрант факультета математики и информатики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, p.kedalo@gmail.com.

Научный руководитель – *Ассанович Борис Алиевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, bas@grsu.by.

УДК 37.016:53

А. В. КИСЕЛЁВ

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ЗАГРЯЗНЁННОСТИ ВОЗДУХА

Раскрыто понятие мониторинга атмосферного воздуха. Рассмотрены методы мониторинга и анализа атмосферного воздуха. Проведены обзор существующих анализаторов воздуха, их применение и характеристики. Рассмотрены конструктивные характеристики анализатора воздуха.

Мониторинг атмосферного воздуха – система наблюдений за состоянием атмосферного воздуха, его загрязнением и за происходящими в нем природными явлениями, а также оценка и прогноз состояния атмосферного воздуха, его загрязнения [1].

Система мониторинга решает следующие задачи, связанные с управлением качеством воздуха:

– контроль за соблюдением государственных и международных стандартов качества атмосферного воздуха;

– получение объективных исходных данных для разработки природоохранных мероприятий, градостроительного планирования и планирования транспортных систем;

– информирование общественности о качестве атмосферного воздуха и развертывание систем предупреждения о резком повышении уровня загрязнения;

– проведение оценки воздействия на здоровье загрязнения воздуха;

– оценка эффективности природоохранных мероприятий [3].

Методы контроля загрязнения воздушной среды можно поделить на три группы: лабораторные, экспрессные и автоматические. Автоматические методы могут обеспечивать непрерывный контроль с записью результатов измерений. Лабораторные исследования и инструментальные замеры санитарно-гигиенических факторов производственной среды производятся промышленно-санитарными лабораториями предприятий. Инструментальные замеры и лабораторные исследования осуществляются по специальным методикам. Самыми точными являются лабораторные методы, при которых отбор проб производится на рабочем месте, а последующий анализ – в лаборатории. Эти методы являются высокоточными, но могут выполняться только работниками высокой квалификации и требуют много времени. Экспрессный метод основан на быстро протекающих химических реакциях с изменением цвета реактива, что дает возможность оценки концентрации вредных веществ непосредственно на рабочем месте. Экспрессные методы делятся на линейно-колориметрические и индикационные [4].

Вещества, находящиеся в воздухе, попадают в организм человека главным образом через органы дыхания. Вдыхаемый загрязненный воздух через трахею и бронхи попадает в альвеолы легких, откуда примеси поступают в кровь и лимфу [2].

Предельно допустимая концентрация (ПДК) – максимальная концентрация примеси в атмосферном воздухе, которая при периодическом воздействии или на протяжении всей жизни человека не оказывает на него вредного влияния и на окружающую среду в целом [4].

Анализатор загрязненности воздуха – датчик, который следит за чистотой воздуха. Благодаря сверхточному сенсору, прибор отслеживает малейшие частицы пыли размером до 0,3 мкм. Детектор снабжен дисплеем и аккумулятором 750 мАч, что дает возможность автономной работы. В зависимости от уровня загрязненности воздуха индикатор изменят цвет, а некоторые приборы также при обнаружении изменения качества воздуха включают очиститель [3].

По функциональности данный вид устройств можно поделить на категории:

– измерители расхода воздуха – предназначены для контроля работы и отладки систем кондиционирования, измерения скорости воздушного потока, давления и объемного расхода;

– счетчики пылевых частиц – предназначены для контроля работы систем кондиционирования и вентиляции. Основной их функцией является определение концентрации в воздухе взвешенных твердых частиц, а также температуры и влажности рабочего помещения;

– измерители концентрации CO и CO_2 – являются востребованными в производственных цехах, но также используются в офисных и жилых помещениях для контроля микроклимата;

– приборы для измерения температуры, влажности и давления – основной областью применения является диагностика работы газового оборудования и систем отопления;

– универсальные приборы для определения качества воздуха – сочетают функции нескольких устройств [3].

Приборы контроля качества воздуха отличаются друг от друга по конструктивным характеристикам, например, одни имеют встроенный зонд, а другие – сменный. Устройства с несъемным зондом компактны по размеру и узконаправлены, а универсальные используются с различными по роду датчиками, что, в свою очередь, расширяет их сферу применения [3].

Большинство моделей приборов оценки качества воздуха оснащено функцией сохранения данных во внутренней памяти, что упрощает последующую обработку информации.

Приборы оснащены широким набором средств коммуникации: как стандартными портами соединения с компьютером, так и беспроводными модулями связи для вывода информации, а программное обеспечение позволяет составить отчет об произведенных измерениях [3].

Легкодоступным примером сенсора прибора оценки загрязненности (качества) воздуха является инфракрасный датчик MH-Z19, предназначенный для определения уровня углекислого газа в воздухе. Он обладает высокой чувствительностью, высокой точность измерений, широким диапазоном, низким энергопотреблением, имеет компенсацию температуры, готовые значения PPM (одна миллионная часть величины) на выходе.

Принцип работы датчика основан на изменении интенсивности ИК излучения до и после поглощения в инфракрасном детекторе с избирательной чувствительностью. Поглощение ИК излучение является физическим процессом, не зависящим от кислорода, обладает хорошей устойчивостью к вибрациям и помехам. ИК датчики обладают высокой точностью, хорошей избирательностью, высокой чувствительностью и надежностью, быстрый отклик и линейность в широком диапазоне (0–100 %).

Встроенный датчик температуры может быть использован для компенсации температурной зависимости. Миниатюрный ИК датчик газа сочетает в себе технологию инфракрасного метода детектирования газа и микропроцессорную схемотехнику.

На основе изученных методов мониторинга атмосферного воздуха, проведенного обзора конструктивно-элементной базы анализатора загрязненности воздуха может быть рассмотрена возможность создания данного устройства на элементной базе: датчик пыли PMS5003, датчик формальдегида ZE08-CH20, датчик CO_2 MH-Z19 и контролер ESP8266 dev kit 1.

Список литературы

1. Горелин, Д. О. Мониторинг загрязнения атмосферы и источников выбросов / Д. О. Горелин, Л. А. Конопелько. – М. : Изд-во стандартов, 1992. – 432 с.

2. Мазулина, О. В. Экологический мониторинг атмосферного воздуха / О. В. Мазулина, Я. В. Полонский. – Волгоград, 2012.

3. Якунина, И. В. Методы и приборы контроля окружающей среды. Экологический мониторинг : учеб. пособие / И. В. Якунина, Н. С. Попов. – Тамбов : Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2009. – 188 с.

4. Муртазов, А. К. Экологический мониторинг. Методы и средства : учеб. пособие / А. К. Муртазов. – Рязань : Изд-во Рязан. гос. ун-та им. С. А. Есенина, 2008. – 146 с.

The concept of atmospheric air monitoring is revealed. Considered methods of monitoring and analysis of atmospheric air. A review of existing air analyzers, their application and characteristics. Considered constructive characteristics of the air analyzer.

Киселёв Александр Валерьевич, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, sania.kisel@mail.ru.

Научный руководитель – *Ситкевич Татьяна Анатольевна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

УДК 621.311

С. А. КИСЕЛЬ

МОДЕРНИЗАЦИЯ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГРОДНЕНСКОГО ОБЛИСПОЛКОМА НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВВОДА РЕЗЕРВА

Рассмотрен один из способов обеспечения защиты и ввода резерва для административного здания. Изложена целесообразность ввода резерва. Актуальность работы состоит в обеспечении надёжности электроснабжения, что приводит к сохранности информационных данных.

Каждое административное здание относится к потребителям I категории электроснабжения, так как спецификой здания предусмотрены частые аудио-, видеоконференции, важные совещания и прямые линии с представителями руководящих должностей нашей страны. Сбой электроснабжения в здании может привести к обрыву совещаний среди административного аппарата, потере информационных данных относящихся к различным сферам экономической деятельности по всей области. Для обеспечения надежного питания здания электроэнергией, необходимо предусмотреть схему с двумя основными питающими линиями напряжением 0,4 кВ, а также резервным источником питания, независимым от основной сети. Для этого необходимо существенно усложнить, а так же обезопасить существующую схему. Контроль и управление работой схемы обеспечится посредством установки щита автоматического ввода резерва (далее АВР) с соответствующим микроконтроллером и силовым оборудованием, которые и будут отвечать за надежное обеспечение электроэнергией потребителей первой особой категории. Обеспечение резерва будет обеспечено посредством установки дизель-генераторной станции (далее ДЭС).

Планируемая модернизация отображена на рисунке 1.

Контроль за состоянием работы схемы и качеством электрической энергии осуществляется при помощи шкафа АВР, основанного на современных аппаратах релейной защит и автоматики под управлением программируемого микроконтроллера. Благодаря высокой функциональности и возможности регулировки работы в широком диапазоне настроек, можно настроить наиболее подходящие условия и параметры для работы схемы. Для полноценной работы схемы автоматического ввода резерва необходимо обеспечить собственную защиту и независимый источник питания (аккумуляторную батарею с напряжением 24 В). После сборки схемы и установки всех реле и выключателей на динамические рейки внутри шкафа, следует произвести калибровку микроконтроллера, во избежание ложных сработок и наоборот, чтобы устройство могло перейти на другой источник питания, при любом из ненормальных режимов работы.

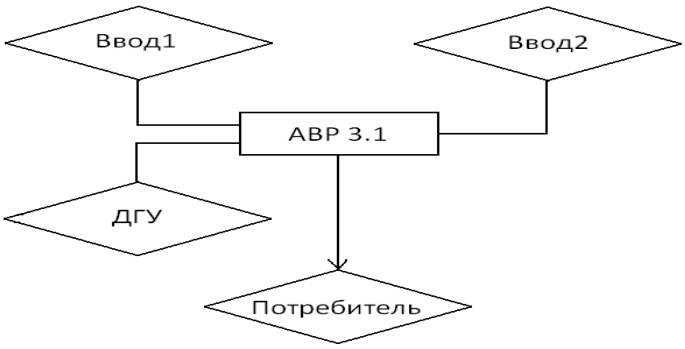


Рисунок 1 – Планируемая структурная схема электроснабжения

Таблица 1 – Состояние силовых аппаратов при различных режимах работы

№	Состояние вводов			Состояние коммутационных аппаратов			
	Фидер 1	Фидер 2	Резерв	QF1	QF2	QF3	QF4
1	вкл	вкл	ожидание	вкл	вкл	выкл	выкл
2	выкл	вкл	ожидание	выкл	вкл	вкл	выкл
3	вкл	выкл	ожидание	вкл	выкл	вкл	выкл
4	выкл	выкл	вкл	выкл	выкл	вкл	вкл

Электрические аппараты работают в условиях эксплуатации в трех основных режимах: длительном, перегрузки и в режиме короткого замыкания [1]. В длительном режиме надежная работа аппаратов обеспечивается правильным выбором их по номинальному напряжению и номинальному току. В режиме перегрузки надежная работа аппаратов обеспечивается ограничением величины и длительности повышения напряжения или тока в таких пределах, при которых гарантируется нормальная работа за счет запаса прочности.

Для выбора силового выключателя необходимо, чтобы он соответствовал следующим требованиям:

$$U_{\text{ном.в}} \geq U_{\text{ном. уст}},$$
$$I_{\text{ном.в}} \geq I_{\text{мах}}, \qquad (1)$$
$$I_{\text{откл}} \geq I_{\text{к}},$$

где $U_{\text{ном}}$, $I_{\text{ном}}$ – соответственно номинальные напряжение и ток аппарата;

$U_{\text{раб}}$, $I_{\text{раб}}$ – напряжение и ток сети, в которой установлен аппарат;

$I_{\text{откл.в.}}$ – ток отключения выключателя, кА;

$I_{\text{К}}$ – ток короткого замыкания, кА;

Для работы схемы в автоматическом режиме, а так же возможности ручного управления работой, необходимо применять управляемые электроприводы. В качестве резервного источника питания будет применена дизельная генераторная установка, установленная в отдельно стоящем контейнере, оборудованном системой вытяжки, естественной вентиляцией и приточной системой, а так же системой противопожарного отключения. За систему запуска и защиты двигателя отвечает микроконтроллер марки Е10-00.01.000-02. Для того, что бы ДЭС могла вырабатывать необходимое количество электроэнергии, достаточное для длительного питания потребителей особой группы, следует обеспечить такое количество мощности, вырабатываемой генератором которое будет превышать потребляемую мощность. В связи с этим следует выбрать генератор с номинальной мощностью, близкой по величине к потребляемой. Под это требование попадает двигатель Д-266.4 с номинальной мощностью 127 кВт, а в качестве преобразователя механической энергии в электрическую – генератор ЕСР 43-1L/4, способный вырабатывать до 130 кВА при температуре в 40 °С.

Сечение кабеля, прокладываемого от ДЭС к щиту АВР, можно выбрать исходя из формулы расчёта по экономической плотности тока [2] , а после – из соответствующих таблиц

$$S = \frac{I}{J_{\text{эк}}}, \qquad (2)$$

где S – сечение проводника, мм^2;

I – расчётный ток в час максимума энергосистемы, А;

$J_{эк}$ – нормированное значение экономической плотности тока.

Выполнив работу по внедрению системы АВР и ДЭС в качестве резервного источника питания Гродненского облисполкома, будет обеспечено надежное и бесперебойное электроснабжение потребителей первой группы, что позволит избежать проблем с электроснабжением, исключит потерю информационных данных при непредвиденных сбоях на питающих линиях.

Список литературы

1. Беркович, М. А. Основы автоматики энергосистем / М. А. Беркович, А. Н. Комаров, В. А. Семенов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 433 с.

2. Родкевич, В. Н. Электроснабжение промышленных предприятий : пособие по курсовому и дипломному проектированию / В. Н. Родкевич, О. П. Королев, В. Н. Сацукевич. – Минск : РИПО, 1995. – 143 с.

3. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / В. А. Андреев. – М. : Высшая школа, 2006. – 642 с.

Having completed the work on the introduction of the automatic reserve input system and a diesel generator, as a backup power source of the administrative building, a reliable and uninterrupted power supply to consumers of the first special group will be provided, which will eliminate the loss of information data in case of unforeseen failures on the supply lines.

Кисель Сергей Александрович, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, sergeykabyka@yandex.ru.

Научный руководитель – *Гайда Леонид Станиславович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, gls@grsu.by.

УДК 536.581.2

Я. Д. КОБЫЛЯНЕЦ, А. Т. КУПЧЕВСКИЙ

ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЕ И ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕ ЁМКОСТЕЙ ПРИ ПОВЕРКЕ (КАЛИБРОВКЕ) АЛКОТЕСТЕРОВ[1]

Определяются факторы, в той или иной степени влияющие на изменение температуры термостатируемой среды. Определены закономерности работы термостатов, их элементной базы, а также возможные варианты реализации высокоточных терморегуляторов.

Существует два основных метода поверки алкометров. Первый осуществляется при помощи генератора воздушно-спиртовых смесей (рисунок 1). Второй основан на применении газовых смесей в баллонах под давлением. В Республике Беларусь при поверке (калибровке) алкометров используется исключительно первый метод. Настоящая работа посвящена совершенствованию именно этого метода. Качество генерируемой газовой смеси в значительной степени зависит от достоверности и оперативности информации, получаемой в ходе выполнения контрольно-измерительных операций, в процессе работы генератора спирто-воздушных смесей. Даже незначительное изменение температуры прибора или отдельного его узла приводит к изменению физико-химических свойств материалов, составляющих конструкцию измерительного прибора, а также к изменению свойств термостатируемой жидкости, и, следовательно, к изменению свойств генерируемой газовой смеси.

В настоящей работе исследованы способы реализации высокоточного термостата со встроенной автоматической системой регулирования и стабилизации температуры, работающего автономно в составе комплекса, генерирующего спирто-воздушные смеси заданных концентраций при температурах, превышающих температуру окружающей среды. Детальное изучение методики поверки алкометров позволило выделить факторы, оказывающие влияние на изменение температуры термостатируемой среды. Под средой термостатирования подразумеваются содержащиеся в ёмкостях водный раствор этанола и водно-спиртовые смеси (составляющие вторую фазу среды). Обе фазы термостатируемой среды контактируют между собой и с поверхностями ёмкостей, что в свою очередь сопровождается процессами теплообмена. Очевидно, что влияние окружающей среды приводит к изменению температуры всех элементов, находящихся под её воздействием.

При поверке алкотестеров (алкометров) газовая смесь подаётся в прибор при помощи помпы, создающей давление в ёмкостях, что в свою очередь заставляет газовую смесь двигаться на вход газоанализатора. Можно

[1]Работа инициирована РУП «Гродненский центр стандартизации, метрологии и сертификации».

заметить, что воздух напрямую взаимодействует со средой термостатирования и вносит свой вклад в изменение температуры.

Немаловажно так же то, что воздействие посторонних источников тепла, таких как солнечные лучи способствуют нагреву не только термостатируемых ёмкостей, но и самого прибора, что изменяет физико-химические свойства его отдельных элементов.

Атмосферное давление также является фактором, оказывающим влияние на изменение температуры.

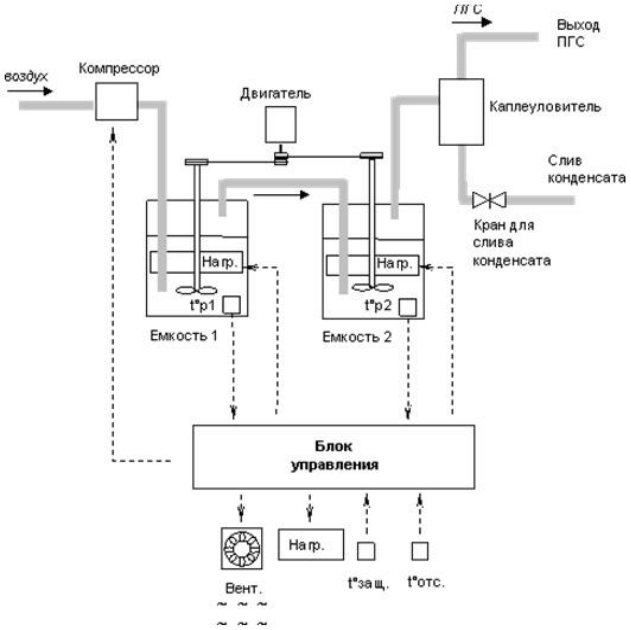


Рисунок 1 – Функциональная схема генератора спирто-воздушных смесей

Для воспроизведения газовых смесей определённой концентрации из водных растворов этанола основной задачей является поддержание заданного уровня температуры в рабочих ёмкостях с применением регуляторов температуры.

Регуляторы температуры непрямого действия – это в основном электронные приборы, в которых для активации регулирующего температуру механизма используется энергия от какого-либо внешнего источника, а регуляторы прямого действия – это механические устройства.

С точки зрения теории управления разрабатываемое устройство представляет собой автоматическую систему.

Анализ автоматических систем регулирования [2–6] показал, что разрабатываемое устройство должно содержать как минимум 4 датчика температуры (если микросхема не нуждается в стабилизации температуры), три нагревательных элемента, помпу и вентилятор.

Из применяемых в настоящее время структур терморегуляторов для целей данной работы наиболее предпочтительны регуляторы непрямого действия на основе многомерных автоматических систем.

Список литературы

1. ИДФС.029.00.000 ПС. Прибор для измерения концентрации паров алкоголя в выдыхаемом воздухе «Алкотест-203». ТУ РБ 14559610.001-98. – Минск : ООО ИЦ «ФЛАРС», 2009. – С. 15–17.
2. Малафеев, С. И. Моделирование и расчет автоматических систем управления : учеб. пособие / С. И. Малафеев, А. А. Малафеева. – Владимир : «Посад», 2003.
3. Малафеев, С. И. Системы автоматического управления / С. И. Малафеев, А. А. Малафеева. – Владимир : ВлГУ, 1998.
4. Ивель, В. П. Линейные системы автоматического управления : курс лекций / В. П. Ивель, Ю. В. Герасимова. – Петропавловск : СКГУ им. М. Козыбаева, 2006.
5. Гольперин, М. В. Теория автоматического управления / М. В. Гольперин. – М. : Форум-Инфра, 2004.
6. Бабиков, М. А. Элементы и устройства автоматики : учеб. пособие для вузов / М. А. Бабиков, А. В. Косинский. – М.: Высшая школа, 1975. – 464 с. : ил.
7. Куликовский, К. Л. Методы и средства измерений : учеб. пособие для вузов / К. Л. Куликовский, В. Я. Купер. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 448 с. : ил.

This article defines the factors, to varying degrees, affecting the temperature change of the thermostated liquid. The regularities of operation of thermostats, their element base, and also possible variants of realization of high-precision thermoregulators are defined.

Кобылянец Ярослав Дмитриевич, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, lomidolomger1@gmail.com.

Купчевский Артур Тадеушевич, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, Arturkupchevskii@mail.ru.

Научный руководитель – *Василюк Геннадий Тимофеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, vasilyuk@grsu.by.

УДК 53.072

О. В. КОСТИКОВ

ИЗУЧЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ОСЦИЛЛЯТОРА ДУФФИНГА

Рассмотрен нелинейный осциллятор Дуффинга с целью создания лабораторной установки для изучения нелинейных колебаний с помощью электромагнитной индукции.

Колебания – повторяющийся в той или иной степени во времени процесс изменения состояний системы около точки равновесия. Осциллятор – система, совершающая колебания, то есть показатели, которой периодически повторяются во времени. Линейный осциллятор – простейшая колебательная система (базовая модель) позволяющая исследовать такое фундаментальное явление, как резонанс, то есть эффект резкого увеличения амплитуды колебаний при совпадении частоты воздействия с собственной частотой системы. Одно из основных отличий нелинейного осциллятора связано с неизохронностью нелинейной колебательной системы. При приближении частоты внешней силы к частоте собственных колебаний бóльшим амплитудам колебаний уже соответствует другая частота. В результате система выходит из резонанса и, начиная с некоторой амплитуды, осциллятор перестает замечать внешнюю силу. Выход из резонанса происходит, таким образом, за счет нелинейного сдвига частоты $\omega = \omega(A)$. Кроме того, для нелинейного осциллятора резонанс существует и на гармониках внешней силы. В общем случае, даже при синусоидальном воздействии, в такой неавтономной системе возможны совершенно нетривиальные эффекты – динамика системы может оказаться чрезвычайно сложной, в том числе и стохастической. Эти эффекты обнаруживаются лишь при наличии нелинейностей.

Теорию колебаний начинают изучать, как правило, с изучения линейного осциллятора, уравнение которого, представляет собой линейное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$x'' + 2\alpha x' + \omega_0^2 x = F(t), \tag{1}$$

где переменная x характеризует состояние осциллятора в каждый момент времени (обычно это ток, напряжение, заряд и т. п.);

α – коэффициент диссипации (рассеяние энергии в колебательных процессах механических систем);

ω_0 – собственная частота;

$F(t)$ – внешнее воздействие.

Однако, линейный характер этой модели в ряде случаев оказывается сдерживающим фактором: он не позволяет рассматривать такие наблюдающиеся в природе и технике явления, как неизохронность и ангармоничность колебаний. Для их анализа требуется усложнение уравнения осциллятора за счет учета нелинейных свойств реальных колебательных систем [1]. Сделать это можно, например, учтя зависимость коэффициента диссипации (α) или собственной частоты (ω_0) от интенсивности (амплитуды) колебаний в осцилляторе. В первом случае нелинейность носит «диссипативный», а во втором – «реактивный» характер.

Базовая модель нелинейного осциллятора – осциллятор Дуффинга:

$$x'' + \alpha x' + \omega_0^2 (1 + x^2) x = F(t). \tag{2}$$

На примере этой модели удобно изучать такие эффекты нелинейных колебательных систем, как неизохронность, ангармоничность и мультистабильность. Таким образом, осциллятор Дуффинга – простейшая модель осциллятора с реактивной нелинейностью [3].

Осциллятор Дуффинга, или осциллятор с кубической нелинейностью, является одной из наиболее распространенных моделей теории колебаний.

Уравнение осциллятора имеет вид:

$$x'' + \alpha x' + \beta x + \gamma x^2 = 0. \quad (3)$$

Его можно получить, рассматривая, к примеру, колебания математического маятника при небольших углах отклонения; колебания грузика на пружине с нелинейной возвращающей силой, расположенного на плоской горизонтальной поверхности. Данное уравнение также можно получить при описании движения частицы в потенциале из двух ям.

Одними из простейших, типичных нелинейных явлений, наблюдаемых в системах самой различной природы, являются неизохронность, ангармоничность и мультистабильность. Под неизохронностью понимают зависимость частоты (периода) собственных колебаний от их амплитуды (интенсивности). Явление ангармоничности проявляется в изменении формы колебаний с ростом их амплитуды: для малой амплитуды колебания остаются почти гармоническими, для большей – их форма искажается [1]. При искажении формы колебаний в спектре происходит генерация новых гармоник на частотах, кратных собственной частоте колебательной системы. Явление мультистабильности, также как неизохронности и ангармоничности, может наблюдаться только в нелинейных системах. Заключается оно в том, что в зависимости от выбора начальных условий при постоянных значениях управляющих параметров динамическая система может демонстрировать различные режимы. Это соответствует тому, что в ее фазовом пространстве при фиксированных значениях параметров могут сосуществовать несколько аттракторов. Система, в фазовом пространстве которой сосуществует несколько устойчивых состояний, называется мультистабильной. В простейшем случае, когда сосуществует только два устойчивых состояния, система называется бистабильной [3].

При воздействии внешней периодической силы на линейный осциллятор наблюдается, по существу, единственный основной эффект – линейный резонанс. При приближении частоты внешнего гармонического воздействия постоянной амплитуды к собственной частоте линейного осциллятора, амплитуда вынужденных колебаний растет [2]. В осцилляторе без диссипации она стремится к бесконечности, когда частота воздействия совпадает с собственной частотой. В осцилляторе с потерями амплитуда вынужденных колебаний достигает некоторого максимального значения, а затем уменьшается при увеличении расстройки между частотами. Зависимость амплитуды вынужденных колебаний от расстройки между частотой внешнего воздействия и собственной частотой осциллятора характеризуют резонансные кривые. Чтобы получить уравнение резонансных кривых нелинейного осциллятора, рассмотрим явление резонанса в линейном осцилляторе, затем учтем эффект неизохронности и в уравнение резонансных кривых введем поправку к частоте. При ($\alpha = 0$) получим уравнение резонансной кривой для консервативного нелинейного осциллятора при гармоническом воздействии:

$$\omega \approx \omega_0 + \left(\frac{3\gamma}{8\omega_0}\right)A^2 \pm \sqrt{\left(\frac{B}{2A\omega_0}\right) - \alpha^2}, \quad (4)$$

где α – параметр диссипации,

ω_0 – собственная частота линейного осциллятора,

B – амплитуда внешнего воздействия.

При построении резонансных кривых амплитуда внешней силы B является параметром: каждому фиксированному значению амплитуды внешнего воздействия соответствует своя резонансная кривая. Уравнение резонансных кривых является кубическим уравнением, и следовательно, может иметь либо один действительный корень, либо три действительных корня.

На рисунке 1 построены резонансные кривые нелинейного осциллятора, каждая из которых представляет собой график зависимости квадрата амплитуды установившихся вынужденных колебаний от расстройки между частотой внешнего воздействия и собственной частотой осциллятора, для различных значений параметра B.

Из анализа на устойчивость следует, что режимы, соответствующие средней ветви, являются неустойчивыми, а две другие ветви соответствуют устойчивым режимам. При изменении частоты внешнего воздействия, при движении вдоль резонансной кривой слева направо будут происходить следующие процессы. С увеличением чистоты вначале происходит плавное увеличение амплитуды вынужденных колебаний. При совпадении частоты внешнего воздействия с собственной частотой осциллятора ($\omega = \omega_0$), когда в линейной системе наступает резонанс, здесь амплитуда колебаний еще далеко не достигает своего максимального значения. С увеличением (ω) она продолжает расти дальше до некоторого максимального значения. При переходе через значение частоты ($\omega = \omega_2$), происходит скачкообразное уменьшение амплитуды вынужденных колебаний. При дальнейшем увеличении частоты продолжается плавное уменьшение амплитуды колебаний.

При обратном движении по резонансной кривой скачкообразное увеличение амплитуды колебаний происходит при другом значении частоты: $\omega = \omega_1$. Наблюдается гистерезис. В области гистерезиса (ω_1, ω_2) система является бистабильной.

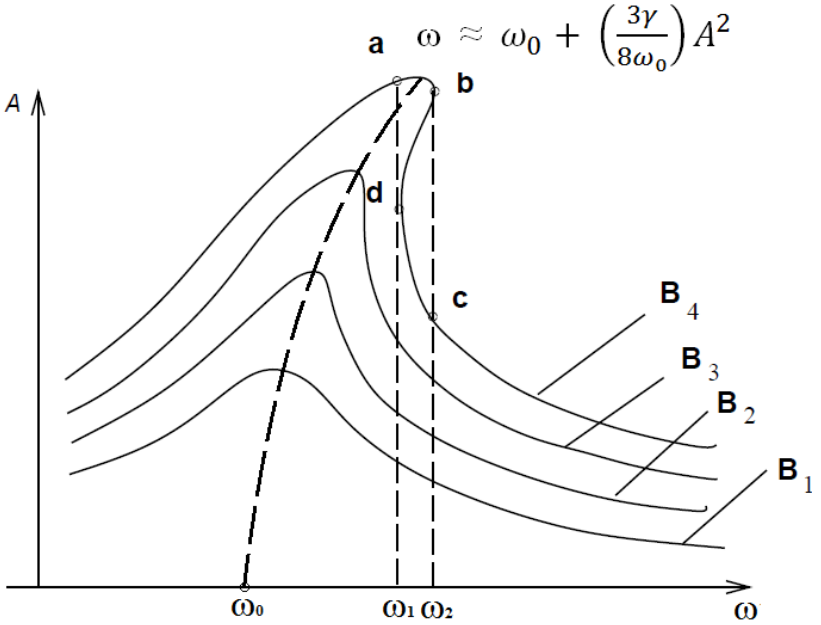


Рисунок 1 – Резонансные кривые нелинейного осциллятора

Список литературы

1. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.booksshare.net/index.php?author=bogolubov-nn&book=1963&category=physics&id1=4. – Дата доступа: 23.11.2018.

2. Введение в теорию колебаний и волн [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studfiles.net/preview/407893/. – Дата доступа: 23.11.2018.

3. Введение в теорию нелинейных колебаний [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.booksshare.-net/index.php?id1=4&catgory=physics&author=butenin-nv&book=2000&page=3. – Дата доступа: 24.11.2018.

4. Колебания, волны, структуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://bookree.org/reader?file=452084. – Дата доступа: 25.11.2018.

A non-linear Duffing oscillator is considered, with the aim of creating a laboratory setup, to study non-linear oscillations using electromagnetic induction.

Костиков Олег Владимирович, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kostikov.biz@gmail.com

Научный руководитель – *Зейликович Иосиф Семёнович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, zeylikov@gmail.com.

УДК 532.13

А. Т. КУПЧЕВСКИЙ, Я. Д. КОБЫЛЯНЕЦ

ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЕ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ВЯЗКОСТИ

Рассмотрены подходы и предложены схемы терморегулирования при измерении вязкости жидкости.

В современной технике и технологиях важное значение имеет измерение вязкости различных жидкостей. В жидкостях молекулы расположены гораздо ближе друг к другу, чем в газах, и вязкость вызывается силами

молекулярного сцепления. Эти силы с увеличением температуры уменьшаются, поэтому вязкость падает. То есть при повышении температуры вязкость жидкости уменьшается и наоборот [1].

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{E}{k(T+T_0)}\right),$$

где η – вязкость,

E – энергия,

T – температура.

Кроме того, пользуются эмпирическими зависимостями. Для минеральных масел с вязкостью > 80 сСт при температурах от 30 до 150 °С пользуются выражением

$$\nu_t = \nu_{50}\left(\frac{50}{t}\right)^n,$$

где ν_t и ν_{50} – кинематические коэффициенты вязкости при заданной температуре *t* и температуре 50 °С в сСт [2].

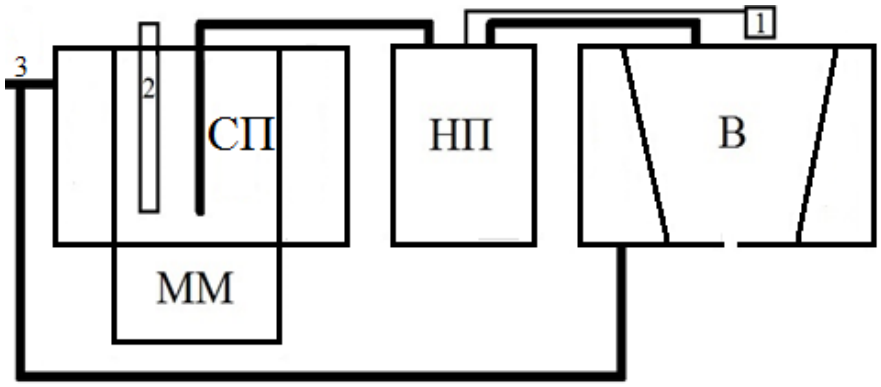
Как следует из выше изложенного система терморегулирования необходима для стабильности и воспроизводимости результатов измерения вязкости.

В настоящей работе рассмотрены подходы и предложены схемы терморегулирования при измерении вязкости. Систему терморегулирования условно можно разделить на две части: система подержания заданной температуры воздушной среды и система терморегулирования исследуемой жидкости.

Система регулирования воздушной среды состоит из термоизолированного пространства измерительной зоны, терморегулятора, и датчиков измерения температуры. Термоизолированное пространство представляет собой кожух из теплоизолирующих материалов. А терморегулятор – вентилятор с контролируемой температурой подачи воздуха, для поддержания необходимой температуры.

Система терморегулирования жидкости может быть реализована в двух вариантах: жидкостного терморегулирования и терморегулирования на основе элемента Пельтье.

Первая система основана на жидкостном теплоносителе (например, вода), подача которого будет осуществляться извне (рисунок 1).



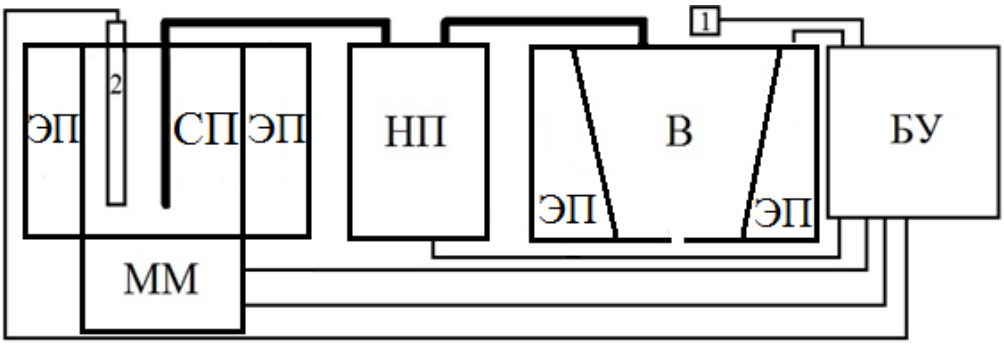
СП – сосуд подготовки, в котором жидкость перемешивается и термостабилизируется до требуемой температуры;
ММ – магнитная мешалка для перемешивания подготовляемой жидкости; НП – насос подачи, предназначен для перекачки готовой жидкости в вискозиметр; В – вискозиметр, термостатируется до требуемой температуры;
1 – ультрозвуковой датчик уровня; 2 – термометр для контроля температуры жикости;
3 – трубопровод для теплоносителя

Рисунок 1 – Блок-схема системы на основе жидкостного терморегулирования

Система, реализованая с применением элемента Пельтье, представлена на рисунке 2.

Первая система проста в реализации, но существенным недостатком является высокая инертность теплоносителя, из-за чего сложно корректировать температуру, что заставляет ждать выравнивания температуры системы с теплоносителем.

Вторая система сложнее, однако благодаря наличию блока управления возможно контролировать температуру на всех этапах.



СП – сосуд подготовки, в котором жидкость перемешивается и термостабилизируется до требуемой температуры;
ММ – магнитная мешалка для перемешивания подготовляемой жидкости;
НП – насос подачи, предназначен для перекачки готовой жидкости в вискозиметр;
ЭП – элемент Пельтье; БУ – блок управления, предназначен для контроля и управления всеми элементами;
В – вискозиметр, также поддерживается требуемая температура;
1 – ультрозвуковой датчик уровня; 2 – термометр для контроля температуры жидкости

Рисунок 2 – Блок-схема системы терморегулирования с применением элемента Пельтье

Список литературы

1. Фогельсон, Р. Л. Температурная зависимость вязкости / Р. Л. Фогельсон, Е. Р. Лихачев // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71, вып. 8.
2. Зависимость вязкости от температуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа https://einsteins.ru/subjects/-gidravlika/theory-gidravlika/zavisimost-vyazkosti.

In the present work, approaches are considered and thermal control schemes are proposed for measuring viscosity. In modern technology and technology is important to measure the viscosity of various liquids. In liquids, molecules are much closer together than in gases, and viscosity is caused by molecular adhesion forces. These forces decrease with increasing temperature, so the viscosity decreases. That is, when the temperature rises, the viscosity of the fluid decreases and vice versa.

Купчевский Артур Тадеушевич, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, Arturkupchevskii@mail.ru.
Кобылянец Ярослав Дмитриевич, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Беларусь, lomidolomger1@gmail.com.
Научный руководитель – *Василюк Геннадий Тимофеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, vasilyuk@grsu.by.

УДК 621.89:621.921:621.793

Н. В. ЛЕОНОВИЧ, М. А. ТОЛКАЧ, А. И. ЗАНЬКО

РЕАКТОР ОСАЖДЕНИЯ АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Разработан реактор химического осаждения алмазоподобных покрытий из газовой фазы в плазме высокой плотности. Описаны особенности конструкции реактора осаждения.

В современном мире наука и техника развиваются быстрыми темпами, что в свою очередь приводит к ужесточению требований к качеству производимых изделий. В сильноточных приборах применяются алмазоподобные покрытия, которые обладают рядом свойств: высоким пропусканием в ИК-спектре, механически твердые и устойчивые к износу, высокой теплопроводностью и электрическим сопротивлением. Проблема нанесения тонкопленочных покрытий включает в себя научно-технические аспекты, относящиеся к физике, химии, механике. Реализация этих требований напрямую зависит от достижений в конструировании оборудования и совершенствования технологических процессов получения тонких пленок. В настоящее время наиболее перспективными методами нанесения покрытий являются вакуумные ионно-плазменные. Преимуществом таких методов по сравнению с традиционными химическими являются экологическая

безопасность, высокая чистота технологического процесса, качество продукции, более легкий синтез сложных соединений.

Распространенным методом осаждения является радиочастотное (РЧ) плазмохимическое осаждение из паровой фазы (ПХГФО, PECVD). Для получения алмазоподобных покрытий нами был разработан цилиндрический реактор осаждения АПУ покрытий на базе вакуумной установки ВУП-5, схема реактора представлена на рисунке 1.

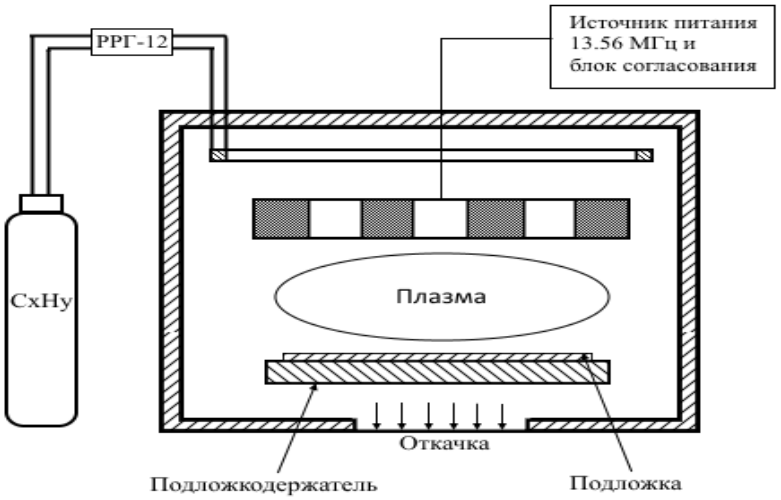


Рисунок 1 – Схема реактора для осаждения алмазоподобных углеродных покрытий

Для получения пленок использовался источник индуктивной связанной плазмы. Источник представляет собой плоский индуктор диаметром 200 мм в виде четырехзаходной спирали, работающий от источника питания вырабатывающий высокочастотный сигнал 13,56 МГц. Так же используется блок ВЧ-согласования. Автоматическое устройство согласования предназначено для обеспечения согласования нагрузки, обладающей переменным импедансом, с коаксиальным кабелем и выходом высокочастотного генератора в ручном и автоматическом режимах. В рабочем режиме плотность плазмы достигается от 10^{11} до 10^{12} см$^{-3}$.

Данный вид конструкции выбран для достижения равномерного осаждения материала на подложках диаметром до 200 мм, подложкодержатель заземлен через корпус камеры. Охлаждения источника плазмы осуществляется водяным охлаждением. Рабочее вещество подается через систему газораспределения лабиринтного типа, расход газа регулируется регулятором расхода газа – РРГ-12. Газораспределитель разработан с возможностью перемещения от источника плазмы на расстоянии до 150 мм, для отработки различных технологических процессов. Положение газораспределителя в камере относительно источника плазмы и подложкодержателя влияет на газодинамические процессы и параметры разрядной системы, что в свою очередь приводит к изменению параметров осаждаемых пленок. На равномерность и скорость осаждаемых пленок влияет рабочее давление, которое регулируется системой вакуумной откачки. Рабочего давления при проведении процесса осаждения алмазоподобных углеродных покрытий должно находилось в пределах от $4\cdot10^{-2}$ Па до 1 Па. Создание и поддержание такого уровня вакуума осуществлялась паромасляным диффузионным насосом Н-160/700, работающим совместно с пластинчато-роторным механическим насосом 2НВР-5ДМ.

Разработанный комплекс позволяет осаждать алмазоподобные углеродные покрытия с использованием источника плазмы высокой плотности, которые применяются в оптике.

Список литературы

1. Hainsworth, S. Diamond like carbon coatings for tribology: production techniques, characterisation methods and applications / S. Hainsworth, N. Uhure // International materials reviews. – 2007. – № 52. – P. 153–174.

2. Mark, J. Simulation for inductively coupled plasma etching reactors / J. Mark, Z. Wenli, J. Michael // Applied Physics. – 1996. – № 3. – P. 1337–1344.

3. Koidl, P. Amorphous, hydrogenated carbon films and related materials: plasma deposition and film properties / P. Koidl, C. Wild, R. Locher // Diamond and Diamond-like Films and Coatings. – 1991. – P. 243–265.

A reactor for chemical deposition of diamond-like coatings from the gas phase in a high-density plasma was developed. The design features of the deposition reactor are described.

Леонович Никита Викторович, магистрант 1 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, nick.xz@mail.ru.

Толкач Матвей Александрович, студент 3 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, nickxz51@gmail.com.

Занько Андрей Иванович, аспирант 1 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, zanko.andrei@inbox.ru.

Научный руководитель – *Котов Дмитрий Анатольевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, kotov@bsuir.by.

УДК 534.08

Е. В. МАРШАЛОК

АКУСТИЧЕСКИЙ КАЛИБРАТОР

Представлен акустический калибратор для калибровки шумомеров. Устройство предназначено для применения в испытательной лаборатории.

Акустический калибратор – это устройство, которое подает на микрофон сигнал звукового давления известной амплитуды и частоты. Он широко используется в акустической метрологии для калибровки измерителей уровня звука. Параметры генерируемого сигнала калибратора должны быть постоянными во времени при различных атмосферных условиях (температура, давление). Для достижения этой цели в акустических калибраторах используются различные алгоритмы, методы и конструкции.

Калибратор состоит из двух основных частей: первая используется для генерации требуемого сигнала, управляемого контуром обратной связи; вторая отвечает за настройку уровня стабилизации в этом цикле, измерения температуры и давления, обработку пользовательского интерфейса и т. д.

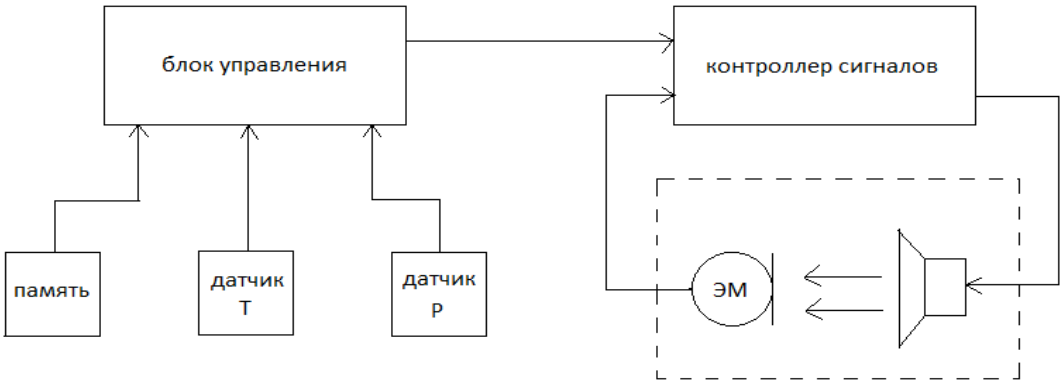


Рисунок 1 – Функциональная блок-схема акустического калибратора

Блок-схема содержит контроллер сигнала, блок управления, динамик, эталонный микрофон, память, датчик температуры, датчик давления. Контроллер сигналов используется для стабилизации звукового сигнала, генерируемого в камере. Выполняя обработку цифрового сигнала, он работает в контуре обратной связи вместе с акустической камерой и другими необходимыми элементами калибратора. Контрольный микрофон и динамик расположены непосредственно в камере, и они составляют части акустической обратной связи. Основной блок управления выполняет измерение температуры и атмосферного давления, вычисление поправки к сгенерированному сигналу и запись его в контроллер сигнала. Контур обратной связи автоматически настраивается контроллером на новое значение генерируемого сигнала, что обеспечивает его высокую стабильность в широком диапазоне температур и давления окружающей среды.

Список литературы

1. Barwicz, W. New principle of acoustic calibrators design [Электронный ресурс] / W. Barwicz, A. Podgorski, S. Duminov. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/242763645_NEW_PRINCIPLE_OF_ACOUSTIC_-CALIBRATORS_-DESIGN. – Дата доступа: 25.02.2019.

Acoustic calibrator will be used in the laboratory for the calibration of sound level meters.

Маршалок Евгений Витальевич, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, evgenii_marshalok@mail.ru.

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

УДК 620.9

А. Д. МИЩЕНКО

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЗРУ 6 И 10 кВ ПС-110 СТАНИСЛАВОВО

Рассмотрено ЗРУ 6 и 10 кВ ПС-110 Станиславово, выявлены основные недостатки ЗРУ 6 и 10 кВ подстанции. Предложена модернизация ЗРУ 6 и 10 кВ ПС-110 Станиславово путем замены масляных выключателей нагрузки на вакуумные. Разработаны схемы управления и защит с заменой механических реле на микропроцессорные.

Электрическая подстанция – электроустановка, предназначенная для приема, преобразования и распределения электрической энергии, состоящая из трансформаторов или других преобразователей электрической энергии, устройств управления, распределительных и вспомогательных устройств. Распределительное устройство (РУ) – электроустановка, служащая для приёма и распределения электрической энергии одного класса напряжения. Она содержит набор коммутационных аппаратов, вспомогательные устройства РЗиА и средства учёта и измерения [1].

Основными недостаткоми ЗРУ 6 и 10 кВ ПС-110 Станиславово являются, использование масляных выключателей и то, что их защиты выполнены на механических реле, что приводит к:

1) существенному ухудшению надежности электрической сети;
2) увеличению аварийных отключений;
3) увеличению ошибочного, не правильного или отказа срабатывания устройств;
4) увеличению трудовых часов на обслуживание электроустановок;
5) увеличению материальных затрат на эксплуатацию электроустановок.

Для устранения данных недостатков предлагается заменить масляные выключатели на вакуумные и разработать к ним схемы управления и защит на базе отечественных микропроцессорных реле МР-500.

Выбор в пользу вакуумных выключателей объясняется тем, что в современной энергетике они имеют широкое применение и зарекомендовали себя как надежное и долговечное оборудование. Кроме того, они имеют ряд преимуществ перед масляными выключателями, и в частности:

- полная взрыво- и пожаробезопасность;
- возможность осуществления сверхбыстродействия;
- возможность применения для работы в любых циклах АПВ;
- надежное отключение емкостных токов холостых линий;
- малая масса;
- малые размеры;
- относительно малая мощность привода;
- легкая замена дугогасительной камеры;
- простота эксплуатации.

Для модернизации ЗРУ 6 и 10 кВ ПС-110 Станиславово предлагается выбрать вакуумный выключатель VS1BEL.

Особенностью конструкции этого выключателя является поперечное расположение полюсов относительно сборных шин для ячеек КСО, что позволяет открыть удобный доступ к монтажу и обслуживанию. Операция включения выключателя осуществляется за счёт тягового усилия пружины включения. Отключение выключателя (в том числе автоматическое отключение при токах короткого замыкания или перегрузках) осуществляется за счёт энергии, запасённой пружинами выключателя при включении. Гашение дуги в выключателе осуществляется вакуумными дугогасительными камерами (КДВ). Электрическая дуга, благодаря специальной форме контактов, создающих собственное продольное (аксиальное) магнитное поле с диффузной формой горения дуги, распадается и гасится. Благодаря высокой электрической прочности вакуумного промежутка за доли микросекунд между контактами восстанавливается напряжение. Выключатель состоит из трёх полюсов, закреплённых на корпусе выключателя. Все корпусные детали высоковольтной части выключателя выполнены из изоляционного материала, что позволяет встраивать его в ячейки с ограниченным пространством высоковольтного отсека. Каждый полюс содержит вакуумную дугогасительную камеру,

механизм дополнительного поджатия контактов КДВ и токовыводы. Выключатель оснащён пружинным приводом с низким потреблением тока. Пружинный привод состоит из электродвигателя для взвода пружины, пружины включения, электромагнита включения, блока механических защёлок, демпфирующего гидравлического устройства, электромагнита отключения. Электрическая схема блока питания и управления выключателем собрана на панели, закреплённой в корпусе привода. Оперативное питание всех элементов привода осуществляется как на постоянном токе, так и на переменном токе. В случае осуществления питания на переменном токе в схеме управления устанавливаются диодные мосты [2].

Таким образом, предложенные изменения позволяют улучшить надежность электрической сети, значительно снизить риск ошибочных и аварийных отключений, уменьшить трудовые и материальные затраты на эксплуатацию электроустановок.

Список литературы

1. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций : учеб. для техникумов / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. – М. : Энергия, 1975. – 704 с.

2. Forca.ru [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://forca.ru/vyklyuchateli/vakuumnye/vs1.html. – Дата доступа: 17.02.2019.

The 6 and 10 kV closed switchgear of Stanislavovo PS-110 substation, the main shortcomings of the 6 and 10 kV switchgear of the substation were identified. The modernization of 6 and 10 kV PS-110 Stanislavovo PS-110 has been proposed by replacing oil circuit breakers with vacuum load and developing control and protection circuits with replacing mechanical relays with microprocessor ones. The principle of operation of the proposed VS1BEL vacuum circuit breaker has been studied.

Мищенко Александр Дмитриевич, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, alexmad2141@gmail.com.

Научный руководитель – *Комар Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, зав.кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, v.komar@grsu.by.

УДК 621.384.64;004.942:519.876.5

М. ПАЛМЕРА, Д. А. КОТОВ

ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ТОРЦЕВОГО ХОЛЛОВСКОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ

Представлена модель для расчета температуры нагрева на торцевом холловском источнике. Модель позволяет рассчитать температурную нагрузку в источнике на предельных режимах работы. Результаты расчетов показывают значительное снижение температуры самых критичных элементов конструкции источника ионов в 1,3–1,5 раза. Также представлены результаты изменения граничных условий теплопроводности по соединяемым деталям источника для разных значений коэффициента теплопроводности в диапазоне от 0,1 до 1 W/m·K.

Проводимые исследования привели к разработке источников ионного пучка для использования в транспортных средствах, движущихся в космическом пространстве. В 1957 году Алексей Иванович Морозов опубликовал статью «Об ускорении плазмы магнитным полем», и уже в 1964 году советский аппарат «Зонд-2» был оборудован первым таким устройством. Впоследствии эта технология была адаптирована и применена в 1989 году Г. Кауфманом [1].

В процессе работы возникают источники ионов, происходит нагрев структурных элементов, что объясняется главным образом тем, что часть мощности, создаваемой тепловым катодом, вводится в виде тепловых потоков, которые достигают поверхности элементов граничащего источника, в дополнение к плазме, образующейся в зоне разряда. Такое нагревание может вызвать тепловую деформацию и, как следствие, основные характеристики выходного ионного пучка. Кроме того, значение ионного тока и его расходимость уменьшаются. Используемые материалы при проектировании этих источников должны быть устойчивы к тепловым и механическим нагрузкам. Это особенно важно, если источник используется для изготовления оптических покрытий. Поэтому на этапе проектирования ионных источников необходимо моделировать тепловые процессы.

Для расчета температур элементов конструкции в ТХИ необходимо определить источники тепла. Основные потоки тепла выносятся на поверхности эмиссионного электрода и газоразрядной камеры компонентами плазмы – ионами и электронами. Перенос тепла между элементами источника осуществляется излучением и теплопроводностью. В модели перенос тепла между элементами источника осуществляется

излучением и теплопроводностью, учтены контактные термические сопротивления между сопряженными элементами, составляющими источник [2; 3].

Теплопроводность является способность материальных тел проводить энергию от более нагретых частей тела к менее нагретым частям тела, осуществляется хаотически движущимися атомами, электронами и ионами.

В установившемся режиме плотность потока энергии, передающейся посредством теплопроводности, пропорциональна градиенту температуры, поэтому она определяется выражением, известным как закон теплопроводности Фурье:

$$\vec{q} = -k\vec{\nabla}T, \tag{1}$$

где $\vec{q}$ – вектор плотности теплового потока – количество энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной каждой оси; k – коэффициент теплопроводности; T – температура. Минус в правой части показывает, что тепловой поток направлен противоположно вектору $\vec{V}$.

Излучение энергии происходит от поверхности в виде атомов, электронов и ионов. Скорость излучения за единицу времени и на единицу площади поверхности, или радиационный поток, показанная как коэффициент излучения (ε), представляет собой отношение способности поверхности излучать энергию по сравнению со способностью совершенного черного тела в той же области при той же температуре. Итак, получаем закон Стефана – Больцмана:

$$P = \varepsilon\sigma T^4, \tag{2}$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана, T – температура тела.

В модели проводится исследование распределения температуры в компонентах ионного источника для определения критических значений температуры и температурных градиентов. Эти нагревательные температуры в ТХИ рассчитываются с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics 5.3, где исследуемый объект разделяется на множество элементов. Чтобы значительно сократить количество вычислений, мы уменьшили количество отверстий в каждом из элементов ТХИ в модели, поэтому нам удалось значительно сократить количество вычислений без снижения их точности с помощью компьютера.

Аргон используется в качестве рабочего газа. В зоне плазмообразования в центральной оси анода, как раз в области разряда, он будет иметь излучение 750 Вт, а термокатод помещается в верхнюю часть источника с температурой 2500 °С. Для охлаждения систем он разделен на две части: в первой вода используется с потоком 3 кг/мин. и температурой 20 °С для охлаждения анода и катода, которые сделаны из магнитной нержавеющей стали, а вторая часть состоит из охлажденых магнитов, покрытых латунными колпачками.

На рисунке 1 показаны полученные результаты для нагревания каждой из частей разработанного ТХИ: на рисунке 1*а* мы видим наш источник без использования системы охлаждения. На рисунке 1*б* показаны результаты с использованием системы охлаждения. На рисунке 2 показано изменение температуры при различных значениях коэффицента теплопроводности в диапазоне от 0,1 до 1 W/m·K..

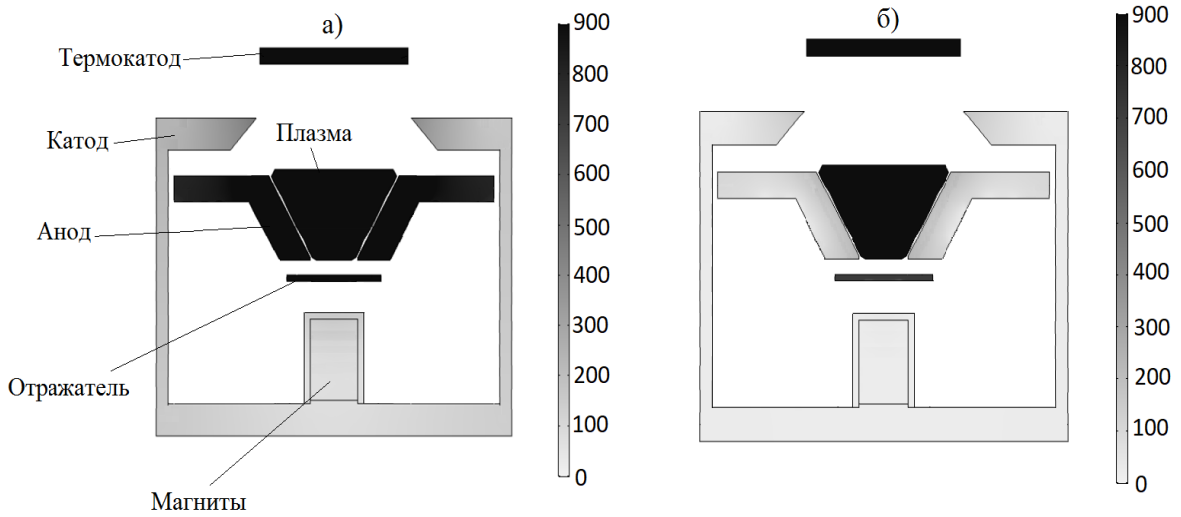


Рисунок 1 – Рассчётное поле температур для разработанного источника ионов:
а) без охлаждения; б) с охлаждением

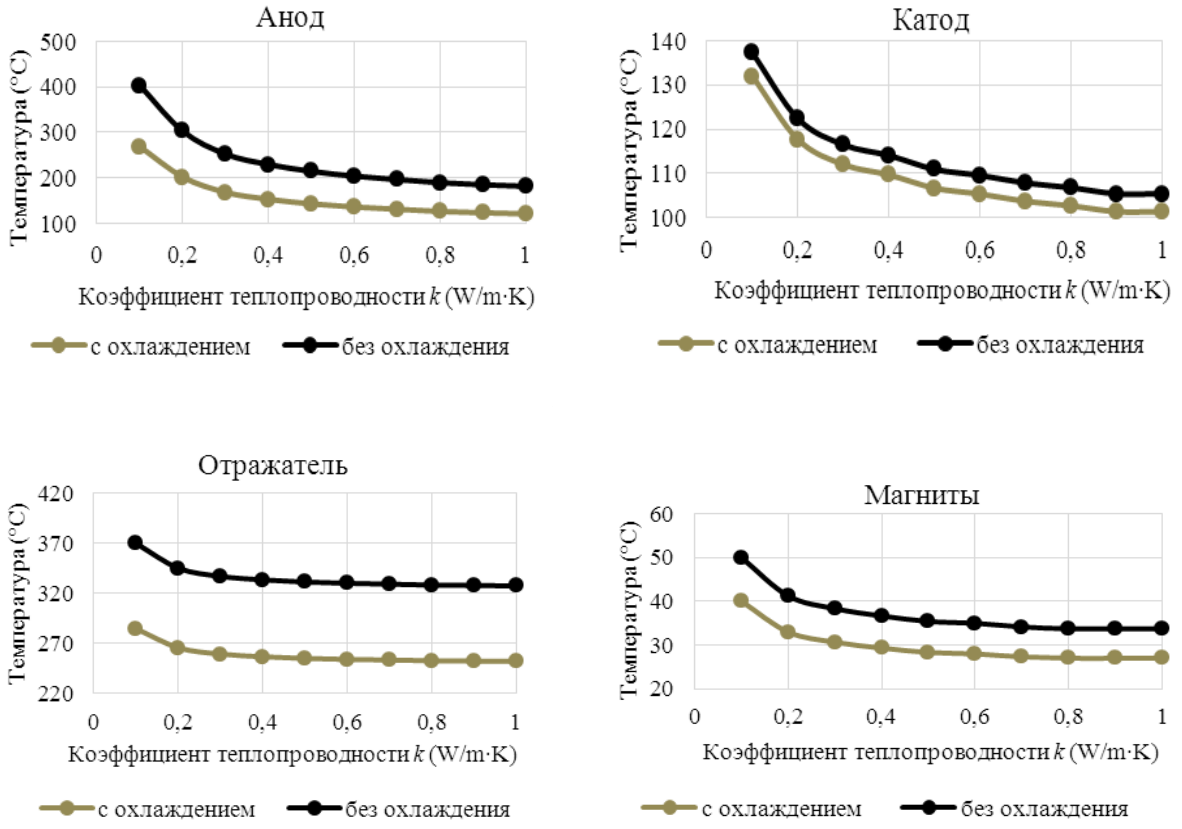


Рисунок 2 – Изменение температуры при различных значениях коэффициента теплопроводности

Выполненно тепловое моделирование в торцевом холловском источнике ионов. Рассчитанная температурная система источника ионов может быть использована для расчетов термомеханической деформации элементов конструкции. В результате проведенной работы удалось снизить температуру критических элементов конструкции в 1,3–1,5 раза. Проведено изучение влияния коэффициента теплопроводности на поверхностях сопряжения нагреваемых и охлаждаемых элементов конструкции. Установлено, что система охлаждения в полной мере выполняет свои функции и не позволяет перегреваться элементам конструкции источника ионов.

Список литературы

1. Zhurin, V. V. Industrial Ion Sources: Broadbeam Gridless Ion Source Technology / V. V. Zhurin. – Wiley, 2011. – 5–18 p.

2. Абгарян, В. К. Тепловая модель высокочастотных ионных двигателей и источников ионов / В. К. Абгарян, К. И. Круглов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2015. – № 11. – С. 21–27.

3. Faircloth, D. C. Thermal modeling of the ISIS H^- ion source / D. C. Faircloth, J. W. G. Thomason, W. Lau and S. Yang // Review of scientific instruments. – May 2004. – Vol. 75, № 5.

4. Tavares, S. S. M. Magnetic properties of an AISI 420 martensitic stainless steel / S. S. M. Tavares, D. Fruchart, S. Miraglia, D. Laborie // Journal of Alloys and Compounds. – 2000. – P. 307–314.

A model is presented for calculating the temperature of heating at the end Hall source. The model allows to calculate the temperature of the load at the source during operation. The results of calculations show the change in the temperature of the source with the cooling system in 70–60 %. Also, the study of thermal conductivity for different values in the range from 0,1 to 1 W/m · K.

Палмера Давила Мигель Анхель, аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Мерида, Венесуэла, bfcmikep@gmail.com.

Научный руководитель – *Котов Дмитрий Анатольевич*, кандидат технический наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, kotov@bsuir.by.

УДК 621.316

Е. Г. ПЕТРУЛЕВИЧ

РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОЩИТОВОЙ С ЗАМЕНОЙ НА АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ[2]

Представлен проект реконструкции электрощитовой Оздоровительного центра г. Гродно. С целью повышения уровня защиты электроустановок от короткого замыкания и перегрузок проведена замена электрооборудования на автоматические выключатели серии ВА55.

Для защиты электроустановок от токов короткого замыкания и перегрузок чаще всего используют предохранители с плавкими вставками и автоматические выключатели. Во многих современных электроустановках недопустим неполнофазный режим работы [6]. В трехфазных фазных сетях предохранители устанавливаются отдельно на каждую фазу, и в случае короткого замыкания на одну из фаз, электроустановка работает в неполнофазном режиме, что приводит ее к выходу из строя. Автоматические выключатели устанавливаться сразу на все три фазы и в случае короткого замыкания на одну из них отключает сразу все фазы.

Плавкая вставка предохранителя срабатывает от термического воздействия, созданного проходящим по ней током. Во время срабатывания вставка перегорает, и требуется ее замена, с калибровкой под нужный ток срабатывания. У автоматического выключателя такой проблемы нет.

Автоматический выключатель тоже учитывает термический перегрев схемы и размыкает свои силовые контакты за счет теплового расцепителя. Также в автоматическом выключателе есть электромагнитный расцепитель, который реагирует на превышение электромагнитной энергии. Поэтому время срабатывания выключателя меньше чем у предохранителя.

С целью надежной работы электрооборудования Оздоровительного центра (ОЦ) г. Гродно, требуется реконструкция электрощитовой, основной задачей которой является замена предохранителей с плавкой вставкой, на автоматические выключатели серии ВА для повышения уровня защиты электроустановок.

Для защиты электрооборудования используем автоматические выключатели типа ВА55, они оснащаются: тепловым, магнитным и электромагнитным расцепителями типа PR211. Они защищают цепь не только от короткого замыкания, но и от перегрузок. Расцепитель обеспечивает высокую точность и надежность срабатывания в независимости от условий окружающей среды.

Автоматические выключатели серии ВА55 устанавливаются в электроустановках распределительных устройств номинальным напряжением 400–690 В, с частотой 50 Гц и номинальными токами 12,5–1600 А.

Выключатели с электронным расцепителем обеспечивают защиту от перегрузок и токов короткого замыкания. Этот расцепитель обеспечивает высокую надёжность и точность срабатывания вне зависимости от условий окружающей среды. Электронный расцепитель не требует отдельного питания и гарантирует правильную работу защиты [2; 5].

Выбор автоматических выключателей выполняется по следующим условиям [1]:

1. По количеству полюсов. Количество полюсов автомата определяется из числа фаз сети, необходимых для электроустановки. Для трехфазной сети используют трех- и четырехполюсные автоматические выключатели.

2. По номинальному напряжению. В не зависимости от места установки напряжение автомата U_{AB} должно соответствовать номинальному напряжению сети U_C:

$$U_{AB} \geq U_C. \tag{1}$$

3. По максимальному рабочему току. Выбор автомата по максимальному рабочему току заключается в том, что номинальный ток автомата ($I_{\text{а.ном}}$) должен быть больше или равен максимальному току электроприемника ($I_{\max}$)

$$I_{\text{а.ном}} \geq I_{\max}. \tag{2}$$

Также в реконструкции щитовой ОЦ целесообразно заменить аналоговые счетчики на электронные, алюминиевые шины – на медные и заменить устаревшие распределительные шкафы на шкафы нового образца.

Распределительные шкафы выбираем фирмы «Легир» типа ШР-Лег1-01-31-У3 исходя из экономических показателей (цена) [4].

Для учета электроэнергии используем два трехфазных счетчика марки «Гран-Электро», т. к. они имеют защиту от несанкционированного перепрограммирования, архив ошибок, состояния фаз, интерфейсы связи, и их срок службы до ремонта составляет 24 года [3].

---

[2]Проект реконструкции проведен по заданию Оздоровительного центра г. Гродно.

Шины выбираем медные, потому что алюминий – это высокая окисляемость металла на открытом воздухе, от чего на его поверхности образуется оксидная плёнка, имеющая высокое сопротивление, которая практически не проводит ток. Кроме этого, алюминий очень хрупкий металл. К тому же, шина из алюминия, по сравнению с медной, обладает низкой способностью выдерживать продолжительные токовые нагрузки, поэтому приходится увеличивать сечение токопроводящей жилы. Шины из меди более устойчивы к механическим воздействиям – изгибу, скручиванию и т. п. Основной недостаток медной кабельно-проводниковой продукции – ее высокая стоимость [7].

На рисунке 1 представлена структурная схема электрощитовой Оздоровительного центра после проведенной реконструкции.

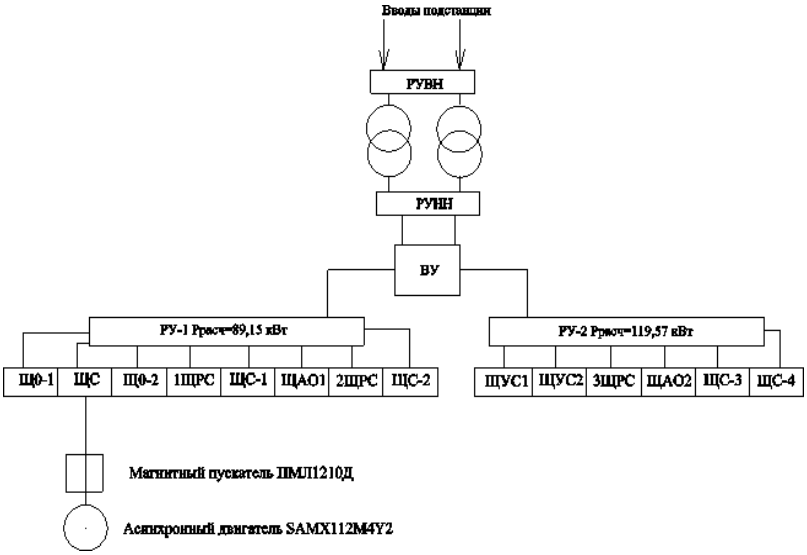


Рисунок 1 – Структурная схема электрощитовой после реконструкции

В связи с тем, что в здании Оздоровительного центра находится дорогостоящее оборудование, которое выходит из строя при неполнофазном режиме работы, для повышения уровня защиты электроустановок была проведена реконструкция электрощитовой с заменой плавких предохранителей на автоматические выключатели серии ВА55. Также при реконструкции щитовой ОЦ произведена замена аналоговых счетчиков на электронные, замена алюминиевых шин на медные и замена старых распределительных шкафов на шкафы нового образца.

Список литературы

1. Выбор автоматических выключателей защиты [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: https://electricvdome.ru/avtomaticheskie-vikluchateli/vibor-avtomaticheskih-viklyuchatelei.html. – Дата доступа: 10.02.2019.

2. Выключатели автоматические серии ВА55. Технический каталог [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: https://electro.by/images/filecatalog/katalog_va55_2013_webpdf.pdf. – Дата доступа: 12.02.2019.

3. Гран-Система-С [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: https://www.strumen.com. – Дата доступа: 12.02.2019.

4. Легир. Инновации в области электротехнического производства [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: http://www.legir.by/. – Дата доступа: 18.02.2019.

5. Низковольтная коммутационная аппаратура торговой марки «ЭЛЕКТРОТМ». Технический каталог. – Минск, 2013.

6. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., испр. и доп. – М. : Госэнергонадзор, 2000. – 542 с.

7. Электрокабель Комплект [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: https://www.ekk.by. – Дата доступа: 17.02.2019.

In this article we presented the reconstruction of electric shield of Wellens hub in Grodno in order to increase security of electrical installation from short circuit and also from overload. We made a replacement electrical installation on the automatic switches series BA55.

Петрулевич Евгений Геннадьевич, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, zheka-94@mail.ru.

Научный руководитель – *Гаврилова Ирина Леонидовна*, старший преподаватель кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, iren_ka@tut.by.

УДК 37.016:53

Р. Г. ПИЛИМОН

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОТЕЛЬНОЙ НА ОАО «ГРОДНОХЛЕБОПРОДУКТ»

Описывается модернизация котельной. Модернизация котельной – это комплекс мер, необходимых для повышения эффективности ее работы, увеличения мощности и безопасности, снижения затрат на эксплуатацию. Перечислены случаи, в которых нужна модернизация, а также виды модернизации.

Основная причина низкой эффективности большинства существующих энергетических объектов – высокая степень изношенности основного генерирующего и котлового оборудования. Пока же энергетикам приходится работать на оборудовании, которое частью функционирует еще со времен СССР. Параллельно со строительством новых мощностей изучаются пути модернизации существующего оборудования, продления его ресурса и повышения КПД.

Модернизация котельной производится для улучшения эффективности, повышение мощности, улучшения экологической безопасности, уменьшения потребления топлива и расходов на эксплуатацию котельной [1].

Модернизация котельной необходима, если основное и вспомогательное оборудование котельной морально и физически устарело, потребление топлива значительно увеличилось, увеличилась себестоимость вырабатываемого тепла, котельная переводится на применение другого вида топлива.

Модернизация котельной начинается с проведения обследования, которое включает в себя проверку дополнительных тепловых нагрузок на котельное оборудование, уточняются работы, необходимые для улучшения эффективности работы котельной. На основании обследования решается вопрос о применении одного из вариантов модернизации котельной. Модернизация котельной может включать в себя полную замену всего основного и вспомогательного котельного оборудования, или замену отдельных узлов и котельных агрегатов.

Под модернизацией подразумевается частичная или полная замена технологического оборудования и/или необходимые действия по его наладке для эффективной работы котельной [2].

Модернизация оборудования необходима в случаях:

- физического и морального износа теплоэнергетического оборудования;
- высокого потребления электроэнергии на выработку тепла;
- перебоев температурных режимов;
- перехода с одного вид топлива на другой;
- невозможности постройки нового источника теплоснабжения;
- увеличения выбросов вредных веществ в экосистему.

Перед проведением любых мероприятий по модернизации необходимо предварительное предпроектное обследование, включающее в себя анализ присоединенных тепловых нагрузок и их плотности, анализ располагаемой и рабочей мощности, выявление возможностей оптимизации уровня загрузки оборудования, уточнение перспектив энергоэффективности и снижения теплопотерь. По результатам обследования принимается один из возможных вариантов модернизации котельной.

Работы по модернизации котельной:

- замена котла одной мощности на другую;
- замена устаревшего оборудования на современное;
- внедрение ресурсосберегающих технологий;
- внесение изменений в тепловую схему;
- автоматизация управления процессами.

Теплопроизводительность можно повысить за счет снижения потерь энергии, улучшения технологической схемы, перевода котельного оборудования на альтернативный вид топлива, который экономически оправдан. Кроме того, необходимо снизить количество вредных выбросов в окружающую среду, что позволит избежать штрафных санкций.

Для проведения правильной и эффективной модернизации котельной необходимы следующие мероприятия:

- тщательный анализ системы теплоснабжения;
- расчёт экономической целесообразности реконструкции;
- формирование стратегий по решению поставленной задачи;
- проектирование котельной;
- строительно-монтажные работы;
- пуско-наладочные работы;
- гарантийное обслуживание.

После проведения модернизации можно получить:

- увеличение эффективности функционирования теплового оборудования;
- повышение коэффициента полезного действия;
- надежность в эксплуатации котельной;
- снижение затрат на обслуживание за счёт автоматизации процессов;
- уменьшение расхода топлива;
- улучшение экологической обстановки [3].

В случае выполнения комплексных работ по модернизации котельной разрабатывается проектная документация, которая дополняется проектными разделами ПОС (Проект организации строительства) и ППР (Проект производства работ).

Комплексная модернизация котельной включает в себя следующие этапы:

- подбор котлов, оборудования и системы автоматизированного управления;
- разработка и согласование с заказчиком план-схемы модернизированной котельной;
- проведение строительных и монтажных работ;
- проведение пуско-наладочных работ.

Частичная модернизация может включать в себя полное обновление конфигурации всей системы или замену отдельных узлов и агрегатов.

1. Системы топливоподачи и топливоподготовки. В процессе модернизации этих систем возможно проведение работ по автоматизации и реконструкции с установкой современного и высокопроизводительного оборудования, замена и теплоизоляция емкостей, гранулирование и гомогенизация твердого топлива, установка современных транспортеров, угледробилок и металлоочистителей.

2. Системы автоматизации и приборы учета. Модернизация котельной в этой области включает в себя организацию автоматического контроля за всеми процессами с единого пульта управления, установку приборов учета расхода топлива и теплоты на выходе, приборов учета расхода воды и контрольно-измерительного оборудования для управления качеством и количеством теплоносителя и выработанного тепла.

3. Система водоподготовки. Проводятся работы по усовершенствованию комплексной обработки сетевой воды, установке станций по снижению железосодержания, автоматизации управления системой, разделению контуров сетевой и котловой воды.

4. Замена котельных агрегатов. Это наиболее эффективный способ модернизации котельной, включающий в себя замену всех устаревших и отработавших свой ресурс моделей котлов, таких как чугунные секционные, на современные стальные, реконструкцию угольных котлов с повышением КПД до 75–80 %, замену конвективных частей и теплообменников, замену топок с ручной топливоподачей на механизированные или автоматизированные топки, организацию утилизации теплоты уходящих газов.

После разработки общей концепции модернизации производится подбор необходимого оборудования и согласование с заказчиком. Следующими этапами являются выполнение проектных работ, поставка и монтаж оборудования, наладка и запуск котельной [4].

Список литературы

1. Квадроэнерго: модернизация и реконструкция котельной [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.quadroenergo.by/services/modernizaciya-i-rekonstrukciya.

2. Модернизация котельной [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kotel-kv.com/modernization-boiler.html.

3. Энергия-М, модернизация котельной [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://kotel-kvr.su/modernization-boiler.html.

4. Балткотломаш, системы теплоснабжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.bkm-spb.ru/modernizaciya-kotelnoy.html.

This article describes the modernization of the boiler room. Modernization of a boiler room is a set of measures necessary to increase its efficiency, increase power and safety, and reduce operating costs. Also it describes cases when modernization is needed and types of modernization.

Пилимон Руслан Геннадьевич, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, www. rusel-1996@mail.ru.

Научный руководитель – *Ситкевич Татьяна Анатольевна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, sittan@tut.by.

УДК 53.087.44

А. И. ПОЛУБЯТКО

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОЙ ПОВЕРКИ ИМПУЛЬСНЫХ РАСХОДОМЕРОВ

Представлена блок-схема устройства, предназначенного для поверки импульсных расходомеров различных диаметров на проливной установке Гродненского ЦСМС, с возможностью отображения погрешности измерения в реальном времени.

Технологии современного мира развиваются с каждым днем все быстрее, в связи с чем автоматизация измерений и технологических процессов становится все более актуальной. В ближайшее время планируется переход от обычных механических счетчиков воды к электронным расходомерам с возможностью удаленного снятия показаний [1]. На данный момент самым простым и дешевым способом получения информации о количестве оборотов крыльчатки расходомеров является использование герконов или датчиков Холла. При прохождении сквозь расходомер определенного объема воды (обычно 10 либо 100 литров) магнит, закрепленный на редукторе расходомера, делает полный оборот и проходит над датчиком магнитного поля. При этом происходит замыкание контактов геркона или появление электрического сигнала на выходе датчика Холла. Исходя из количества импульсов, можно судить об общем объеме потребленной воды.

Основная цель разработки описываемого устройства заключается в автоматизации поверки расходомеров на проливной установке ЦСМС для сокращения затрачиваемого оператором времени.

Общий принцип работы устройства: один из выводов геркона поверяемого расходомера подключен к источнику питания, другой подключается к одному из 16 входов устройства. Сигнал поступает на вход триггера Шмитта, подавляющего дребезг контактов. Далее сигнал поступает на счетчик импульсов, выполненный на базе микросхем CD4520BE, которые включают в себя два четырехразрядных двоичных счетчика [2]. Счетчики включены последовательно и позволяют считать до 255 импульсов, поступающих от расходомера. Цифровые выходы счетчика соединены со входами микросхем SN74LS373N. Данные микросхемы являются 8-битными параллельными регистрами, имеющими три состояния выхода с функцией хранения последних данных [3]. Благодаря наличию третьего высокоимпедансного состояния возможно объединение выводов данных микросхем в общую шину данных с целью экономии выводов микроконтроллера. Выбор необходимых данных для обработки осуществляется подачей низкого уровня сигнала на разрешающий вход регистра, данные с которого необходимо обработать. Все вычисления, обработка, выбор данных и последующий вывод информации на дисплей осуществляет микроконтроллер Arduino Mega [4].

В настоящее время макет устройства проходит испытания. Планируется его внедрение в производственный процесс Гродненского ЦСМС.

Блок-схема устройства представлена на рисунке 1.

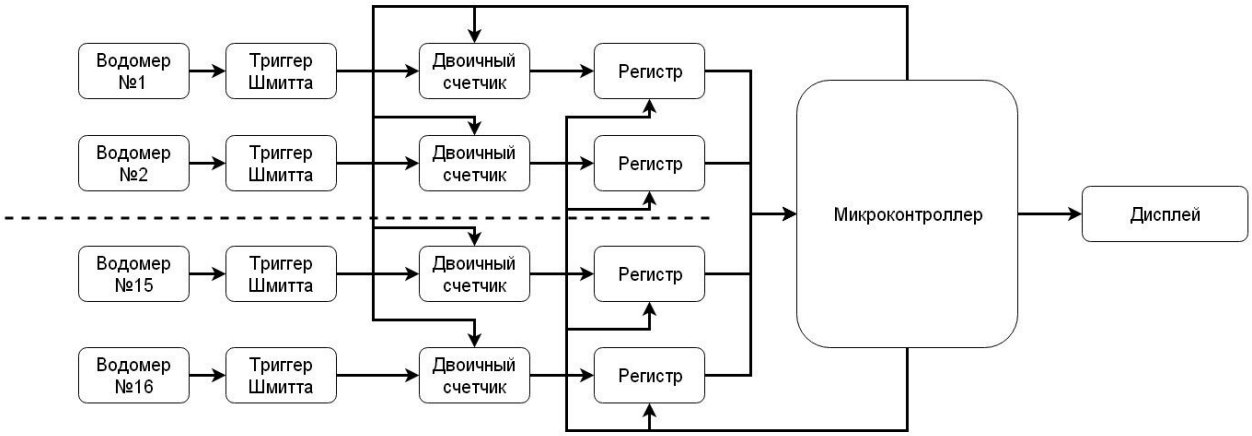


Рисунок 1 – Блок-схема устройства

Список литературы

1. Замена счетчиков воды в 2019 году // СБ. Беларусь Сегодня [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sb.by/articles/zamena-schetchikov-vody-v-belarusi-nachnetsya-v-2019-godu.html. – Дата доступа: 10.10.2018.

2. TENHNICALDATA // CD4520BE [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/ CD4520BE.pdf. – Дата доступа: 21.12.2018.

3. TENHNICALDATA // SN74LS373N [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/ SN74LS373N.pdf. – Дата доступа: 22.12.2018.

4. Занимательная робототехника [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: http://edurobots.ru/2015/02/arduino-dlya-nachinayushhix-urok-9-podklyuchenie-datchika-temperatury-i-vlazhnosti-dht11-i-dht22. – Дата доступа: 21.11.2018.

This paper describes the general principle of operation of the device for the simultaneous calibration of flow meters in a pouring installation. A block diagram of the device with the main nodes and connections is presented.

Полубятко Андрей Иванович, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, andrey3583366@mail.ru.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Беларусь, german@grsu.by.

УДК 681.26:53.089.6

А. В. САВОЩЕНЯ

ПОВЕРКА И КАЛИБРОВКА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ МАССЫ МАЛЫХ ЗНАЧЕНИЙ

Исследованы возможности совершенствования методов метрологического контроля средств измерения массы малых значений с учетом современных международных подходов в теоретической метрологии.

Широкое применение средства измерения массы получили в народном хозяйстве, при проведении самых разнообразных научно-исследовательских работ.

Важность точного измерения массы и развитие техники ее измерения приводят к необходимости модернизации методов и средств метрологического контроля средств измерения массы.

Особенно актуальны оптимизация и повышение качества метрологического контроля средств измерения массы малых значений.

Цель настоящей работы – определение подходов к совершенствованию методов метрологического контроля средств измерения массы.

В качестве технических средств, обладающих нормированными метрологическими характеристиками и используемых для измерений и, в частности, для измерения массы применяют меры и измерительные приборы. К измерительным приборам относят весы, весовые дозаторы и контрольные весовые автоматы (контрольные весы).

Измерения массы малых значений производят весами лабораторными [1]. В зависимости от нормируемых значений метрологических характеристик весы лабораторные подразделяются на классы точности: специальный (I) , высокий (II), средний (III).

В понятие метрологического контроля средств измерения входит поверка и калибровка. Калибровка весов – это комплекс технических мероприятий, устанавливающих соотношение между значением величины массы, полученным с помощью весов и соответствующим значением величины массы, определенным с помощью эталона (гири) с целью привидения метрологических характеристик весов к установленным техническим требованиям (паспорт весов). Целями поверки являются оценка и подтверждение соответствия поверяемых средств характеристикам, приведенным в технических условиях. При поверке весов такими характеристиками являются, например, погрешности измерений массы. Принципиальное отличие калибровки от поверки: при калибровке определяются и подтверждаются действительные метрологические характеристики СИ; при поверке определяется и подтверждается соответствие СИ установленным требованиям.

Существует четыре способа калибровки средств измерения массы:

- внешняя калибровка весов – это калибровка при помощи внешней калибровочной гири;
- внутренняя калибровка – это калибровка при помощи встроенного в весы эталонного калибровочного груза, с участием оператора;
- внутренняя полуавтоматическая – встроенным калибровочным грузом, при помощи автоматического привода калибровки – с участием оператора;
- внутренняя автоматическая встроенным калибровочным грузом, при помощи автоматического привода калибровки без участия оператора, при изменений факторов окружающей среды влияющих на показания весов.

Поверку весов проводят эталонными гирями, соответствующими классам точности по ГОСТ 7328-2001 [2]. Поверку весов следует проводить при нормальных условиях измерений по ГОСТ 8.395-80 [3].

Для лабораторных весов погрешность взвешивания по шкале определяют для ненагруженных весов в следующей последовательности [4]: устанавливают весы в нулевое положение; на чашку поочередно помещают

образцовые гири r_1, r_2, r_3, r_4, по массе соответствующие 1/4, 1/2, 3/4 и всему пределу взвешивания по шкале, и каждый раз снимают отсчет по шкале весов.

Погрешность взвешивания по шкале рассчитывают по формуле:

$$\Delta_i = A_i - r_i,$$

где A_i – отсчет по шкале весов; r_i – масса образцовых гирь, помещенных на чашку весов.

Однако, поверке микровесов и ультрамикровесов (с дискретностью от 0,01 мг до 0,1 мкг) обычных наборов образцовых гирь (от 1 мг) недостаточно. В таких случаях возможно применение специальных микрограммовых гирь (например, фирмы Mettler Toledo).

Вместе с тем это не решает кардинально проблему повышения точности измерения малых значений масс. И это понимает Международное метрологическое сообщество. 16 ноября 2018 года в Версале (Франция) на 26-й Генеральной конференции мер и весов утвержден новый эталон килограмма.

Международная система единиц необходима для того, чтобы повседневные единицы измерений, будь то метр или секунда, оставались сопоставимыми и согласованными во всем мире. Новые определения закреплены в отношении четырех из семи базовых единиц, а именно килограмма, ампера, кельвина и моля**.**

Переопределение облегчит практическое использование системы SI. Все единицы теперь выражены при помощи констант, наблюдать которые можно в окружающем мире (например, это касается скорости света, постоянной Планка или постоянной Авогадро). Использование этих неизменяющихся естественных эталонов для измерений обеспечит надежность и постоянство определений единиц измерения в будущем. Последний оставшийся артефакт, международный прототип килограмма, официально заменяется новой реализацией в виде физического эксперимента, опирающегося на значение постоянной Планка.

Учитывая эти кардинальные изменения в подходах к реализации эталона массы, а также опираясь на уже имеющиеся и постоянно развивающиеся достижения в области нанотехнологий, можно предложить создание эталонных «наногирь», используя нанотехнологические методы «снизу вверх» и «сверху вниз».

В работе исследованы возможности совершенствования методов метрологического контроля средств измерения массы малых значений с учетом современных международных подходов в теоретической метрологии.

Список литературы

1. ГОСТ 24104-2001. Весы лабораторные. Общие технические требования.
2. ГОСТ 7328-2001. Гири. Общие технические условия.
3. ГОСТ 8.395-80. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования.
4. ГОСТ 8.520-2005. Государственная система обеспечения единства измерений. Весы лабораторные. Методика поверки.

In this work, the possibilities of improving the methods of metrological control of small-mass mass measurement tools are investigated.

Савощеня Алена Валерьевна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, savoshenya2013@yandex.by.

Научный руководитель – *Василюк Геннадий Тимофеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, vasilyuk@grsu.by.

УДК 620.9

А. В. ТЕТЬКО

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОДЕИОНИЗАЦИИ ВОДОПОДГОТОВКИ В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Рассмотрены возможности и преимущества замены системы водоподготовки, которая была выполнена на базе ионного обмена.

Анализ действующего производства водоочистки на базе ионного обмена мощностью 300 м^3/ч выявил следующие недостатки:

1. Паузы на регенерацию, после каждого цикла очистки.

2. Низкая гидрофильность – в результате ионы медленно проникают в смолу, получается невысокая скорость очищения воды;

3. Полная замена Н-катионитных и анонитных фильтров с использованными смолами примерно каждые 3 месяца.

4. Слеживание гранулированных смол, что приводит к накоплению мусора и чаще требует проведение регенерации.

5. Разрыхление смол для антислеживания. Метод рыхления приводит к разрушению гранулированных смол, что в итоге приводит к налипанию и полной замене фильтра (пункт 3).

6. Многие восстановители наносят вред фильтру. Поэтому требуют тщательной промывки для их извлечения.

7. Особые требования для хранения восстановителей, что естественно влечёт затраты.

8. Утилизация вредных веществ, полученных в ходе очистки, требуют дополнительных затрат.

Для устранения существующих недостатков было решено провести переход на технологию непрерывной электродеионизации (EDI) с использованием модулей lonpure VNX-55-EP (рисунок 1) с увеличенной производительностью 18 $м^3$/ч, в количестве 4 единиц, с заменой технологии производства и модернизацией электроснабжения с 0,4 кВт на 0,6 кВт.

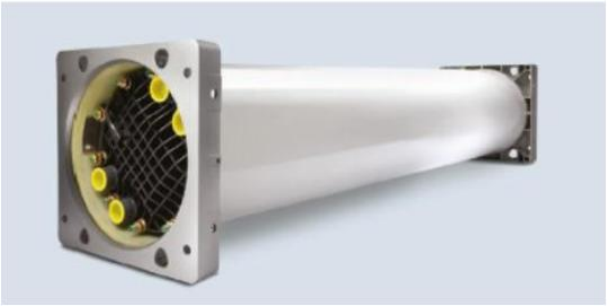


Рисунок 1 – Вид модуля VNX-55-EP

Система EDI предназначена для непрерывного производства воды, получаемого из системы обратного осмоса, которая работает без простоев и остановок на регенерацию. Для работы системы не требуется никаких кислотных химикатов или оснований, что позволяет значительно сократить объем отработанной воды, использование химических продуктов и снизить риски для безопасности персонала. Модули системы ЭДИ построены с раздельными участками потока с мембранами, содержащими смолы для катионного и анионного обмена. Питающая вода подается в модуль ЭДИ из одного источника и распределяется по электродному потоку и потоку концентрата, а также разбавляется во всех модулях. Под влиянием постоянного тока ионы переходят из питающего потока в поток концентрата, затем фильтрат воды выходит из модуля ЭДИ, обладая очень низкой удельной электропроводностью.

Регенерация блока ЭДИ представляет собой непрерывный электрический процесс и не требует остановок для замены рабочего реагента.

Далее приведены параметры качества питающей воды на входе и выходе ЭДИ и рабочие параметры модуля.

Максимальные параметры питающей воды	
Показатель удельной электропроводности питающей воды, включая CO_2 и кремнезем	< 40 мкСм/см
Источник питающей воды	Фильтрат обратного осмоса
Температура	40–113 F (5–45 ºC)
Давление на подаче	20–100 psi (1,4–7 бар)
Максимальное общее содержание хлора (как Cl_2)	< 0,02 ppm
Железо (Fe)	< 0,01 ppm
Марганец (Mn)	< 0,01 ppm
Сульфид (S)	< 0,01 ppm
pH	4–11
Общая жесткость ($CaCO_3$)	< 1,0 ppm

Растворенная органика (общий органический углерод С)	< 0,5 ppm
Кремнезем (SiO_3)	< 1,0 ppm
Типовые рабочие параметры модуля	
Восстановление	90–95 %
Расход: минимум	25,0 гал/мин. (5,7 $м^3$/ч)
Расход: номинальный	55,0 гал/мин. (12,5 $м^3$/ч)
Расход: максимум	82,5 гал/мин. (18,7 $м^3$/ч)
Постоянное напряжение	0–600
Сила постоянного тока	0–13,2
Качество воды на выходе	
Сопротивление воды – фильтрат ОО	> 17 МОм-см
Сопротивление воды – фильтрат ДИ	> 18 МОм-см
Удаление оксида кремния (SiO_2)	≥ 95 %
Удаление бора (B)	≥ 95 %
Удаление натрия (Na)	99,8 %
Удаление хлора (Cl)	99,8 %

Таким образом, предложенная методика позволяет избавиться от недостатков предыдущей технологии производства, а также выполнить переход на более качественный уровень водоочистки, с потенциалом к дальнейшему увеличению производительности, без изменения производства, путем добавления модулей EDI.

Список литературы

1. Технический паспорт для EDI модуля (электродеионизации) от 18.01.2018 г.
2. Промышленный технологический регламент № 32/4 от 17.02.2017 г.

This work is dedicated to: analyzing the current production of water treatment, dismantling the water treatment line based on ion exchange, with a capacity of 300 m^3/h. And installing an EDI system with a capacity of 80 m^3/h.

Тетько Алексей Владимирович, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, alex_guest51193@mail.com.

Научный руководитель – *Комар Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, v.komar@grsu.by.

УДК 621.384.4

О. И. ТИХОН

МЕТОД КОМБИНИРОВАННОЙ ФОТОХИМИЧЕСКИ СТИМУЛИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН

Фотохимически усиленный процесс очистки, основанный на использовании ультрафиолета с озоном (УФ/O_3) в условиях атмосферного давления, характеризуется отсутствием радиационных повреждений сформированных структур ИС по сравнению с другими широко применяемыми методами сухой очистки, а относительная простота реализации позволяет данному методу обработки находить применение для решения ряда технологических задач микроэлектроники.

Технологические маршруты изготовления интегральных микросхем предусматривают проведение ряда повторяющихся операций. Одними из таких операций являются удаление фоторезистивных маскирующих плёнок и межоперационная очистка поверхности полупроводниковых пластин от органических загрязнений, базовыми технологическими процессами для которых считаются использование жидких технологических сред и вакуумно-плазменная обработка.

В качестве альтернативы среди способов удаления органических плёнок и загрязнений с поверхности полупроводниковых пластин применение находит фотохимически усиленный процесс очистки, основанный на использовании ультрафиолета с озоном (УФ/O_3) в условиях атмосферного давления. УФ/O_3 процесс

характеризуется отсутствием радиационных повреждений сформированных структур ИС по сравнению с другими широко применяемыми методами сухой очистки [1]. Процедура обработки в УФ/O_3 показала эффективность при работе с различными загрязнениями, включая остатки от чистящих растворителей, таких как ацетон, этанол, метанол, изопропиловый спирт, трихлорэтан и трихлортрифторэтан [2, 3].

Принцип очистки с применением УФ/O_3 заключается в том, что органические соединения превращаются в летучие вещества (вода, углекислый газ, азот) в результате разложения под воздействием ультрафиолетовых лучей и сильного окисления во время образования и разложения O_3. Основными активирующими факторами рассматриваемого способа очистки являются ультрафиолетовое излучение и озон. Во многих случаях для формирования полезных химических соединений достаточно использовать в качестве источников излучения ртутные (Hg) ультрафиолетовые лампы низкого давления. Основной задачей в этом случае является согласование выхода источника УФ-излучения с энергиями, необходимыми для эффективного фотолиза [1].

Основные длины волн ультрафиолетовых лучей, излучаемые стандартной ртутной лампой низкого давления, составляют 184,9 нм и 253,7 нм. Полоса 184,9 нм диссоциирует молекулярный кислород на триплетный кислород

$$O_2 + h\nu\,(184{,}9) \rightarrow 2O\,(^3P)\ , \tag{1}$$

который соединяется с молекулярным кислородом в основном состоянии и образует озон

$$O_2\,(^3\Sigma_{-g}) + O(^3P) + M \rightarrow O_3 + M\,, \tag{2}$$

где M = O_2, O_3, N_2, CO_2 и т. д. [4].

В то же время полоса 253,7 нм диссоциирует O_3, произведенный полосой 184,9 нм или сторонним генератором озона, на молекулярный кислород или синглетный атомарный кислород, обладающий сильной окислительной способностью

$$O_3 + h\nu\,(253{,}7) \rightarrow O_2\,(^1\Delta g) + O(^1D)\,. \tag{3}$$

Полосы 184,9 нм и 253,7 нм также активируют травление органического материала. Очистка в УФ/O_3 является, таким образом, преимущественно результатом фоточувствительных процессов окисления, в ходе которых органические соединения также поглощают УФ лучи, что вызывает фотолиз и выделение веществ по схеме, представленной на рисунке 1. На данной схеме $h\nu_1$ соответствует длинам волн УФ-излучения, поглощаемым молекулами органических соединений и способствующим их разложению; $h\nu_2$ – длинам волн 184,9–253,7 нм, обеспечивающим разложение O_2 и формирование озона; $h\nu_3$ – длинам волн 253,7 нм и более, обеспечивающим формирование атомарного кислорода при диссоциации озона.

Ключевыми факторами для удаления фоторезиста с кремниевых пластин является присутствие постоянного потока O_2/O_3 рабочего газа в камеру травления, а также наличие нагрева обрабатываемой пластины.

Согласно [4] повышение температуры подложки ведёт к росту скорости удаления фоторезиста, что связано с интенсификацией взаимодействия между резистом и атомами кислорода, сформированными в результате фотохимического или термического разложения O_3. С ростом температуры обрабатываемого полимера и рабочего газа растёт скорость термического разложения O_3, тем самым увеличивая концентрацию атомов кислорода, участвующих в травлении.

Рисунок 1 – Упрощённая схема процесса очистки в ультрафиолете с озоном

При рассмотрении влияния УФ-излучения на процесс обработки фоторезиста считается [4], что при более низких температурах (150–200 °C) основное влияние на рост скорости удаления материала оказывает активация и/или фотолизация резиста, приводящая к усилению процесса травления атомами кислорода. Также росту скорости удаления материала способствует высокая концентрация атомарного кислорода у поверхности подложки, являющаяся следствием процесса фотодиссоциации озона. Основной эффект от УФ-облучения

заключается в снижении энергетического барьера для травления фоторезиста при низких и умеренных температурах и повышении химической активности газового потока за счёт диссоциации озона.

Таким образом, относительная простота реализации, а также возможность проведения процесса в условиях атмосферного давления позволяет методу комбинированной УФ/O_3 обработки найти применение для решения таких технологических задач микроэлектроники, как удаление органических загрязнений, модификация поверхности для лучшей адгезии и герметизации, предварительная очистка пластин перед процессом эпитаксии и осаждением тонких плёнок, улучшение смачиваемости поверхности и других.

Практический интерес также представляет возможность применения УФ/O_3 метода очистки для удаления углеродных полимерных остатков с внутренней поверхности плазменных реакторов. Использование подобного способа очистки может позволить сократить время простоя технологического оборудования, тем самым повысив эффективность производственного процесса.

Список литературы

1. Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology / edited by K. Reinhardt, W. Kern. – 3rd edition. – Norwich : William Andrew, 2018. – 760 p.

2. Vig, John R. UV/ozone cleaning of surfaces / John R. Vig // J. Vac. Sci. Technol. – 1985. – Vol. 3, № 3. – P. 1027–2034.

3. Basics of UV-Ozone Surface Cleaning [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.samcointl.com/basics-uv-ozone-cleaning-surfaces/. – Дата доступа: 15.01.2019.

4. Wood, P. C. Critical Process Variables for UV-Ozone Etching of Photoresist / P. C. Wood, T. Wydeven, O. Tsuji // MRS Proceedings. – 1993. – Vol. 315. – P. 237–242.

A photochemically intensified cleaning process based on the use of ultraviolet with ozone (UV/O_3) at atmospheric pressure is characterized by the absence of radiation damage to the formed IC structures, compared to other widely used dry cleaning methods. The relative ease of implementation of this process allows it to find application for solving a number of technological problems in microelectronics.

Тихон Олег Игоревич, аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, kritgar@bsuir.by.

Научный руководитель – *Мадвейко Сергей Игоревич*, кандидат технических наук, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, madveyko@bsuir.by.

УДК 53.06

Е. В. ЯЦЕВИЧ, Ю. В. ЗАПОРОЖЧЕНКО, А. В. АКСЮЧИЦ

УПРАВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ ПОЛИМЕРОВ В ПЛАЗМЕ АТМОСФЕРНОГО РАЗРЯДА

Проведено исследование влияния плазмы атмосферного разряда на поверхностные свойства полимерных материалов. После обработки в атмосферной плазме значительно улучшилась гидрофильность поверхности: смачиваемость гидрофобного политетрафторэтилена увеличилась в 1,5 раза, а полиимида – в 5 раз.

Для многих процессов имеет большое значение чистота поверхности. Традиционные химические методы не дают требуемой чистоты, к тому же токсичны и огнеопасны. Ионно-плазменные методы имеют высокую себестоимость. Альтернативным методом очистки и активации поверхности является плазма атмосферного разряда. Она имеет низкую себестоимость, так как не требует средств создания вакуума и производит очитку на атомарном уровне.

Обработка материалов проводилась с помощью экспериментальной установки, структурная схема которой представлена на рисунке 1. Установка включает баллон с плазмообразующим газом аргоном (1), регулятор расхода газа РРГ-12 (2), обрабатываемую подложку (3), штатив (4), источник питания (5) и разрядную систему (6). В установке используется разрядное устройство коаксиального типа с диэлектрическим барьерным разрядом для создания плазмы диффузного типа при атмосферном давлении. Данная система позволяет формировать плазменный факел длиной до 3 см, с зоной обработки диметром до 1 см [1].

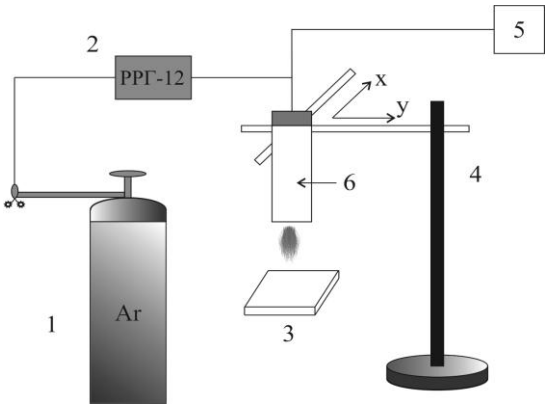


Рисунок 1 – Схематичное изображение экспериментальной установки

Проводилось исследование влияния плазменной обработки на гидрофильные свойства политетрафторэтилена (ПТФЭ) и полиимида (ПИ).

Для оценки изменения поверхностных свойств полимеров при обработке в атмосферной плазме использовался метод лежащей капли. С помощью данного метода измерялся краевой угол смачивания поверхности. Для определения угла смачивания на поверхность наносилась капля объемом 0,01 мл, а затем производилась ее фотофиксация, и с помощью программы AutoCAD определялся угол смачивания [2–4].

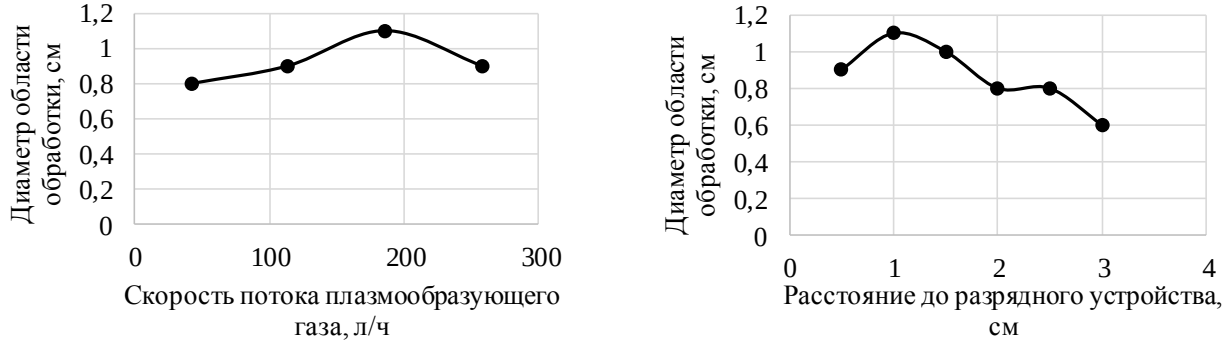
При оценке смачиваемости поверхности методом лежащей капли имеет значение площадь, на которую наносится капля. Наиболее точное измерение угла смачивания достигается при максимальной площади обработки, которая зависит от расхода плазмообразующего газа и расстояния между разрядным устройством и образцом. Данные параметры были исследованы через измерение диаметра зоны обработки.

Для оценки площади зоны обработки исследовали зависимости диаметра области обработки от расхода плазмообразующего газа (рисунок 2*а*) и расстояния образец – разрядное устройство (рисунок 2*б*) посредством оценки зоны светимости плазмы и изменения свойств поверхности.

Из данных, представленных на рисунке 2, видно, что наибольшая площадь области обработки достигается при расходе газа 186 л/ч на расстоянии 1 см от разрядного устройства. Площадь области обработки при данных параметрах составила ≈ 0,785 см^2.

Обработка поверхности полимеров проводилась при мощности разряда 45 Вт, расходе аргона 186 л/ч и расстоянии между образцом и разрядным устройством 1 см.

Для количественного описания влияния плазменной обработки на поверхностные свойства полимеров проводилось исследование зависимости смачиваемости поверхности от времени обработки.



а *б*

Рисунок 2 – Графики зависимости диаметра зоны обработки поверхности образца от скорости потока плазмообразующего газа (а) и от расстояния между образцом и разрядным устройством (б)

Влияние времени обработки на величину смачиваемости поверхности ПТФЭ представлено на рисунке 3.

Существенного увеличения смачиваемости от 105° до 68° удалось достичь за 80 секунд плазменной обработки. За первые 20 секунд поверхность очищается, и образуются свободные радикалы. При обработке более 80 секунд поверхность разрушается, о чем свидетельствует увеличение угла смачивания.

На рисунке 4 представлена зависимость краевого угла смачивания водой поверхности полиимидной жаропрочной ленты от времени обработки.

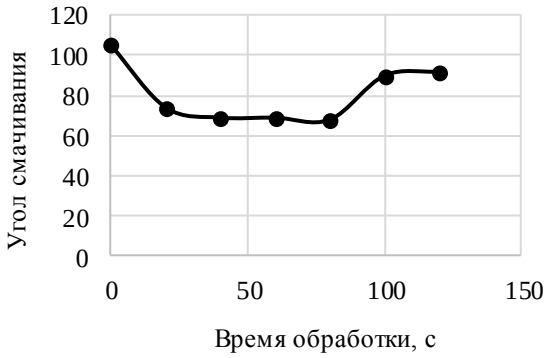


Рисунок 3 – График зависимости угла смачивания поверхности ПТФЭ от времени обработки

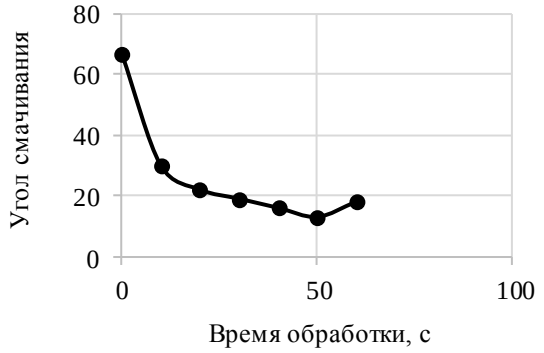


Рисунок 4 – Зависимость угла смачивания поверхности полиимидной плёнки от времени обработки

В процессе обработки угол смачивания уменьшается от 67° до 12° за 50 секунд. Это говорит об увеличении смачиваемости поверхности.

Полученные результаты свидетельствуют, что обработка в плазме атмосферного давления позволяет улучшить смачиваемость поверхности полимеров в 1,5–5 раз за 50 секунд. Это расширяет области применения данных полимеров.

Список литературы

1. Котов, Д. А. Изучение параметров плазменной струи, генерируемой диэлектрическим барьерным разрядом / Д. А. Котов, Я. И. Шукевич, О. С. Сигай // Молодёжь в науке – 2016 : материалы междунар. конф. – Минск : Беларуская навука, 2017. – С. 348–356.

2. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей / А. Адамсон. – М. : Мир, 1979. – 568 с.

3. Метод лежащей капли [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://tirit.org/articles/surface_theory_sessile.php.

4. Уразаев, В. Гидрофильность и гидрофобность / В. Уразаев // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 3. – С. 33–36.

A study was made of the atmospheric discharge plasma effect on the polymeric materials surface properties. After treatment in atmospheric plasma, the surface hydrophilicity significantly improved: the wettability of hydrophobic polytetrafluoroethylene increased in 1,5 times and of polyimide in 5 times.

Яцевич Екатерина Вадимовна, магистрант кафедры микро- и наноэлектроники факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, k_yatsevich@mail.ru.

Запорожченко Юлия Владимировна, магистрант кафедры микро- и наноэлектроники факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, yliyazaporozchenko@gmail.com.

Аксючиц Александр Владимирович, магистрант кафедры микро- и наноэлектроники факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, alex.ak11996@mail.ru.

Научный руководитель – *Котов Дмитрий Анатольевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, kotov@bsuir.by.

СЕКЦИЯ 4.
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 530.161

А. Ю. АКСЕНОВА

КОМПЬЮТЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ ПАРАДОКСА ЛОШМИДТА

Как известно, детерминизм Ньютона – Лаплапса работает для систем с малым числом частиц и на ограниченном временном интервале, истинная природа физических законов стохастическая. На примере моделирования различных процессов (молекулярная динамика, небесная механика) демонстрируется стохастичность (парадокс Лошмидта) физических явлений. Разработаны модели интерпретации парадокса Лошмидта на примере идеального газа [1], динамики молекулярных кластеров [2] и задач небесной механики.

Рассмотрены стохастическая и дисковая модели идеального газа, динамики молекулярных кластеров и динамики астероида у поверхности Земли. Парадокс Лошмидта демонстрируется на сравнении исходных конфигураций объектов и конфигураций, полученных обращением времени.

На рисунке 1 представлены исходная конфигурация модели атомного газа и поле обращения времени через число итераций. На рисунке 2 представлена исходная конфигурация молекулярного кластера в начальный момент времени и через период времени (20 с, 30 с, 5 с), на рисунке 3 продемонстрировано обращение по времени движения осколков астероида, взорванного над поверхностью Земли.

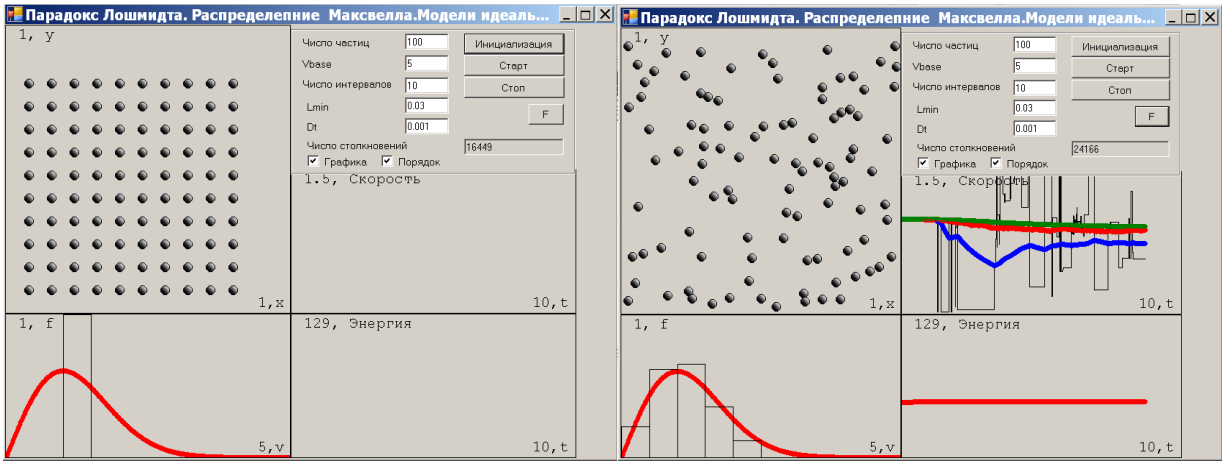


Рисунок 1 – Исходная конфигурация модели атомного газа и поле обращения времени через число итераций

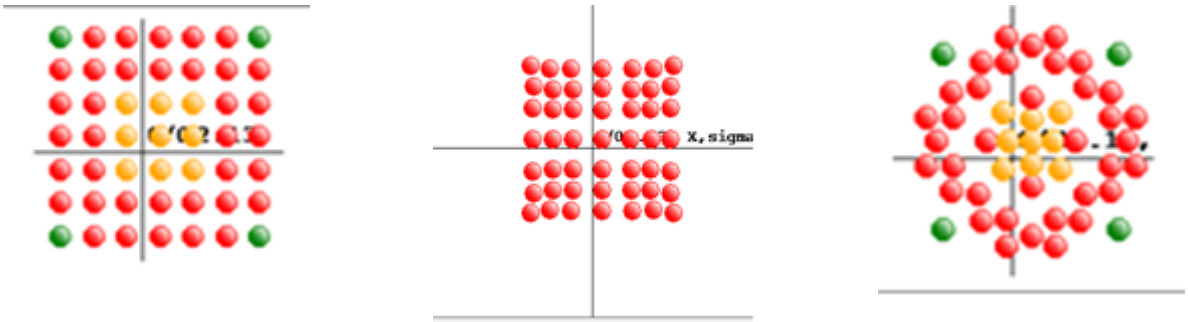


Рисунок 2 – Исходная конфигурация молекулярного кластера в начальный момент времени и через период времени (20 с, 30 с, 5 с)

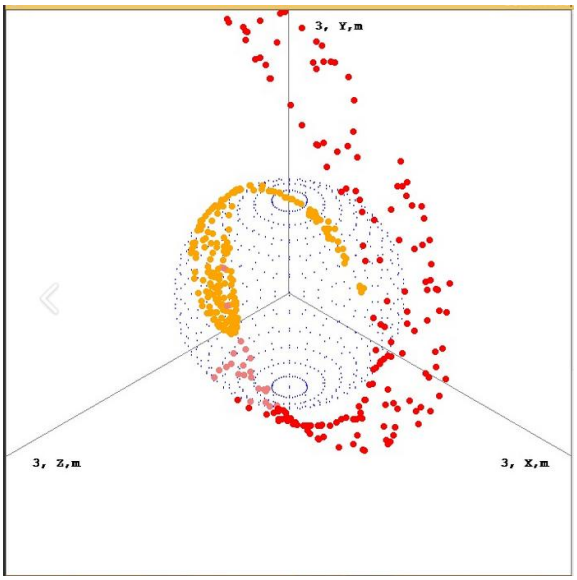


Рисунок 3 – Обращение по времени движения осколков астероида, взорванного над поверхностью Земли

Разработанные модели демонстрируют стохастичность физических процессов, которые обусловлены наличием флуктуаций параметров процессов. Стохастичность физических процессов для системы большого числа частиц затрудняет их детальное описание. Моделирование физических процессов фактически методами детерминизма Ньютона – Лапласа с учетом флуктуаций позволяет описать и представить стохастичность процесса. Модели могут быть использованы в качестве иллюстративного материала при проведении занятий по соответствующей тематике.

Список литературы

1. Аксенова, А. Ю. Парадокс Лошмидта / А. Ю. Аксенова // Физика конденсированного состояния : материалы XXV междунар. науч.-практ. конф. аспир., магистр. и студ. (Гродно, 20 апр. 2017 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы, физ.-техн. фак.; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2017. – С. 124–125.

2. Аксенова, А. Ю. Динамические свойства молекулярных кластеров / А. Ю. Аксенова // Физика конденсированного состояния : материалы XXVI междунар. науч.-практ. конф. аспир., магистр. и студ. (Гродно, 19 апр. 2018 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы, физ.-техн. фак. ; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2018. – С. 124–125.

The developed models demonstrate stochasticity of physical processes, which are caused by the presence of fluctuations of process parameters. The stochasticity of physical processes for a system of a large number of particles makes their detailed description difficult. The modeling of physical processes using the Newton – Laplace determinism method, taking into account fluctuations, allows us to describe and represent the stochasticity of the process. Models can be used as illustrative material when conducting classes on relevant topics.

Аксенова Анастасия Юрьевна, студентка 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, nik.person444@gmail.com.

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, nik@grsu.by.

УДК 532.021:022;539.021

Е. В. ВИНОГРАДОВ

НЕДОСТАТКИ МЕТОДА ЦЕРНИКЕ И ПРИНСА

Приведены различные методики для описания атомно-молекулярной структуры аморфных и кристаллических объектов. Установлены недостатки формулы Цернике и Принса, используемой для практических расчетов структуры аморфных объектов, позволяющей рассчитать функцию радиального распределения атомной плотности (ФРРАП) [1].

$$\text{ФРААП} = 4\pi r^2\rho_0(r) = 4\pi r^2\rho_0 + 8\pi r^2\int_{S_1}^{S_2}\frac{I(S)-f^2(S)}{f^2(S)}\sin(2\pi Sr)\,dS \qquad (1)$$

где ρ_0 – плотность вещества, f^2 – суммарная атомная рассеивающая способность, $I(S)$ – интенсивность рассеянного луча. Первое слагаемое в правой части (1) не несёт никакой информации. Второе слагаемое называется корреляционной функцией. Интенсивность в формуле (1) также требует анализа, так как на величину $I(S)$ кроме структурного фактора (F^2) влияют и другие параметры: поляризации, Лоренца и геометрический, объединенные в (PLG) – фактор, зависящий от угла дифракции и от экспериментальной методики. Кроме этого есть температурный, размерный факторы и др. [2; 3].

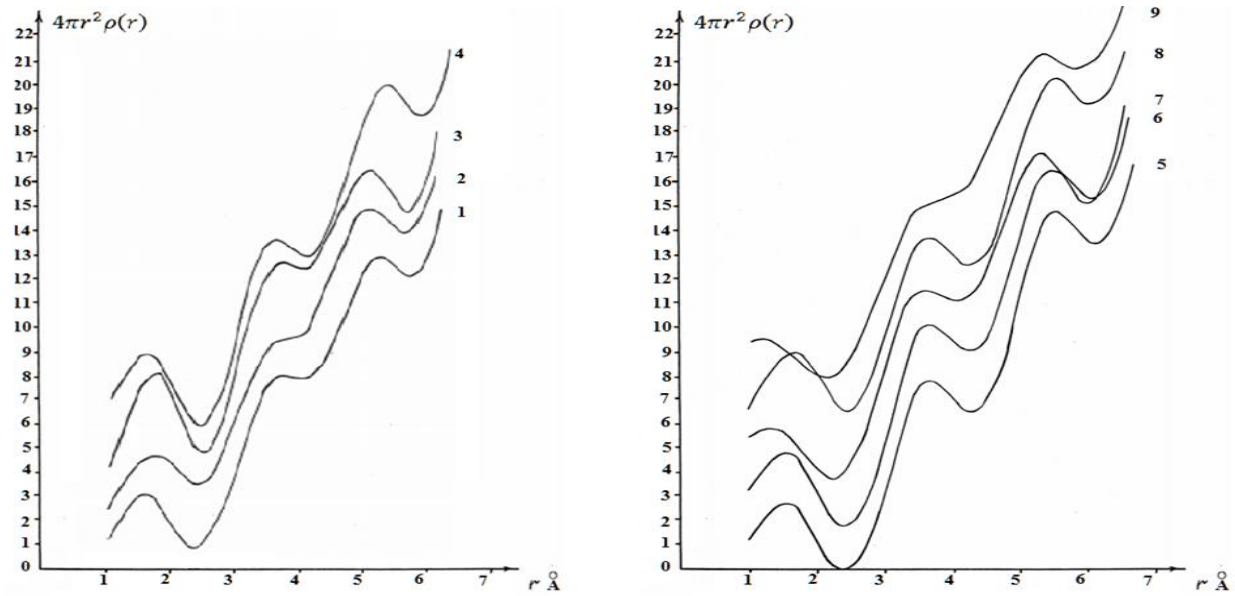


Рисунок 1 – Функции радиального распределения атомной плотности № 1–4, 5–9 (серия 1, 2)

Главным недостатком формулы (1) является то, что она не позволяет осуществить переход к кристаллам. В то же время формула Цернике – Принса однозначно отвечает на вопрос: «Имеются ли структурные различия у некристаллических объектов одного типа, подвергнутых различным внешним воздействиям?»

В качестве объекта исследования были выбраны лазерные стекла с одинаковой основной структурой, но с различными содержаниями и типами легирующих элементов.

Недостатком метода ЦП является то, что предложенная ими формула при предельном переходе от неупорядоченной атомно-молекулярной системы к кристаллам, у которых $I(S)$ является дискретной функцией, как и ФРРАП, тогда как последняя во всех случаях – функция непрерывная. Тагже формула ЦП не приводит к формуле Патерсона, тогда как предлагаемая методика позволяет получить этот переход.

$$P(U) = \sum A^2(S)\cdot\cos\left(2\pi\frac{sin\Theta}{\lambda}U\right)$$
$$A^2 = \frac{I(S)}{PLG}, \qquad (2)$$
$$PLG = 1 + \frac{cos^2 2\Theta}{2sin2\Theta}$$

Исследованы композиты на основе полимеров при изменении концентрации наполнителей наномодикаторов. созданных на основе природных силикатов. Изменение концентрации наполнителя влияет на положение максимумов корреляционной функции, что говорит об структурных изменениях, происходящих в исследуемом образце.

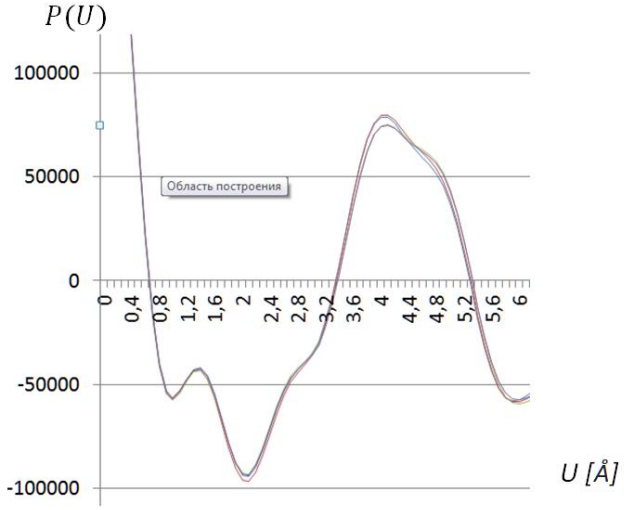


Рисунок 2 – Корреляционные функции для полимеров № 1–4 (серия 1)

Построены корреляционные функции, показывающие, что изменение концентрации наполнителя влияет на свойства композита (рисунок 2). Основные изменения происходят вблизи поверхности наполнителя.

Список литературы

1. Лиопо, В. А. Практическая рентгеновская дифрактометрия / В. А. Лиопо, Г. А. Кузнецова, В. И. Калихман, В. В. Война. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2010. – 159 с.
2. Ladd, M. Structure Determination by X-ray Crystallography / M. Ladd, R. Palmer. – Berlin : Springer, 2013. – 756 p.
3. Бюргер, М. Структура кристаллов и векторное пространство / М. Бюргер. – М. : Изд-во иностр. лит., 1961. – 384 с.

Various techniques for describing the atomic-molecular structure of amorphous and crystalline objects are presented. The deficiencies of the Zernike and Prins formula used for practical calculations of the structure of amorphous objects and allowing the calculation of the radial distribution function of the atomic density (RDFAD).

Виноградов Евгений Валентинович, магистрант 2-го года обучения физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.
Научный руководитель – *Лиопо Валерий Александрович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

УДК 537.528

Т. В. ГРИГОРЬЕВА

ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА МЕДНОГО ПРОВОДНИКА В ВОДЕ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Рассмотрены оптимальные условия теплового взрыва медных проводников в воде, показано, что удельная энергия, вводимая в проводник в оптимальном режиме, зависит только от свойств металла проводника. Определено, что электрогидравлический эффект достигается при введении всей энергии, запасенной в конденсаторе, в течение первого полупериода разряда.

Опытным путем была установлена возможность широкого варьирования параметрами принципиальной электрической схемы, воспроизводящей электрогидравлический эффект. Это дало основание ввести понятие «режим работы» силовой установки подразумевая под этим значения основных параметров схемы: емкости и напряжения. Были определены три основных режима: жесткий $U \geq 50$ кВ; $C \leq 0{,}1$ мкФ; средний 20 кВ $\leq U \leq$ 50 кВ; 0,1 мкФ $\leq C \leq$ 1,0 мкФ; мягкий $U \leq 20$ кВ; 1 мкФ $\leq C$.

Оптимальным режимом теплового взрыва считается, когда вся энергия, запасенная в конденсаторе, вводится в проводник в течение первого полупериода разряда.

В данной работе рассмотрим условия оптимального взрыва медных проводников в воде.

Предположим, что энергетические параметры разрядного контура заданы наперед. Для определения геометрических параметров проводника зададим отношения начального напряжения на конденсаторной батарее U_0, емкости конденсаторной батареи C и индуктивности разрядного контура L 3.

$$\begin{cases} d_{opt} = 2\left[\frac{W_0}{z\rho\sigma_0(\Delta+r)}\right]^{\frac{1}{4}} \\ l_{opt} = 2\cdot 10^{-3}U_0\sqrt[4]{LC} \end{cases} \quad (1)$$

где d_{opt} и l_{opt} – диаметр и длина проводника в оптимальном режиме взрыва; W_0 – запасенная энергия конденсаторной батареи; $W_0 = CU_0^2/2$; ρ – плотность; σ_0 – удельная электропроводность; Δ – удельная теплота плавления; r – удельная теплота парообразования металла проводника; z – волновое сопротивление цепи.

По соотношению (1) было проведено численное моделирование оптимальных параметров для медного проводника для трех режимов: жесткого при U = 60 кВ; C = 0,05 мкФ; W = 90 Дж; L = 4,5 мкГн; среднего U = 25 кВ; C = 0,5 мкФ; W = 156,25 Дж; L = 4,5 мкГн; мягкого U = 10 кВ; C = 3 мкФ; W = 150 Дж; L = 4,5 мкГн.

Полученные данные представлены на рисунках 1 и 2.

Баланс энергии при взрыве проводника можно записать следующим образом:

$$\omega = \int_0^{\pi\sqrt{LC}} (R_\omega + R_{ec})(I^2/m)dt, \quad (2)$$

где $\omega = W_0/m$ – суммарная плотность энергии, выделившейся в проводнике и разрядном контуре; m – масса проводника; R_ω и R_{ec} – соответственно сопротивление проводника и эквивалентное сопротивление цепи.

В оптимальном режиме $\int_0^{T/2} R_\omega I^2 dt \geq R_{ec}\int^{T/2} I^2 dt$ по определению, т. е. почти вся запасенная энергия выделяется в проводнике, при этом большая ее часть – к моменту взрыва 4.

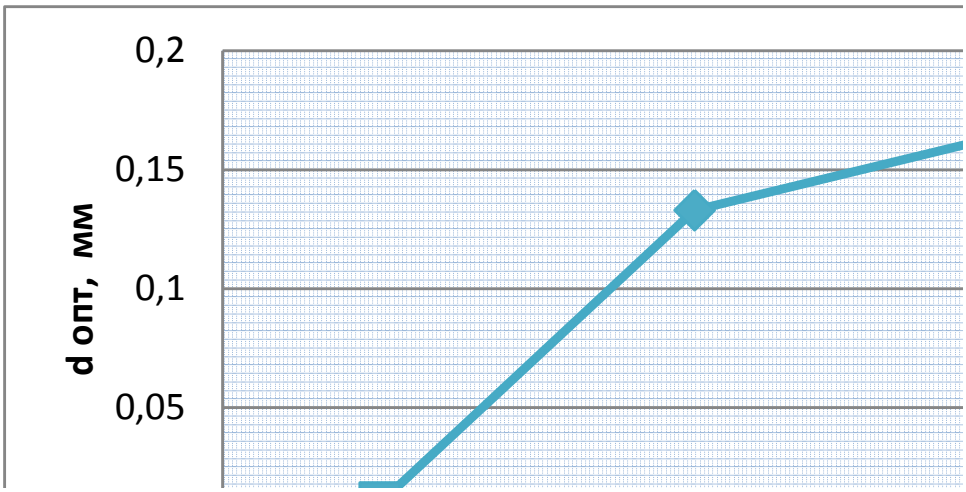


Рисунок 1 – Зависимость величины оптимального диаметра проводника от заряда конденсатора

Используя выражения для d_{opt} и l_{opt} из (1) для определения объема проводника (J/g), можно показать, что весь интеграл в (2) для оптимальных режимов взрыва проводников является постоянной величиной, зависящей только от свойств материала:

$$\omega_{opt} = \left(\frac{W_0}{m}\right)_{opt} = \left[\frac{\sigma_0(\Delta+r)}{8\pi^2\rho}\right]^{1/2}. \quad (3)$$

Рассчитав данную величину для меди, используя (3) и зная постоянные $\rho_M = 8960\,\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\sigma_0 = 5{,}96\cdot 10^7$ см/м; $\Delta = 210$ кДж; $r = 4790\,\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, получили $\omega_{opt} = 20{,}5\,\frac{\text{кДж}}{\text{г}}$.

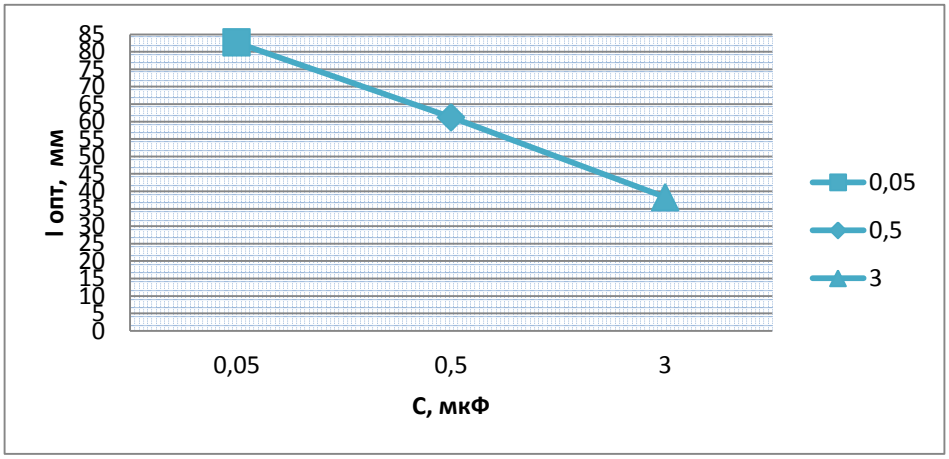


Рисунок 2 – Зависимость величины оптимальной длины проводника от заряда конденсатора

Таким образом, энергия, введенная в проводник, не зависит от параметров разрядного контура и от размеров проводника, а является константой свойств материала проводника. Соотношение (3), наравне с (1) и независимо от него, является условием реализации оптимального режима взрыва проводников в жидкости. Оценка $(W_0 / m)_{opt}$ по табличным данным дает значения для меди $\omega_{opt} = 20{,}1\,\frac{\text{кДж}}{\text{г}}$. То есть количество энергии на единицу массы проводника для различных металлов неодинаково, зависит только от их свойств и не зависит от внешних регулируемых параметров 2.

На основе полученных соотношений для определения геометрических параметров проводников нами получено выражение для определения удельной энергии, необходимой для реализации одиночного взрыва проводников в воде. Установлено, что полная энергия, введенная в проводник, для таких режимов является константой материала проводника и не зависит от внешних регулируемых параметров. Это позволяет определять параметры разрядного контура и проводника для реализации электровзрыва в оптимальном режиме и возможность осуществления его таким образом, чтобы энергия, выделившаяся в проводнике в процессе взрыва, была равна энергии, необходимой для его полного испарения.

Список литературы

1. Юткин, Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. − 253 с.

2. Хайнацкий, С. А. Условия реализации оптимального режима электрического взрыва проводников в жидкости / С. А. Хайнацкий // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35, вып. 7. − С. 15–20.

3. Бурцев, В. А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В. А. Бурцев, Н. В. Калинин, А. В. Лучинский. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

4. Кривицкий, Е. В. Динамика электровзрыва в жидкости / Е. В. Кривицкий. – Киев : Наук. думка, 1986. – 206 с.

The optimal conditions for the thermal explosion of copper conductors in water are shown, and it is shown that the specific energy introduced into the conductor in the optimal mode depends only on the properties of the conductor metal. It is determined that the electro-hydraulic effect is achieved with the introduction of all the energy stored in the capacitor during the first half period of the discharge.

Григорьева Татьяна Валерьевна, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, jatagr@mail.ru.

Научный руководитель – *Тарковский Викентий Викентьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, tarkovsky@grsu.by.

УДК 535.391

И. К. ГУБАРЕВИЧ

УСТАНОВКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАЗЛИЧНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Разработано устройство для создания внешнего электрического поля от 0 до 10^6 В/м различной полярности в ходе воздействия лазерного излучения на поверхность металлов. Описаны особенности конструкции установки, принцип ее использования в эксперименте.

В связи с постоянным расширением сферы технологических применений лазеров изучаются возможности более эффективного их использования, увеличения скорости обработки мишени лазерным излучением и улучшения локализации зоны взаимодействия лазерного излучения с образцом. Для этого на область взаимодействия лазерного излучения с образцом может оказываться внешнее воздействие различного характера. Это могут быть магнитные или электрическое поля, вакуумные камеры, камеры, наполненные инертными газами, криогенные установки и т. д., а также их сочетание. Из перечисленного наиболее простым конструктивным решением является организация постоянного электрического поля в зоне мишени. Для этого достаточно разместить два внешних электрода. Напряжение на электроды можно подавать от различных источников мощностью от 5 до 60 Вт. Причем при небольших токах (менее 10 мА) такой источник должен выдавать напряжение порядка нескольких десятков киловольт.

Подобный источник был собран и использован при проведении экспериментов по изучению плазменного факела [1–2]. Конструктивно такой источник состоит из нескольких блоков (рисунок 1).

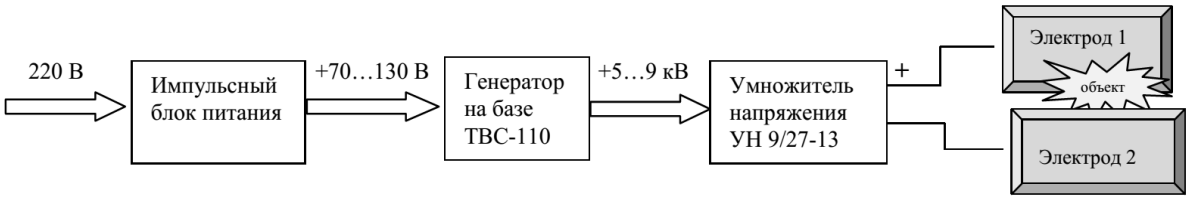


Рисунок 1 – Блок-схема используемой установки для создания электрического поля при воздействии лазерного излучения на объект

Схема состоит из импульсного блока питания, блока генератора с выходным напряжением 5–9 кВ и умножителя напряжения, утраивающего данное напряжение при максимальных значениях тока 1300 мкА и напряжения 27 кВ. Блок питания устройства подключается к сети 220–230 В и на выходе выдает стабилизированные напряжения +5 В, +12 В и напряжение порядка +70...130 В. Данные выходные напряжения необходимы для питания блока генератора.

Блок генератора в выходном каскаде имеет повышающий трансформатор типа ТВС-110, что позволяет получить на его выходной обмотке напряжение от 5 до 9 кВ. Значение этого высоковольтного напряжения можно изменять меняя выходное напряжение импульсного питания в пределах от 70 до 130 В при максимальном токе до 500 мА с помощью подстроечного резистора на плате блока питания и при этом поддерживать его стабильным во время проведения эксперимента. На пластины электродов *1* и *2* идут два изолированных одножильных высоковольтных провода с одинаковыми разъемами, поэтому полярность высоковольтного напряжения на пластинах легко меняется.

Данная конструкция была выбрана в том числе и исходя из доступности всех ее элементов, т. к. большинство блоков и деталей использовалось в кинескопных цветных телевизорах

Например, целью работ [1–2] являлось исследование влияния электрических полей различной напряженности на пространственную и временную эволюцию лазерной плазмы, возникающей при воздействии миллисекундных лазерных импульсов на поверхности металлов (медь, алюминий, олово, свинец). При этом в экспериментах использовалась описываемая установка для создания внешнего электрического поля. Величина его напряженности в пределах от 0 до 10^6 В/м регулировалась расстоянием между пластинами-электродами и подстраивалась путем изменения величины высоковольтного напряжения на пластинах подстройкой выходного напряжения блока питания.

При изучении процессов, происходящих вследствие воздействия лазерного излучения на образец на поверхность твёрдого тела, отмечалось образование облака плазмы. Так как облучаемый образец помещался в межэлектродном промежутке, то вблизи объекта происходило развитие пароплазменного облака, которое

взаимодействовало с внешним электрическим полем. В некоторых случаях происходил пробой, т. е. электрическое замыкание между пластинами *1* и *2* электродов через пароплазмообразное облако. Это приводило к разряду конденсаторов в блоке умножителя, срабатыванию защиты импульсного блока питания и в итоге – к снятию внешнего электрического поля либо к резкому изменению его напряженности. Здесь следует отметить несколько моментов. Во-первых, не всегда подобный пробой происходил после импульсного воздействия лазерного излучения длительностью до 1 мс. Во-вторых, исследовались процессы, происходящие как во время, так и непосредственно после воздействия лазерного излучения: разлет плазменного образования, вытекание плазмы из межэлектродного промежутка через отверстие в электроде, влияние давления воздуха на эти процессы и т. д. Поэтому важно, чтобы напряженность внешнего электрического поля, создаваемого электродами установки, оставалась неизменной в течение всего времени эксперимента. Избежать нежелательных пробоев может размещение диэлектрическизх материалов между электродами, Довольно критична их толщина, т. к. расстояние между электродами составляет порядка 1–3 см. Наиболее доступной и подходящей по толщине является полиэтиленовая пленка. По ее деформации и ожогу в ходе эксперимента можно судить о максимальном поперечном размере пароплазменного облака на поверхности электрода. Однако при нагреве происходит деформация и прожог пленки, т. е. пленка не защищает электроды от пробоя, а лишь задерживает его. Лучшие результаты надежности имеют изоляторы пластин электродов из тонкого (0,3–1 мм) закаленного стекла. При этом они выдерживают не один эксперимент и более устойчивы к кратковременному электрическому и тепловому воздействию факела лазерного излучения и образующего после него пароплазмообразного облака.

Список литературы

1. 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.

2. Влияние давления фонового газа на качество лазерной обработки металлов / С. В. Васильев [и др.] // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 89–100.

The article describes experiments made with the help of device for creating an external electric field from 0 to 10^6 V/m of different polarity during the action of laser radiation on the surface of metals. The design features of the installation and the principle of its use in the experiment are described.

Губаревич Игорь Константинович, аспирант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, i.gubarevich@grsu.by.

Научный руководитель – *Васильев Сергей Валерьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, s.vasilijev@grsu.by.

УДК 535.34

И. Г. ДАДЕНКОВ

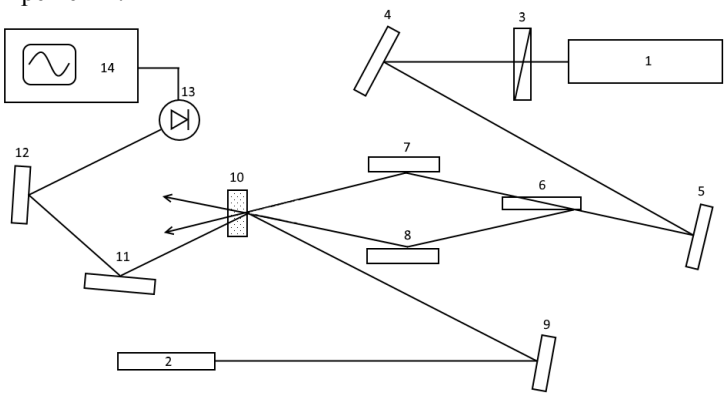
ЗАПИСЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ СИЛИКАТА ВИСМУТА

Проанализированы схемы импульсной записи динамических голограмм в фоторефрактивных кристаллах силиката и титаната висмута. Показано, что времена жизни таких динамических решеток существенно зависят от типа кристаллов, их допирования, интенсивности записывающего излучения, предыстории засветки и могут меняться от милисекунд до секунд.

Одним из существенных преимуществ кубических фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов ($Bi_{12}SiO_{20}$, $Bi_{12}TiO_{20}$, $Bi_{12}GeO_{20}$) является формирование в них динамических голограмм в реальном масштабе времени. Это определяет их использование в адаптивных интерферометрах, оптических датчиках ассоциативных устройств, цифровой микроскопии, для оптической записи, хранения и обработки информации, усиления оптических изображений и др. Физические процессы записи голограмм в указанных средах основаны на перераспределении зарядов в кристаллах под действием света по многочисленным дефектным центрам, имеющим разнообразную природу возникновения и характеристики. При этом фоторефрактивные кристаллы позволяют работать как с непрерывным, так и с импульсным (нано- и пикосекундным) лазерным излучением.

В настоящей работе приведен обзор результатов исследования процессов формирования и релаксации коротко- и долгоживущих голографических решеток в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов со сложной структурой дефектных центров в условиях импульсного возбуждения.

Запись динамических решеток осуществлялась импульсами второй гармоники излучения лазера на иттрий-алюминиевом гранате (длина волны 532 нм) с длительностью импульса 20 нс. Система зеркал с диэлектрическим напылением формировала близкие по интенсивности сигнальные и опорные волны, которые записывали решетку в кристалле силиката висмута. Считывание дифракционной решетки проводилось непрерывным излучением гелий-неонового лазера (длина волны 632,8 нм), которое направлялось на кристалл под углом Брегга. Система регистрации на основе кремниевого p-i-n-фотодиода и цифрового осциллографа позволяла отслеживать изменения интенсивности дифрагированного пучка и, следовательно, процессы релаксации динамической решетки.



1 – неодимовый лазер; 2 – гелий-неоновый лазер; 3 – полуволновая пластинка, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12 – зеркала; 6 – полупропускающее зеркало; 10 – кристалл силиката висмута; 13 – скоростное фотоприёмное устройство; 14 – электронный осциллограф

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Типичная осциллограмма дифрагированного излучения гелий-неонового лазера при записи голографических решеток в кристаллах силиката висмута приведена на рисунках 2 и 3. Видно, что дифрагированный пучок имеет максимальную интенсивность практически сразу после прекращения записи голограммы, затем интенсивность пучка спадает до нуля в течение десятка секунд или нескольких сотен микросекунд в зависимости от интенсивности записывающих голограмму волн.

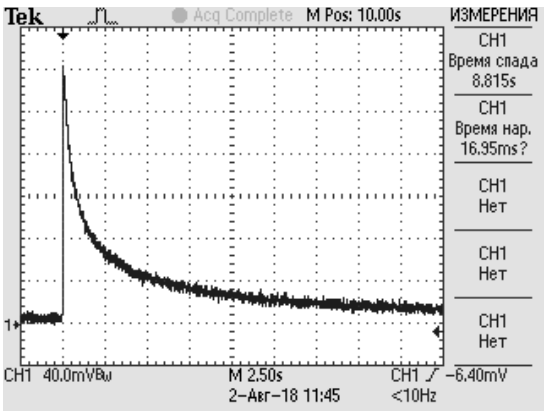


Рисунок 2 – Характерная осциллограмма релаксации дифракционной решётки при интенсивности 2 МВт/см^2

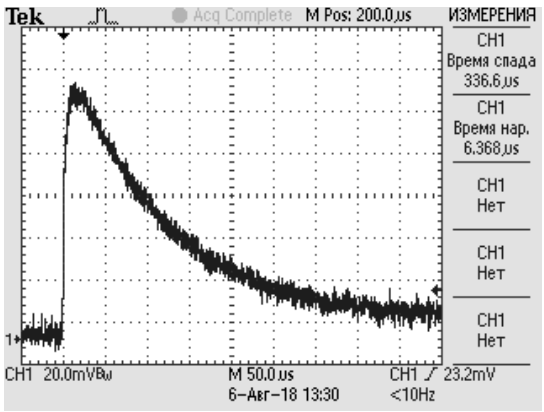


Рисунок 3 – Характерная осциллограмма релаксации дифракционной решётки при интенсивности 30 МВт/см^2

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили определить основные закономерности импульсной записи динамических голограмм в фоторефрактивных кристаллах силиката висмута. Выделены два механизма записи динамических решеток. Заселение короткоживущих ловушечных уровней характеризуется временем релаксации дифракционной решетки на уровне сотни микросекунд при интенсивностях более 10 МВт/см^2. Заселение долгоживущих ловушечных уровней проявляется при сравнительно небольших, на уровне нескольких мегаватт на квадратный сантиметр, интенсивностях и характеризуется временами релаксации дифракционной решетки порядка нескольких секунд.

Список литературы

1. Hermann, J. P. Nanosecond four-wave mixing and holography in BSO crystals / J. P. Hermann, J. P. Herriau, J. P. Huignard // Applied Optics. – 1981. – Vol. 20. – P. 2173–2174.
2. Jones, D. C. Competition between subharmonic and signal beams for photorefractive gain in BSO with two pump beams / D. C. Jones, S. F. Lyuksyutov, L. Solymar // Applied Physics B. – 1991. – Vol. 52. – P. 173–175.
3. Murillo, J. G. Photorefractive grating dynamics in $Bi_{12}SiO_{20}$ using optical pulses / J. G. Murillo // Optics Communications. – 1999. – Vol. 159. – P. 293–300.
4. Петров, М. П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М. П. Петров, С. И. Степанов, А. В. Хоменко. – СПб. : Наука. С.-Петербург. отд-ние, 1992. – 320 с.
5. Шепелевич, В. В. Голография в фоторефрактивных оптически активных кристаллах : моногр. / В. В. Шепелевич. – Мозырь : МГПУ им. И. П. Шамякина, 2012. – 287 с.
6. Ханон, Х. К. Спектральные особенности фотохромного эффекта в кристаллах титаната висмута при импульсном возбуждении / Х. К. Ханон, А. В. Станкевич, А. Л. Толстик // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2012. – № 3. – С. 3–6.
7. Ханон, Х. К. Динамика фотоиндуцированного поглощения в кристаллах титаната висмута / Х. К. Ханон, А. Л. Толстик // Вестник. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2012. – № 2. – С. 3–7.
8. Динамические голограммы Денисюка в кубических фоторефрактивных кристаллах / С. М. Шандаров [и др.] // Квантовая электроника. – 2008. – № 11. – С. 1059–1069.

The schemes of pulse recording of dynamic holograms in photorefractive bismuth silicate and bismuth titanate crystals are analyzed. The lifetimes of such dynamic gratings essentially depend on the type of crystals, their doping, the intensity of the recording radiation, the backlight history and can vary from milliseconds to seconds.

Даденков Иван Геннадьевич, студент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, fiz.dadenkov@bsu.by.

Научный руководитель – *Толстик Алексей Леонидович*, доктор физико-математических наук, профессор, физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, Tolstik@bsu.by.

УДК 372.853

С. В. ДУБЕШКО

ПРОБЛЕМЫ ПРИ РЕШЕНИИ ГРАФИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ В СРЕДНЕЙ ШКОЛЕ

Проведен анализ количества выполненных заданий по молекулярной физике. Выявлены затруднения при решении графических задач педагогического тестирования по молекулярной физике. Предложен метод решения таких затруднений.

В педагогических тестах по физике в заданиях часто встречаются различного рода рисунки, графики и схемы – назовем их изображениями. Было подсчитано количество таких заданий за последние 11 лет с (2007 по 2017 год). Проанализированы тесты, структура которых одинакова, а именно – в педагогическом тесте содержится 30 заданий: 18 заданий в части А, с предлагаемыми вариантами ответов, и 12 заданий в части В с открытым ответом. Всего за 11 лет приводится 157 рисунков, что составляет в среднем 14,27 в год, т. е. 47,6 % от всех заданий за 11 лет (330). Из них в части А – 107 заданий с изображениями, приблизительно 9,72 в год, т. е. 32,4 %, и в части В – 50 заданий, соответственно – 4,55 в год, т. е. 15,2 %.

Количество заданий с изображениями изменяется от года к году, однако их количество традиционно близко к 47 %. Это достаточно большое количество графического материала. Такого количества заданий с рисунками, графиками, схемами, нет в педагогических тестах ни по одному предмету.

За исследуемые годы задания с изображениями встречались 71 раз, что составляет 47,33 % от всех заданий. Задания по молекулярной физике с изображениями встречались 11 раз, что составляет 7,33 % от всех заданий и 36,67 % от всех заданий с изображениями.

Задания по молекулярной физике выполняются не очень успешно, процент выполненности тестовых заданий не превышает 50 %. Из 30 предложенных за 5 лет заданий по молекулярной физике 12 заданий (40 %) попали в диапазон 0–0,99, то есть с этими заданиями справились менее 10 % испытуемых. Средний процент выполненности заданий по молекулярной физике – 22,48. И ещё менее успешно выполняются задания по молекулярной физике, содержащие изображения, в молекулярной физике это графики. Процент выполненности этих заданий не превышает 40 %, из 11 предложенных заданий в диапазон 0–9,99 попали

4 задания (36,4 %). И средний процент выполненности заданий по молекулярной физике, содержащих графики оказался ничтожным – 8,92.

Это означает, что задания по физике вызывают затруднения у испытуемых.

Для наглядности составим процентную диаграмму выполненности заданий.

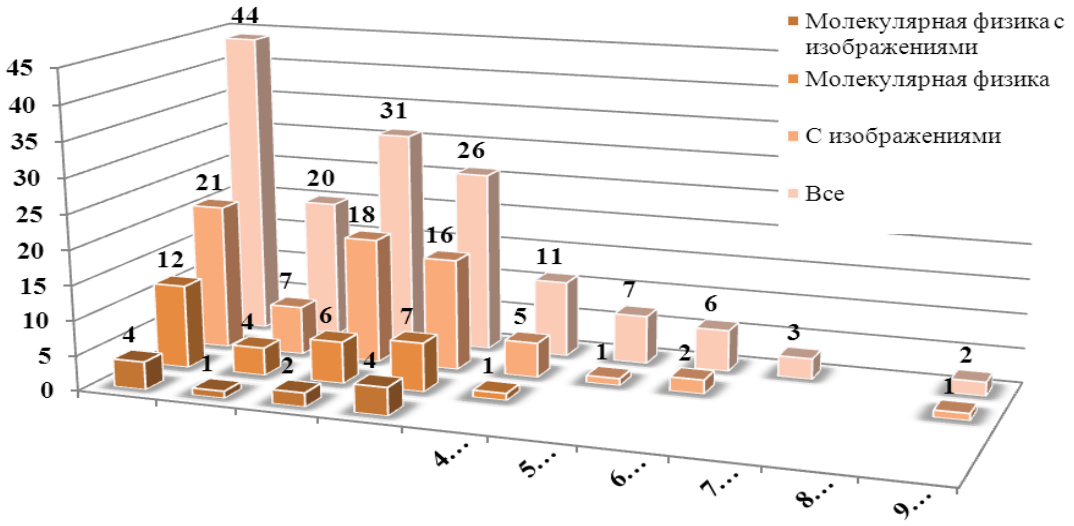


Диаграмма – Распределение количества выполненных заданий ЦТ

Проанализировав эту диаграмму, можно сделать вывод, что при подготовке к ЦТ следует уделять больше внимания этому разделу физики. При решении задач молекулярной физики следует большое внимание уделять графикам зависимости параметров вещества друг от друга. Анализ графиков таких зависимостей улучшает наглядность, помогает лучше понимать суть процессов и может значительно улучшить результаты испытуемых. Для этого, например, можно разработать специальные тренажеры, которые будут помогать ученикам понимать и уметь решать графические задачи.

Список литературы

1. Учебные программы для учреждений общего среднего образования с русским языком обучения. Физика. VI–XI классы. Астрономия. XI класс [Электронный ресурс] / Национальный институт образования. – 2012. – 64 с. – Режим доступа: https://drive.google.com/file/d/0B8J0nDz4iJ4GeXZJeXpzOFRSajg/view.

2. Калашников, Н. П. Физика. Графические методы решения задач : учеб. пособие для СПО / Н. П. Калашников, В. И. Кошкин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2016. – 250 с.

Дубешко Светлана Владимировна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, s.dybeshko@gmail.com.

Научный руководитель – *Сенько Анна Николаевна*, старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

УДК 538.9

А. Д. КОВАЛЕНКО

ТЕСТИРОВАНИЕ КАК УГЛУБЛЕННЫЙ ИНСТРУМЕНТ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКИ

Рассмотрены результаты тестирования как формы контроля знаний учащихся. Показано положительное влияние использования тестового контроля знаний на уроках физики на результаты централизованного тестирования.

В последнее время наряду с традиционными способами оценки знаний учащихся все чаще используется тестовый контроль знаний. Учителя начинают осознавать преимущества письменной формы оценки знаний перед устной. Повышается объективность и надежность, уменьшается стресс у учащихся, снижается субъективизм учителя, связанный с симпатиями и антипатиями к учащимися, возможностью наказать ученика

плохой оценкой за неподобающее поведение или другие проступки. Такой метод помогает систематизировать работу ученика в течении года, а с помощью суммирования результатов пройденных тестов, можно вывести индивидуальный рейтинг успехов в обучении. Этот метод влияет с лучшей стороны на мотивацию ученика и сводит случайность в оценивании до минимума [1].

Впервые ребенок сталкивается с простейшими тестами в детском саду, наиболее актуальным является тест на развитие речи, координацию в пространстве, логику. Такие тесты помогают определить развитие ребенка и дальше обучать его в нужном направлении. В школе тесты применяются так же при проверке знаний и умений учащегося. Далее идет самый строгий и важный этап – тесты, которые сдаются при поступлении в высшее учебное заведение. Централизованное тестирование является формой вступительных испытаний и используется как конкурс для поступления в высшие учебные заведения и колледжи. Тестирование имеют право сдавать только выпускники школ, лицеев, гимназий, учащиеся последних курсов колледжей и лицеев. Республиканский институт контроля знаний (РИКЗ) занимается составлением и содержанием тестов, которое определяется программами общего и среднего образования. Пункты проведения и даты согласовываются и становятся известны только весной, в то время как тестирование начинается в середине июня.

В школах и других учреждениях образования используются различные методы контроля знаний, такие как контрольные работы, самостоятельные работы, проверочные и лабораторные. Опытные учителя постоянно используют тестовый контроль и тем самым адаптируют учащихся к централизованному тестированию. Для большего успеха учитель должен использовать тесты с собственными наработками, используя свой практический опыт, адаптируя тесты под конкретный класс, школу. Использование общедоступных тестов и методик возможно после соответствующей переработки. Самое существенное отличие тестов от обычных, более знакомых нам методов аттестации, таких как контрольные и самостоятельные работы, состоит в том, что использование при тестировании методов и единых способов оценивания приводит к снижению экзаменационных переживаний. Тесты использует в большинстве стран мира для прохождения собеседования при устройстве на работу, поступлении в высшие учебные заведения, но они не являются универсальным средством, однако их применение упростило способ оценки знаний учащихся [2].

При поступлении в высшие учебные заведения используется такой метод, как централизованное тестирование. Также тестовый контроль применяют при получении прав и сдачи экзамена по правилам дорожного движения. В один день по всей стране и по одному предмету проводится централизованное тестирование. Тестирование проводится по одиннадцати учебным предметам, таким как физика, математика, русский язык, белорусский язык, испанский язык, китайский язык, французский язык, немецкий язык, история Беларуси, всемирная история, география, биология, химия, обществоведенье и география. Тестирование по каждому предмету имеет свое время на выполнение и различное количество заданий. Любое централизованное тестирование состоит из двух частей, таких как А и В, часть А представляет собой тест с 4 вариантами ответов, часть В – это задания без вариантов ответа. Тестовые задания включают в себя вопросы из основных разделов предмета. Тестовые задания являются разного уровня сложности.

Важным моментов является то, что все пишут этот тест одновременно и заранее заданий не будет у учащихся и поступающих. Абитуриенты, которые опоздали на тестирование, после вскрытия конверта с заданиями не допускаются до прохождения. С 2018 года внедряется новая методика подсчетов балла, которая заключается в том, что методика прошлых лет занижала баллы. Ранее количество баллов оценивалось в 100, а количество баллов за определенное задание зависело от того, сколько человек не решило это задание. В итоге стоимость задания, которое решили все абитуриенты, приближалась к нулю, то есть баллов за него практически не было. Можно сделать ввод, что такая система имела большую погрешность измерений, хотя и отбирала абитуриентов с хорошей подготовкой [3].

Сейчас по новой методике программа будет обращать внимание на все правильно выполненные задания. Такая система позволит более точно определять уровень знаний и более корректно ранжировать абитуриентов во всем диапазоне сто бальной шкалы. Такая система позволит сделать аналитику и сравнить более изучаемые и понятные учащимся разделы, либо такие, на изучение которых следует добавить больше часов, чем сейчас предусмотрено программой. Огромным плюсом для абитуриентов будет то, что теперь начнут засчитывать частично правильные ответы. После этого результаты тестирования можно узнать через 2 недели на сайте РИКЗ.

С точки зрения психологии, тестовая задача – это проблема, которая заключается в несоответствии между требованиями задачи и знаниями ученика, и для её решения он должен включить творческую мыслительную деятельность. Тестовая задача – это проблема, решаемая с помощью логических умозаключений, математических действий и экспериментов на основе законов и методов физики. Каждая задача содержит информационную часть, условие и требования или вопросы. Информационная часть может быть расширенной, поэтому само содержание задачи позволяет знакомить с историей, с достижениями техники, сообщать сведения из других наук. Решение задач относится к практическим методам обучения.

При решении задач в форме открытого теста, т. е. задания, в котором необходимо выбрать правильный вариант из предложенных, учащемуся могут помочь ответы, данные в виде конечной формулы. В этом случае можно воспользоваться методом исключения, основанным на физической модели явления, описанного в задаче. Не всегда учащийся может выбрать однозначный ответ, но даже уменьшение количества вариантов повышает вероятность правильного выбора. Для того чтобы ученик смог выбрать ответ, анализируя формулы, следует приучать его при проверке решения задачи анализировать конечную формулу. Решение физических задач невозможно без владения математическими методами решения. При обобщающем повторении обычно группируются задачи по разделам физики: механика, термодинамика, электростатика, оптика и т. д., реже – по физическим методам решения: координатный, динамический, энергетический и др. Объединение задач в группы по математическим методам решения бывает довольно эффективным. В частности, если решение задачи сводится к решению квадратного уравнения, то очень важен анализ корней уравнения. Бывает простая ситуация, когда один из них меньше нуля, а данная величина не может быть отрицательной. Но если оба корня больше нуля, тогда выбор ответа требует серьезного осмысления [4].

Для наиболее хорошей подготовки к тестированию нужно использовать тесты разных видов. Применяются тесты учебных достижений. Они состоят из заданий по выявлению того, владеют ли учащиеся требованиями учебных программ. В них представлены задачи и задания различных уровней сложности: от простых до более сложных. Среди заданий могут быть задания: с выбором ответа; бинарные (*да* или *нет*); на заполнение пропусков; со свободно конструируемым ответом (такие тесты для учащихся оказываются наиболее трудными) и др. Время работы с тестом ограничено, но достаточно для выполнения всех или большей части заданий. Использование тестового контроля знаний на уроках физики на результаты централизованного тестирования.

Для домашнего закрепления можно предложить домашнее тестирование. Учащиеся, которые, по их мнению, оказались неуспешны на уроке и в процессе промежуточного контроля, могут дома дополнительно поработать над материалом урока, получить консультации у учителя или одноклассников, потренироваться в решении задач и затем проверить себя с помощью теста, аналогичного тесту выходного (с урока) или промежуточного контроля. В этом случае, по просьбе учащегося, учитель выдает на дом другой вариант предлагающегося на занятии теста. Особое внимание необходимо уделить различным способам решения системы уравнений, он не во всех случаях эффективен и, как правило, занимает наибольшее время.

Проводя аналогию с прыжками в высоту, то традиционная контрольная работа представит собой не линейку, а палочку, на которой нанесены три уровня – 5, 4 и 3. В случае выполнения учеником всех заданий он получает отличную отметку. При этом совершенно не ясно, перепрыгнул он палочку с запасом в несколько раз или пролетел прямо над ней. То же можно сказать и про нижнюю границу значения. При сравнении тестирования и традиционного оценивания можно увидеть, что первое предоставляет возможность расширить шкалу оценивания как вверх, так и вниз. Означает ли факт, что если ученик не выполнил ни одного задания по физике, то он ничего не знает? Скорее всего, нет. Давая широкие возможности для проявления достижений, тест по физике представляет собой измерительный инструмент примерно трехметровой высоты, риски на котором расположены практически от земли. В этом отношении тестирование входит в противоречие с учительским стереотипом: отличную оценку нужно выставлять только в том случае, если все задания по физике выполнены правильно. Анализируя преимущество тестов перед другими способами оценивания знаний, можзно сделать вывод, что отличие тестов по физике от традиционных методов аттестации состоит в том, что использование процедуры тестирования и единых критериев оценки приводит к снижению экзаменационных стрессов. Положительность тестирования состоит в том, что всем предоставляются равные возможности, а широта теста дает возможность ученику показать свои достижения на широком поле материала по физике. Таким образом, ученик получает некоторое право на ошибку, которого он лишен при традиционном способе оценивания.

Любая организация познавательной и образовательной деятельности должна быть ориентирована, прежде всего, на развитие личности, самостоятельности мышления, творческих способностей учеников, повышение их активности в стремлении получения знаний. Ничего из этого нельзя добиться, если обучать детей с помощью репродуктивных учебных методов, то есть по какому-то определённому шаблону, а значит, в современном образовательном процессе не обойтись без развития у учащихся эвристических (творческих) компетентностей.

Список литературы

1. Мкртчян, М. А. Концепция коллективных учебных занятий / М. А. Мкртчян // Школьные технологии. – 2011. – № 2. – С. 65–72.

2. Карпук, А. Л. Проблемное обучение физике в процессе решения задач / А. Л. Карпук // Фізіка: праблемы выкладання. – 2002. – № 1. – С. 21–29.

3. Хижнякова, Л. С. Планирование учебного процесса по физике в средней школе / Л. С. Хижнякова, Н. А. Родина, Х. Д. Рошовская. – М., 1982. – 287 с.

4. Матецкий, Н. В. Технология решения задач по физике (механика) и астрономии : учеб.-метод. пособие / Н. В. Матецкий, К. Ф. Зноско. – Гродно : ГрГУ, 2007. – 359 с.

The results of the development of testing as a form of monitoring students' knowledge are considered. The positive effect of the use of test control knowledge in physics lessons on the results of centralized testing is shown.

Коваленко Анастасия Дмитриевна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь,

Научный руководитель – *Зноско Казимир Францевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, znosko@grsu.by.

УДК 538.9

А. Д. КОВАЛЕНКО

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ЗНАНИЙ И ПСИХОЛОГИЧЕСКАЯ ГОТОВНОСТЬ КАК ЗАЛОГ УПЕХА НА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОМ ТЕСТИРОВАНИИ

Рассмотрены роль мотивации, систематизации знаний и психологической готовности в технологии организации процесса подготовки учащихся к централизованному тестированию по физике. Показано, что обучение физике с созданием проблемных ситуаций, логических противоречий и использованием элементов исследовательской деятельности при подготовке к централизованному тестированию – залог успешного его прохождения.

Основной целью работы учителя при формировании компетенции учащихся, является развитие их творческих способностей. Способности человека можно развить только в процессе деятельности. Чтобы развить у детей познавательный интерес к физике, нужно уметь применять такие методы, которые обеспечат высокую заинтересованность учеников в процессе получения новых знаний и высоких баллов на централизованном тестировании. Методы и приёмы, применяемые на уроке учителем, должны соответствовать уровню развития детей, учитывать их возрастные особенности, потому как чрезмерные нагрузки могут вызвать утомление, а значит и утрату желания развиваться и обучаться. Поэтому в своей работе учителю необходимо помнить, что для успешного обучения учащихся, нельзя дать им заскучать. Ученики должны хотеть учиться, желать узнать что-то новое. Если ученик сам не пожелает обучаться и развиваться, то научить его чему-либо станет крайне сложной задачей. Таким образом, без мотивации к учёбе, развитие познавательной активности у учащихся невозможно [1].

Учебная мотивация может появиться благодаря проблемной ситуации. Проблемное обучение предусматривает представление какой-либо учебной ситуации как проблемы. Эта проблема может быть сформирована в виде очевидного логического противоречия, рассмотрения явления с разных сторон и т. д. Проблема может быть поставлена учителем или возникнуть спонтанно в ходе изучения материала [2]. Ещё одним способом развития мотивации к учёбе может стать исследовательская деятельность. *Исследовательская деятельность ученика* – это деятельность, которая предполагает наличие некоторых шагов при решении задачи, характерных для научного исследования: постановку проблемы и определение цели исследования, изучение тематической литературы по данному вопросу, обзор способов исследования и выбор наиболее подходящего, практическое применение выбранного метода, анализ и обобщение полученных результатов, собственные выводы. Данная структура характерна для любой исследовательской деятельности [3].

В 11-м классе школьники сосредотачиваются на своём будущем, а именно на профессиональном самоопределении. Выпускники современных школ заинтересованы в получении практико-ориентированных знаний, которые нужны им для успешной интеграции в общество и адаптации в нём. Учителю для повышения мотивации следует сделать акцент на важности физики как науки, которая пригодится им и в дальнейшем. Необходимо показать ученикам всю пользу изучения этого предмета. Ведь решение физических задач развивает и совершенствует мыслительную деятельность, помогает находить решение самых различных проблем, возникающих в современном технологичном, постоянно развивающемся мире. Кроме того, знание физики просто необходимо для тех учеников, которые выберут своей профессией какую-либо техническую специальность [4].

Тестовые технологии по физике все заметнее проникают в образовательную практику. Они повышают у школьников мотивацию обучения, достижения более высоких результатов и создают равные условия для испытуемых по сложности, объему, времени выполнения заданий. Тест по физике выступает как средство

диагностики. При постановке определенных целей тестовые задания по физике позволяют определить преобладающие ошибки, дифференцировать их с последующим определением причин, вызвавших эти ошибки. Каждый год ЦТ по физике сдает большое количество абитуриентов. Для того чтобы набрать наибольшее количество баллов по физике, нужно иметь прочную базу, основанную на математике. Большинство задач по физике имеет сложное решение, которое без знаний математики осуществить не удастся.

В выпускном классе у учащихся уже довольно развито теоретическое мышление. В рассуждениях начинает присутствовать всё большая самостоятельность. Благодаря совершенствованию практического мышления, ученики могут находить несколько решений данной им задачи, проявлять динамичность и гибкость интеллекта. Для этого возраста учителю стоит предоставлять информацию таким образом, чтобы она могла дать пищу для размышлений, выработать собственный взгляд на вещи. В этом возрасте формируются индивидуальные особенности мышления и работы [5].

Наиболее важной частью при подготовке является наличии систематизации. Тест состоит из заданий части А и заданий части В. Задачи в тесте систематизированы по темам учебной программы с 7 по 11 класс. Перед началом подготовки к централизованному тестированию нужно составить подробный план, в котором будет систематизация тем и разделов физики. Существует на сайте РИКЗ такой документ, как «спецификация теста», в котором прописаны те учебные пособия, из которых составители будут брать задания для составления ЦТ. Наиболее эффективным методом подготовки к централизованному тестированию является подготовка и приспособление к тестам с самого начала обучения. То есть, начиная изучать физику в 7 классе, стоит делать проверку домашнего задания, промежуточных знаний и контрольных работ в виде тестов. Приучаясь постепенно к тестам, учащемуся будет легче и комфортней чувствовать себя на централизованном тестировании, т. к. этот метод проверки не будет для него каким-то нововведением. Различия в выполнении тестового и традиционного экзаменационного задания можно выявить, анализируя характер типичных ошибок и то, как они влияют на отметку за экзамен.

В «Нормах оценки результатов учебной деятельности учащихся по физике» приводятся характеристики типичных ошибок при выполнении заданий по физике. Ошибки подразделяются на существенные, при допущении которых задание считается невыполненным, и несущественные, при этом отметка за выполнение задания снижается всего на один балл. Очевидно, что при тестовом контроле практически все несущественные ошибки переходят в разряд существенных. Приведем анализ причин трансформации несущественных ошибок в существенные при тестировании. Подготовка к тестированию требует специальных форм и методов работы. Следует начинать работу с анализа собственного опыта. Если взять любой из прошлогодних тестов, письменные принадлежности, калькулятор, поставить перед собой часы и выполнить 10 заданий теста (8–9 раздела А и 1–2 раздела В), то после окончания работы время, которое мы затратили на решение заданий, умножьте на 4. Тем самым мы получили время решения нами всего теста. Теперь давайте вспомним, что учащийся на выполнение задания затрачивает в среднем в 3 раза больше времени, чем учитель. Как показывает опыт проведения таких расчетов, учителя в среднем тратят на 40 заданий около 50–70 минут, следовательно, ученику понадобиться только на выполнение теста не менее трех часов, к этому необходимо прибавить время, нужное для внесения в протокол правильных ответов. Получается, что выполнение задания столь строго лимитировано по времени, что «поиск секунд» становится главной проблемой.

Возможны два пути решения данной проблемы. Первый – обосновывать и предлагать организаторам централизованного тестирования увеличить время тестирования или уменьшить число заданий. Второй – учить ребят максимально быстро действовать в заданных временных рамках. Вероятно, здесь необходимо поговорить о том, к каким жизненным ситуациям готовим мы наших учеников. В течение всей последующей жизни нынешним выпускникам будет необходимо принимать решения и действовать в различных условиях. Часто будет возможность и/или необходимость тщательно подготовиться, выявить проблему, четко и грамотно обосновать ее решение, оформить в соответствии с нормативными документами. Эти, несомненно, важные знания, умения и навыки проверяет экзамен в традиционной форме. Но иногда жизненные профессиональные и другие ситуации требуют совсем иного – быстро проанализировать проблему, оперативно подобрать нужный алгоритм для ее решения или оперативно создать свой, дать однозначный ответ – такие навыки проверяет тест.

Анализ результатов тестирования, проведенного Институтом контроля знаний, показывает, что относительно невысокие результаты обусловлены не только слабой подготовкой по предмету, но и отсутствием соответствующей установки, психологической готовности к данному виду деятельности, навыков в использовании межпредметных связей. Стресс также может повлиять на успех тестирования, так как при волнении многие знания забываются, и благодаря особенности мозговой деятельности блокируются знания, которые были получены специально для тестирования. Поэтому тесты не должны вызывать стресс и нужно идти на них с уверенностью в собственных знаниях.

Вернемся к тестам, которые мы решали, и проанализируем, где были потеряны секунды. При традиционном оформлении используют слова «Дано», «Решение», «Вычисления», «Ответ». Попробуйте написать этот список 40 раз подряд! За это время можно выполнить от 2 до 6 заданий. Поэтому необходимо, чтобы учащиеся поняли, что в решении теста действуют другие принципы оформления:

- Номер задания и ответ выделены особо, так, чтобы можно было быстро внести результаты в протокол.
- Решение записано так, что, вернувшись к нему, можно проверить или при необходимости исправить.
- Записываем только то, что необходимо (принцип минимизации).

При записи условия задач, в которых много табличных величин и физических постоянных (удельная теплоемкость, удельное сопротивление, элементарный заряд, масса электрона и т. п.), нет необходимости вносить их значения в данные задачи, так как тесты составлены так, что эти данные легко выписать из текста. Можно найти и другие способы записи данных, которые существенно сокращают время оформления. Для обработки навыка делать записи экономично важно каждый раз обращать внимание ученика на то, как он записал условие, с учетом принципов необходимости и достаточности.

Следующий момент, на который хотелось бы обратить внимание, – это «узнавание» типа задачи. Подавляющее большинство экзаменационных задач решается по алгоритму. Чтобы быстро выбрать оптимальный для данного задания алгоритм решения, нужно уметь классифицировать задачу.

В целом для организации мыслительной деятельности учащихся при решении тестовых задач, необходимо применять такие методы как: идеализация свойств объекта; разбиение сложной задачи на несколько более простых, стандартных задач, решение которых приведёт к решению сложной (метод индукции); анализ условия и поиск наиболее простого решения; приведение всевозможных аналогий и сравнений. Весьма эффективным методом является создание проблемной ситуации, в частности, использование в задаче какого-либо логического противоречия, то есть создание конфликта между несколькими, на первый взгляд, одинаково возможными ситуациями.

Можно сделать вывод, что главной целью в подготовке к тестированию является знание предмета и систематизация знаний. Соблюдая вышеперечисленные правила и методики, можно добиться наибольшего успеха в подготовке к тестированию и получении наивысшего балла. Немаловажно морально настроиться, обрести уверенность в себе и не нервничать, опираться на фундаментальную и крепкую подготовку.

Список литературы

1. Иванова, Е. О. Теория обучения в информационном обществе / Е. О. Иванова, И. М. Осмоловская. – М. : Просвещение, 2011. – 252 с.
2. Карпук, А. Л. Проблемное обучение физике в процессе решения задач / А. Л. Карпук // Фізіка: праблемы выкладання. – 2002. – № 1. – С. 21–29.
3. Матецкий, Н. В. Технология решения задач по физике (механика) и астрономии : учеб.-метод. пособие / Н. В. Матецкий, К. Ф. Зноско. – Гродно : ГрГУ, 2007. – 359 с.
4. Усова, А. В. Практикум по решению физических задач : пособие для студентов физ.-мат. фак. / А. В. Усова, Н. Н. Тулькибаева. – М. : Просвещение, 2001. – 208 с.
5. Варданян, Н. А. Развитие дистанционного обучения в общеобразовательной школе / Н. А. Варданян // Интернет и образование. – 2012. – № 42. – С. 25–34.

The role of motivation, systematization of knowledge and psychological readiness in the technology of organizing the process of preparing students for centralized testing in physics is considered. It is shown that teaching physics with the creation of problematic situations, logical contradictions and the use of elements of research activities in preparation for centralized testing is the key to successful completion.

Коваленко Анастасия Дмитриевна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь,

Научный руководитель – *Зноско Казимир Францевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, znosko@grsu.by.

УДК 533.6.01

Т. М. МИКУЛЕВИЧ, В. А. АНУФРИЕВА

РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ ПРЕПЯТСТВИЙ ВОЗДУШНЫМИ ПОТОКАМИ

В работе на примере вихревой дорожки Кармана исследуется резонанс, обусловленный отрывом вихрей на границах плохообтекаемых тел. Экспериментально и теоретически исследуется обтекание двумерной пластины, определены резонансы в зависимости от параметров обтекания.

Резонанс – явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний, которое наступает при приближении частоты внешнего воздействия к некоторым значениям, определяемым свойствами системы. Поскольку резонансные явления приводят к различным неблагоприятным последствиям, их изучение является актуальным.

В работе поставлена цель обнаружить эффект резонанса на примере поперечного обтекания потоком плоского препятствия и исследовать параметры возникновения этого эффекта. Задача состояла в определении частоты периодических колебаний в потоке, так как если динамическое воздействие является периодическим и частота колебаний в потоке близка к частоте собственных колебаний препятствия, то возможно появление резонанса. При этом возникает явление турбулентности, связанное с образованием вихрей.

Образование вихрей (и их движение в том числе) является периодическим. При обтекании тел потоком за ними образовываются вихри, которые, срываясь с кромки препятствия, приводят к турбулентным пульсациям. Экспериментально установлено [2; 3], что при обтекании препятствия за ним образуются вихри. В общем случае образование вихрей хаотично и их отрыв от препятствия происходит с разной частотой. Однако при определенных условиях имеет место установившийся режим течения, который называется вихревой дорожкой Кармана. В этом случае отрыв вихрей можно охарактеризовать одной частотой. Определим эту частоту.

Согласно экспериментальным данным [2; 3; 4] режим обтекания характеризуется безразмерными параметрами течения: числом Рейнольдса и числом Струхаля. В работе [3] предложена модель формирования вихрей за препятствием в случае обрыва потока:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{Re}\frac{w}{L}$$

Имеются многочисленные данные по возникновению дорожки Кармана при поперечном обтекании препятствий цилиндрической формы. Обтекание и параметры течения для препятствий другой формы немногочисленны.

Данные разных авторов подтверждают, что имеется несколько режимов отрыва вихрей. Первая зона – при числах Рейнольдса до 10^3, вторая зона – от 10^3 до 10^5, третья – при числах Рейнольдса больше 10^5. Вторая зона характеризуется относительным постоянством числа Струхаля. В целом описанные процессы достаточно сложны, могут возникать резонансы, автомодельные колебания и поэтому их теоретическое исследование не дает надежные результаты.

Для выполнения поставленных задач и целей нами был поставлен и выполнен эксперимент. На рисунке 1 представлена собранная нами лабораторная установка. Препятствие – стальная линейка, закреплялась консольно на стойке штатива. На конце линейки был укреплён постоянный магнит. Рядом с магнитом располагался датчик – катушка, состоящая из 60 витков. При движении магнита относительно катушки в ней индуцировалась ЭДС, которая фиксировалась нами с помощью блока обработки данных (рисунок 2). Блок обработки данных состоял из аналогово-цифрового преобразователя, на который подавался сигнал от датчика и персонального компьютера, на котором отображался этот сигнал.

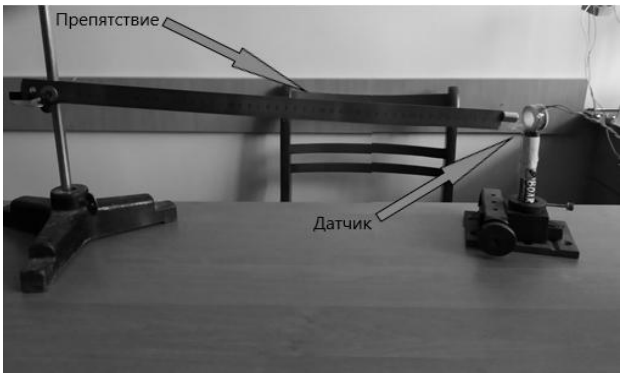


Рисунок 1 – Лабораторная установка 1

Рисунок 2 – Регистрационный блок обработки данных

На первом этапе нами определялась частота свободных колебаний препятствия: механически возбуждались колебания, которые фиксировались измерительной системой.

Далее с помощью фена (пылесоса) поток воздуха направлялся на препятствие. При этом выбирались различные направления обдува, и выходной патрубок располагался на различных расстояниях от тела. Это обеспечивало широкий диапазон скоростей потока в области обдуваемого объекта. Когда патрубок был неподвижен, эффекта увеличения колебаний резонанса не наблюдалось. Препятствие под действием динамического напора просто отклонялось на некоторый угол.

Данные выполненного нами эксперимента показали, что в рамках выбранной геометрии препятствия и скоростей в потоке не возникает колебаний с частотами, близкими к собственной частоте колебаний препятствия. Если патрубок перемещать в форме колебательных движений, либо в горизонтальном / вертикальном направлении, то можно добиться резкого увеличения амплитуды колебаний.

Во втором эксперименте использовалась конструкция, обеспечивающая устойчивую плоскость колебаний в направлении потока. Было сделано предположение, что возбуждение колебаний обусловлено колебаниями вихрей, возникающих за препятствием, то есть причиной возникновения колебаний являлась дорожка Кармана. Нами были рассчитан возможный диапазон чисел Рейнольдса для проведения эксперимента, а также возможный диапазон скоростей. Выполненные расчеты подтвердили, что в данном эксперименте резонанс действительно был обусловлен дорожкой фон Кармана.

В заключение отметим, что возможны различные варианты возникновения резонанса в конструкциях под воздействием потока. Наиболее ярко выраженный резонанс получается при периодическом динамическом воздействии потока на препятствие, при этом не обязательно непосредственное воздействие потока на тело. Резонанс также можно получить вследствие возникновения дорожки Кармана. В этом случае он является менее ярко выраженным из-за достаточно узкого диапазона геометрических параметров и параметров потока. Установлено слабое влияние температуры потока (20 °C – 100 °C) на рассмотренные резонансные явления. Поскольку строительные сооружения, в частности мосты, имеют большое число различных по форме элементов (балки, тросы), то при расчёте резонансов необходимо учитывать колебания в потоке различного типа (динамическое, вихревое).

Список литературы

1. Вынужденные колебания. Явление резонанса. Резонансные кривые [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://lektsii.com/1-78489.html. – Дата доступа: 04.12.2018.

2. Касоев, С. Г. О гидродинамической природе шумов сердечно-сосудистой системы / С. Г. Касоев // Труды Института общей физики имени А. М. Прохорова. – М, 2002. – Т. 68.

3. Саленко, С. Д. Исследование структуры течения в окрестности двух балок квадратного поперечного сечения в условиях интерференции / С. Д. Саленко // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17, № *2*.

4. Слёзкин, Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости / Н. А. Слёзкин. – М. : ГИТТЛ, 1955. – 520 с.

5. Мир климата : вестник ассоциации предприятий индустрии климата [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mir-klimata.info/. – Дата доступа: 08.12.2018.

6. Физические свойства воздуха [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.highexpert.ru/-content/gases/air.html. – Дата доступа: 03.01.2019.

In the work, using the example of the Karman vortex track, we study the resonance caused by the separation of the vortices at the boundaries of the poorly flowing bodies. Experimentally and theoretically investigated the flow around a two-dimensional plate, the resonances are determined depending on the flow parameters.

Микулевич Томаш Мечиславович, ГУО «Лицей № 1 г. Гродно», Гродно, Беларусь, tommikulevich@gmail.com.

Ануфриева Валерия Александровна, ГУО «Лицей № 1 г. Гродно», Гродно, Беларусь, lera.anufrieva28@gmail.com.

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь; nik@grsu.by.

УДК 37.016:53

Э. В. ПОЛУДЕНЬ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ В ШКОЛЬНОМ КУРСЕ ФИЗИКИ

Раскрыто понятие фундаментальной физической константы. Представлены основные свойства фундаментальных физических констант. Рассмотрена методика введения фундаментальных физических констант в школе.

Фундаментальные физические константы – постоянные, используемые при описании фундаментальных законов природы и свойств материи. Фундаментальные физические константы определяют точность, полноту и единство наших представлений об окружающем мире. В этой роли фундаментальные физические константы могут выступать как набор величин, возникающих в теоретических моделях наблюдаемых явлений и входящих в качестве универсальных коэффициентов в соответствующие математические выражения.

С точки зрения фундаментальных констант эволюция физической картины мира – это переход от физики без фундаментальных констант (классическая физика) к физике с фундаментальными константами

(современная физика). Классическая физика при этом сохраняет своё значение как предельный случай современной физики, когда характерные параметры исследуемых явлений далеки от фундаментальных постоянных.

В современной физике пока не существует общепринятого определения фундаментальных постоянных. Различные ученые предлагали разные определения в соответствии со своими научными интересами. Фактически в этих определениях проявлялись различные свойства фундаментальных постоянных и их нужно рассматривать как взаимодополнительные.

Можно выделить следующие основные свойства:

1. Универсальность. Константы сохраняют свое значение для Вселенной в целом.
2. Константы определяют характерные свойства элементарных частиц, как основных структурных элементов материи: заряд, массу, спин.
3. Константы фигурируют как коэффициенты пропорциональности в фундаментальных физических законах. Например, скорость света – в максвелловских уравнениях, постоянные c, h и k – в законе теплового излучения, гравитационная постоянная G – в законе всемирного тяготения, постоянная Планка h – в уравнении Шредингера.
4. Константы являются абсолютными масштабами, то есть мерами, имеющими абсолютную собственную точность. Например, скорость света c – абсолютная мера скорости, постоянная Планка h – мера момента импульса и действия, элементарный заряд e – мера электрического заряда.
5. Константы связаны с наиболее фундаментальными физическими теориями. Например, скорость света c – со специальной теорией относительности, h – с квантовой механикой, G – с теорией тяготения.
6. Константы связаны с взаимоотношением между физическими понятиями. Например, константы появляются как коэффициенты между различными физическими величинами, например, скорость света между массой и энергией покоя, постоянная Планка между энергией и частотой.
7. Константы характеризуют взаимоотношение между фундаментальными физическими теориями на основе принципа соответствия.

Фундаментальные физические константы, вводимые в школе, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Фундаментальные физические константы

Наименование константы	Обозначение	Значение	Класс	Когда вводятся константы
Элементарный электрический заряд	e	$1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл	8 класс	В ходе объяснения нового материала даётся значение элементарного электрического заряда
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^{8}$ м/с	8 класс	В ходе объяснения нового материала даётся значение скорости света в вакууме, описывается опыт Галилея, Рёмера
Гравитационная постоянная	G	$6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Нм^2/кг^2	9 класс	В ходе объяснения нового материала описывается опыт Генри Кавендиша
Постоянная Авогадро	N_A	$6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$	10 класс	В ходе объяснения нового материала даётся значение постоянной Авогадро
Постоянная Больцмана	k	$1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К	10 класс	В ходе объяснения нового материала даётся значение постоянной Больцмана
Универсальная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль · К)	10 класс	В ходе объяснения нового материала даётся значение универсальной газовой постоянной как произведение постоянной Больцмана и Авогадро
Электрическая постоянная вакуума	ε_0	$8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Кл^2/(Н · м^2)	10 класс	В ходе объяснения нового материала даётся значение электрической постоянной
Постоянная Планка	h	$6{,}6 \cdot 10^{-34}$ Дж · с	11 класс	В ходе объяснения нового материала даётся значение постоянной Планка
Магнитная постоянна	μ_0	$1{,}26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м	10 класс	В ходе объяснения нового материала даётся значение магнитной постоянной
Масса покоя электрона	m_e	$9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг	11 класс	В ходе объяснения нового материала даётся значение массы покоя электрона

Масса покоя протона	m_p	$1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг	11 класс	В ходе объяснения нового материала даётся значение массы покоя протона
Масса покоя нейтрона	m_n	$1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг	11 класс	В ходе объяснения нового материала даётся значение массы покоя нейтрона
Атомная единица массы	–	$1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг	11 класс	В ходе объяснения нового материала даётся значение атомной единицы массы
Постоянная Фарадея	F	96484,56 Кл/моль	10 класс	В ходе объяснения нового материала даётся значение постоянной Фарадея
Нормальный (молярный) объём идеального газа при нормальных условиях	V_0	$2{,}24 \cdot 10^{-2}$ м^3/моль	10 класс	Значение даётся при решении количественных задач
Нормальное атмосферное давление	$p_{атм}$	101325 Па	10 класс	Значение даётся при решении количественных задач
Радиус первой боровской орбиты	a_0	$5{,}29 \cdot 10^{-11}$ м	11 класс	В ходе объяснения нового материала даётся значение радиуса первой боровской орбиты
Ускорение свободного падения	g	9,81 м/с^2	9 класс	В ходе объяснения нового материала представлен опыт по нахождению ускорения свободного падения

При изучении констант можно руководствоваться следующими методическими рекомендациями:

1. Ввести обозначение фундаментальной физической константы.
2. Вести определение и единицы измерения физической константы.
3. Раскрыть физический смысл константы.
4. Рассказать историю открытия фундаментальной физической константы.
5. Решение задач на определение фундаментальной физической константы

The concept of a fundamental physical constant is disclosed. The basic properties of the fundamental physical constants are presented. The technique of introducing fundamental physical constants at school is considered.

Полудень Элеонора Валерьевна, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, elapoluden@gmail.com.

Научный руководитель – *Харазян Оксана Гагиковна*, кандидат педагогических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kharazian@gmail.com.

УДК 535.37

А. Д. ПУЗАНОВА

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗАТУХАНИЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ФОРМ ПОЛИМЕТИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ

Приведены результаты исследования закономерностей затухания флуоресценции пегилированного индотрикарбоцианинового красителя и исходной формы красителя без полиэтиленгликолей в растворах малополярного о-дихлорбензола.

Полиметиновые красители (ПК) нашли широкое распространение в различных областях человеческой деятельности. Отдельное внимание из большого разнообразия ПК заслуживают индотрикарбоцианиновые красители, которые по результатам исследования их свойств in vivo продемонстрировали высокий потенциал как фотосенсибилизаторы для фотодинамической терапии (ФДТ) онкологических заболеваний. В лаборатории спектроскопии НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ в течение последних двух десятилетий ведется разработка индотрикарбоцианиновых красителей, которые в полной мере соответствуют всем требованиям к современным фотосенсибилизаторам. Наиболее перспективным в этом отношении является индотрикарбоцианиновый краситель ПК220 с двумя цепочками полиэтиленгликолей, которые ковалентно связаны с концевыми группами исходного красителя ПК148. Модификация структуры фотосенсибилизатора с помощью полиэтиленгликолей в

значительной степени не повлияла на значимые для ФДТ фотофизические свойства, а главным образом улучшила водорастворимость и биосовместимость.

Свойства индотрикарбоцианинового красителя как фотосенсибилизатора в значительной степени зависят от микроокружения в месте локализации в биологических объектах. В зависимости от характера микроокружения наблюдается образование агрегатов, различных ионных форм красителя, а также образование комплексов с окружающими биомолекулами. Основываясь лишь на данные стационарной абсорбционной и флуоресцентной спектроскопии соединений невозможно получить информацию о каждом состоянии красителя в отдельности. С другой стороны, при измерении кинетики затухания флуоресценции полезная информация об отдельных флуоресцирующих центрах может содержаться как в значениях длительностей флуоресценции (τ_i), так и в соответствующих амплитудах (a_i) при аппроксимации экспериментальной функции затухания более чем одной экспонентой.

Измерения длительности флуоресценции проводились методом время коррелированного счета фотонов на спектрофлуориметре Fluorolog при использовании на возбуждении полупроводникового импульсного лазера с длиной волны 650 нм и длительностью импульса порядка одной наносекунды. Поскольку длительность возбуждающего импульса сопоставима с характерными временами жизни флуоресценции исследуемых красителей, то аппроксимация экспериментальной кинетики затухания проводилась по методу наименьших квадратов путем минимизации разности между экспериментальной кинетикой затухания и кинетикой полученной сверткой кинетики затухания возбуждающего импульса с одной или двумя экспонентами.

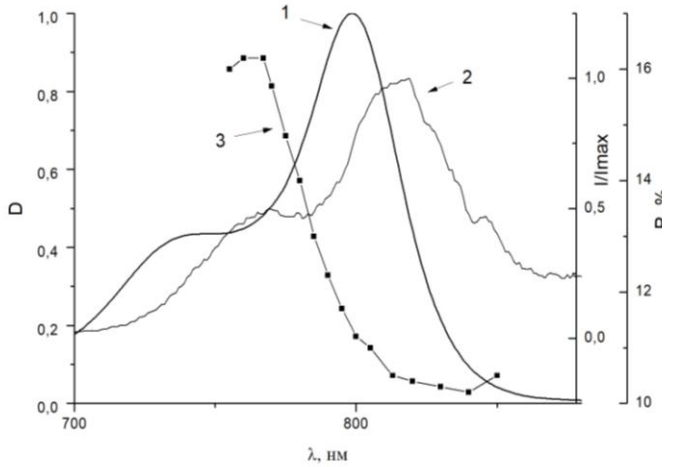


Рисунок 1 – Нормированный спектр поглощения (1) и флуоресценции (2) при возбуждении на длине волны 650 нм, степень поляризации по спектру флуоресценции (3) при возбуждении на длине волны 720 нм индотрикарбоцианинового красителя ПК148 в о-дихлорбензоле

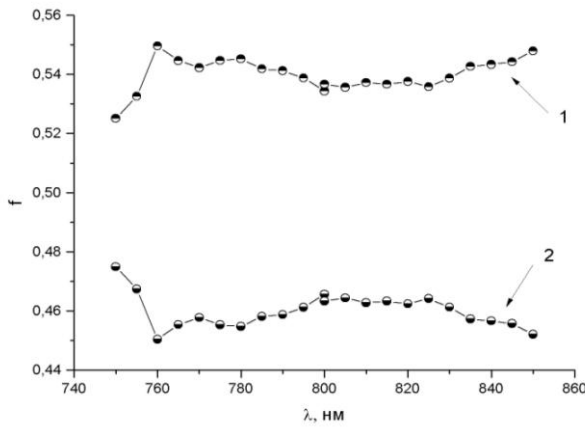


Рисунок 2 – Весовые коэффициенты для отдельной экспоненты кинетики затухания флуоресценции кинетики раствора ПК148 в о-дихлорбензоле: 1 – τ_1 = 1,9 нс, 2 – τ_2 = 1,5 нс. Концентрация красителя – 4 мкМ

Кинетика затухания растворов ПК220 в малополярном о-дихлорбензоле аппроксимируется одной экспонентой, что согласуется о нахождении пегилированной модификации ПК148 в малополярных растворителях в преимущественно в состоянии ионных пар [1]. Длительность флуоресценции составила 1,9 нс.

В спектрах поглощения и флуоресценции ПК148 в малополярном о-дихлорбензоле проявляются две компоненты (рисунок 1). Это обусловлено тем, что данный краситель в малополярных растворителях находится в виде равновесной смеси свободных ионов и ионных пар [1]. Наилучшее соответствие расчетной кривой затухания экспериментальной кинетике затухания флуоресценции ПК148 в о-дихлорбензоле достигается при использовании двухэкспоненциального базиса: τ_1 = 1,9 нс и τ_2 = 1,5 нс. На рисунке 2 приведены ход зависимости весовых коэффициентов f_i для отдельных экспонент, который характеризует вклад отдельной экспоненты в суммарную кинетику затухания [2]:

$$f_i = \frac{a_i \cdot \tau_i}{\sum_k a_k \cdot \tau_k}.$$

В результате измерений установлено, что, несмотря на проявление в спектре флуоресценции ПК148 двух компонент, не выявлено выраженной зависимости весового коэффициента для отдельной экспоненты от длины волны, что осложняет сопоставление найденных времен затухания фактическим флуоресцирующим центрам. С физической точки зрения весовой коэффициент это относительная интенсивность соответствующего

флуоресцирующего центра. В связи с этим весовой коэффициент кинетики затухания флуоресценции выделенной ионной формы красителя в растворе определяется ее концентрацией и квантовым выходом флуоресценции молекулы красителя в данном состоянии. Отсутствие корреляции зависимости весовых коэффициентов для отдельных экспонент от длины волны регистрации с полосой флуоресценции раствора ПК148 в о-дихлорбензоле указывает на более сложный характер кинетики затухания. Протекание большого числа процессов в возбужденном состоянии многих флуорофоров кинетика их затухания не одноэкспоненциальна. Это справедливо и для кинетики затухания для отдельных ионных форм молекулы ПК148 в растворе малополярного о-дихлорбензола. В дальнейших исследованиях при аппроксимации экспериментальной кинетики таких сложных систем следует использовать более сложные физические модели.

Идентификация флуоресцирующего центра может быть выполнена посредством анализа степени поляризации по спектру флуоресценции. В предположении, что эффективный объем молекулы одного и того же красителя в разных ионных формах остается постоянным, можно принять, что центру с более коротким временем жизни флуоресценции соответствует центр с большей степенью поляризации. На основании этого можно заключить, что длительность флуоресценции свободных ионов – 1,9 нс, а ионных пар – 1,5 нс.

Список литературы

1. Тарасов, Д. С. Влияние объемных заместителей на способность генерации синглетного кислорода индотрикарбоцианиновыми красителями / Д. С. Тарасов, М. П. Самцов, А. А. Луговский, А. С. Сташевский // Материалы и структуры современной электроники : материалы VIII междунар. науч. конф., Минск, 10–12 окт. 2018 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2018. – С. 341–345.

2. Лакович, Дж. Основы флуоресцентной спектроскопии / Дж. Лакович ; пер. с англ. – М. : Мир, 1986. – 496 с.

The results of the study of attenuation patterns of fluorescence of pegylated indotricarbocyanine dye and the original form of the dye without polyethylene glycols in solutions of low-polar o-dichlorobenzene are presented.

Пузанова Анна Дмитриевна, студентка физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, anna.dm1211@gmail.com.

Научные руководители – *Тарасов Дмитрий Сергеевич*, научный сотрудник лаборатории спектроскопии Института прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, dmitrij-tarasov@list.ru.

Самцов Михаил Петрович, доктор физико-математических наук, доцент, Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, samtsov@bsu.by.

УДК 535

М. Н. РАХМАТОВ, В. А. МАСЛОВ, С. Ф. АБДУЛЛАЕВ

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АЭРОЗОЛЕ И ПОЧВАХ СОГДИЙСКОЙ ОБЛАСТИ

Исследование аэрозольного загрязнения атмосферы Таджикистана [5] необходимо для понимания и решения проблемы регионального и глобального трансграничного переноса тяжелых металлов и его влияния на радиационный баланс, образование облаков и т. д.

Выбор темы исследования определялся актуальностью проведения экологического мониторинга на территории Северного Таджикистана (Согдийской области). Основными источниками выбросов аэрозоля, приводящих к опасному загрязнению атмосферы и почвы, здесь является автотранспорт, промышленные предприятия и поверхность открытых хвостохранилищ горнодобывающих предприятий региона [1–3].

Для достижения этой цели изучалось содержание тяжелых металлов в пробах атмосферного аэрозоля и почв, собранных на территории Северного Таджикистана.

Пробы очищаются в лабораторных условиях от инородного материала и размельчаются до порошкообразного вида, затем просеиваются через сито с сеткой 1 мм, упаковываются в стеклянные сосуды для хранения и исследований.

Элементный состав проб определялся методом рентгенофлуоресцентного анализа. Принцип действия спектрометра основан на облучении образца первичным излучением рентгеновской трубки, измерении интенсивности вторичного флуоресцентного излучения от образца на длинах волн, соответствующих определяемым элементам. Массовая доля этих элементов рассчитывается по предварительно построенной градуировочной характеристике, представляющей собой зависимость содержания определяемого элемента от измеренной интенсивности.

Экспериментальная установка и методика эксперимента описаны в [1].

В Северном Таджикистане собрано 69 проб атмосферного аэрозоля и 114 проб почв в период с октября 2013 г. по ноябрь 2018 г. Места сбора проб атмосферного аэрозоля и проб почв изображены на рисунках 1 и 2.

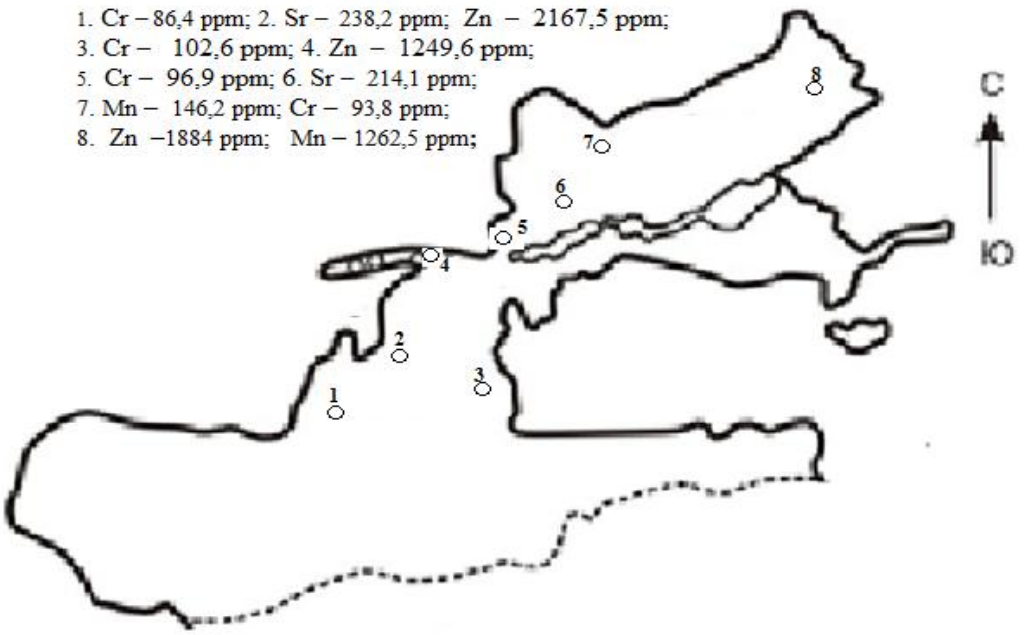


Рисунок 1 – Места сбора проб атмосферного аэрозоля

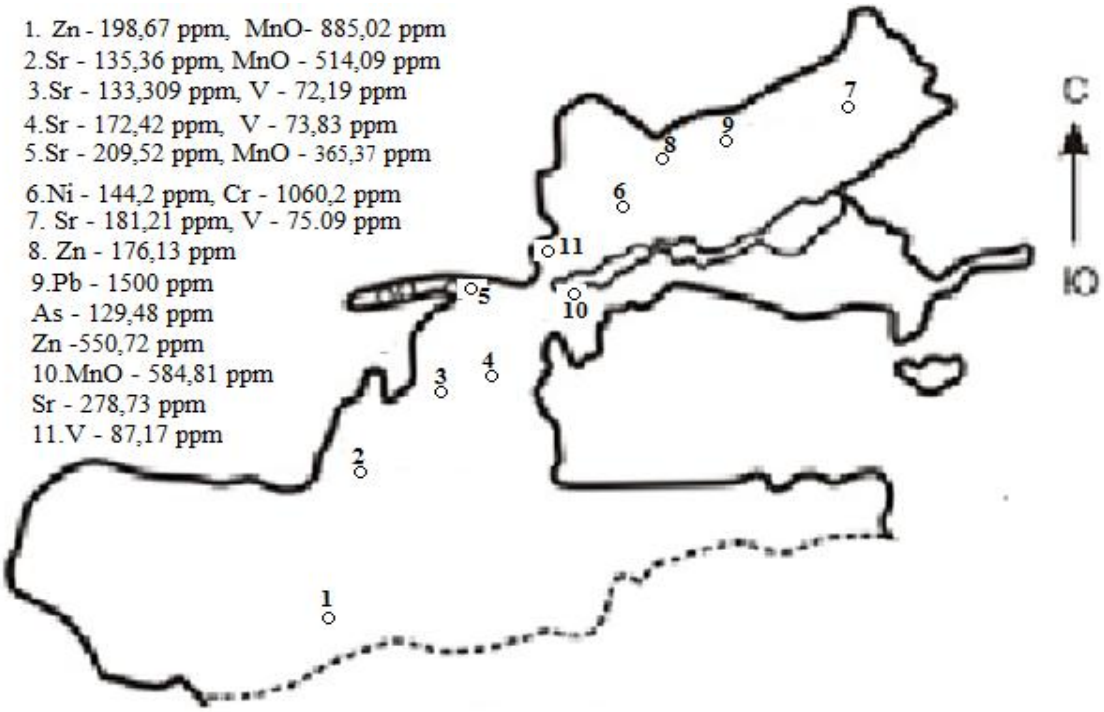


Рисунок 2 – Места сбора проб почв

На рисунке 1 видно, что высокие концентрации элементов в пробах атмосферного аэрозоля: Cr – 86,4 ppm, Sr – 238,2 ppm, Zn – 2167,5 ppm, Cr – 102,6 ppm зафиксированы в юго-восточной части области, включающей

Шахристанский, Истаравшанский и Деваштичский районы. В западной части Согдийский область (Зафарабадский р-н и село Фарманкураган) вблизи от границы с Узбекистаном обнаружено Zn – 1249,6 ppm, Cr – 96,9 ppm (см. рисунок 1). В городе Худжанд зафиксировали Sr – 214,1 ppm. На Табошаре (ныне Истиклал) в пробах аэрозоля обнаружено Mn – 146,2 ppm и Cr – 93,8 ppm. На севере области обнаружены высокие концентрации цинка (1884 ppm) и окиси марганца (1262,5 ppm).

Высокие концентрации цинка в атмосфере юго-западной части области, по-видимому, связаны с выбросами ряд промышленных предприятий (в частности, предприятий по производству цемента в Спитаменском районе). На границе со Спитаменским районом расположен Узбекский металлургический комбинат. Содержание цинка в атмосферном аэрозоле превышает его содержание в почве более чем в 7 раза. Источником является черная металлургия и выделяется из печей в виде пыли и дыма.

В г. Худжанде и в Зафарабадском районе в пробах атмосферного аэрозоля обнаружены более высокие концентрации никеля, чем в других районах Согдийской области. Содержание никеля в аэрозоле превышает в 3 раза его содержание в почве. Никель поступает в воздух при сжигании твердого и жидкого топлива, с выхлопными газами автотранспорта, а также в виде продуктов износа автомобильных шин и деталей автомобилей.

Содержание окиси марганца в пробах атмосферного аэрозоля превышает его содержание в почве примерно в 1,5 раз. Источником чаще всего являются составляющие промышленной пыли.

Большой разброс концентрации тяжелых металлов в пробах аэрозолей и почв свидетельствует о сложной экологической обстановкой в регионе, связанной с наличием многочисленных промышленных предприятий. Для мониторинга экологического состояния региона необходимо создание карт загрязнения территории с участием всех заинтересованных стран.

Список литературы

1. Радиационный мониторинг хвостохранилища «Дигмай» / Х. М. Назаров [и др.] // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. – 2015. – № 2 (159). – С. 78–82.

2. Муртазаев, Х. Радиационный мониторинг природных сред Северного Таджикистана / Х. Муртазаев, А. Гиясов, А. Муртазаев. – Худжанд : Меъроч, 2015. – 264 с.

3. Абдуллаев, С. Ф. Элементный состав атмосферного аэрозоля и почв Таджикистана / С. Ф. Абдуллаев, В. А. Маслов, Х. Х. Расулзода, М. Н. Рахматов // Вестн. ТНУ. – 2018. – № 1. – С. 77–82.

4. Ивлев, Л. С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей / Л. С. Ивлев. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1982.

5. Назаров, Б. И. Н-19. Атмосферный аэрозоль Центральной Азии / Б. И. Назаров, С. Ф. Абдуллаев, В. А. Маслов. – Душанбе : Дониш, 2017. – 416 с.

Рахматов Мухамади Нуридинович, аспирант кафедры теории физики и методики обучения физике Худжандского государственного университета имени академика Бободжана Гафурова, Душанбе, Таджикистан, muhamadi.rahmatov@-yandex.ru.

Научные руководители – *Абдуллаев Сабур Фузайлович*, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией физики атмосферы Физико-технического института имени С. У. Умарова Академии наук Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан, sabur.f.abdullaev@gmail.com.

Маслов Владимир Анатольевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики атмосферы Физико-технического института имени С. У. Умарова Академии наук Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан, vamaslov@inbox.ru.

УДК 37.016:53

Е. Ю. СЕРГЕЙ

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ УЧЕБНОГО ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Раскрыто понятие погрешности. Представлены результаты анкетирования 25 учащихся. Проведён анализ тетрадей для выполнения лабораторных работ по физике и описаны типичные ошибки.

В основе физики и ее приложений лежат экспериментальные результаты. Основная цель всякого физического эксперимента состоит в измерении физических величин, характеризующих исследуемый объект или явление. Под измерением понимается сравнение физической величины опытным путем с помощью

измерительных приборов с выбранной единицей измерения. В результате каждого отдельного измерения (оно называется наблюдением) получают численное значение измеряемой величины [1].

По способу получения результата все измерения делятся на прямые и косвенные. В прямых измерениях значение физической величины находят непосредственно отсчетом по шкале прибора. Таковы измерения длины линейкой или штангенциркулем, силы тока – амперметром, времени – секундомером, давления – барометром и т. д. Часто прямое измерение физической величины оказывается слишком трудоемким или невозможным. Тогда определяемую величину вычисляют по известной из теории формуле, в которую подставляют результаты прямых измерений. Такой метод измерения называется косвенным.

Для того, чтобы учащиеся успешно рассчитывали погрешность в лабораторной работе им нужно знать определения следующих понятий: измерение, прямые и косвенные измерения, погрешность, абсолютная погрешность, относительная погрешность, формулы для нахождения погрешностей прямых измерений; а также уметь: правильно округлять полученные значения, вычислять абсолютную и относительную погрешности прямых измерений, записывать полученный результат в интервальной форме. Вычисление погрешностей для косвенных измерений в лабораторных работах не предусмотрено.

Рассмотрим некоторые результаты анкетирования учащихся 9–11 классов (таблица 1). В исследовании участвовало 25 учащихся. Цель анкетирования: выявить уровень знаний учащихся по теории погрешностей.

Таблица 1 – Результаты анкетирования учащихся

Вопрос	Число респондентов, ответивших на вопрос без затруднений
1. Что такое измерения?	24 %
2. Какие виды измерений бывают?	8 %
3. Что такое погрешность?	28 %
4. Какие виды погрешностей вы знаете?	80 %
5. Что такое абсолютная погрешность?	4 %
6. Запишите формулу для нахождения погрешности.	8 %
7. Что такое относительная погрешность?	16 %
8. Записать погрешность в интервальной форме.	2 %
9. Чем отличаются прямые и косвенные измерения?	0 %

Таким образом, результаты анкетирования учащихся позволили выявить низкий уровень знаний теории погрешностей. Это может быть обусловлено тем, что на знакомство с понятием погрешности и способами её расчета не выделяется дополнительных часов. Учащиеся, как правило, только на лабораторных работах вычисляют погрешности прямых измерений.

Анализ тетрадей для выполнения лабораторных работ по физике позволил установить наиболее частые ошибки учащихся, допущенные при обработке результатов. Учащиеся испытывают наибольшие трудности в следующих случаях: при определении значений физической величины, расчёте абсолютной погрешности для прямого измерения и вычислении относительной погрешности [2]. Следовательно, выполнения лабораторных работ не достаточно для формирования знаний и умений расчета погрешностей. Данной проблеме необходимо уделять дополнительное время на уроках физики. В частности, необходимо более детально рассматривать теорию погрешностей и предлагать учащимся тренировочные задания на формирование соответствующих умений.

Для повышения уровня знаний и умений учащихся рекомендуется:

– разработать дополнительные методические материалы, для знакомства с теорией погрешностей в доступной и удобной для ознакомления форме;

– разработать задания-тренажеры, позволяющие потренироваться в округлении значений измерений, расчете абсолютных и относительных погрешностей прямых измерений, записи результатов измерений в интервальной форме;

– разработать контрольно-измерительные материалы, позволяющие установить уровень сформированности соответствующих знаний и умений расчета погрешностей.

Рассмотрим пример тренировочных заданий. Необходимо обработать результаты прямых измерений диаметра d шарика с помощью микрометра. Значения d_i для 5 измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения d_i

№ измерения	d_i, мм
1	5,27
2	5,30
3	5,28
4	5,32
5	5,28

1. Определить среднее значение диаметра шарика.
а) 5,28 мм
б) 5,36 мм
в) 5,29 мм
г) 5,18 мм

2. Определить случайную абсолютную погрешность шарика.
а) 0,0016 мм
б) 0,0017 мм
в) 0,009 мм
г) 0,09 мм

3. Чему равна погрешность микрометра?
а) 0,1 мм
б) 0,01 мм
в) 0,001 мм
г) 1 мм

4. Определить инструментальную погрешность шарика.
а) 0,0132 мм
б) 0,0134 мм
в) 0,013 мм
г) 0,013 см

5. Расчёт относительной погрешности.
а) $\varepsilon = \dfrac{\Delta x}{< x >}$
б) $\varepsilon = \dfrac{\Delta x}{< x >} \cdot 100\ \%$
в) $\varepsilon = \dfrac{< x >}{\Delta x}$
г) $\varepsilon = \dfrac{< x >}{\Delta x} \cdot 100\ \%$

6. Записать результат измерений в интервальной форме.
а) $d = (5,29 \pm 0,01)$ мм
б) $d = (5,230 \pm 0,013)$ мм
в) $d = (5,2900 \pm 0,013)$ мм
г) $d = (5,290 \pm 0,013)$ мм

Таким образом, изучения погрешностей только в рамках выполнения лабораторных работ не достаточно. Для лучшего усвоения теории погрешностей и формирования практических умений по расчету погрешностей необходимо отводить дополнительное время на уроках физики. Такой подход позволит более детально изучить теорию и выполнить тренировочные задания для формирования соответствующих умений.

Список литературы

1. Фокин, С. А. Обработка результатов измерений физических величин / С. А. Фокин. – СПб., 2003. – С. 62.

2. Физика. Астрономия. 6–11 кл. : примерное календарно-тематическое планирование : пособие для учителей учр. общ. сред. образования / И. В. Галузо [и др.]. – Минск : НИО.: Аверсэв, 2017.

The concept of error is disclosed. The results of questioning of 25 students are presented. The analysis of notebooks for performance of laboratory works on physics is conducted and the typical errors are described.

Сергей Елизавета Юрьевна, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, liza.sergey.2017@gmail.com.

Научный руководитель – *Харазян Оксана Гагиковна*, кандидат педагогических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kharazian.og@gmail.com.

УДК 535.243

Ю. В. СОЛОМА

ЖИДКИЕ ЭТАЛОНЫ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ[1]

Рассмотрены жидкие эталоны оптической плотности (вещества со стабильными и точно известными характеристиками спектров оптической плотности по частоте и интенсивности этих спектров) для поверки и калибровки спектрофотометров. Зарегистрированы спектры поглощения таких эталонов различной концентрации.

Спектрофотометрия – область физики и техники, объединяющая разделы спектрометрии, фотометрии и метрологии и разрабатывающая системы методов и приборов для количественных измерений спектрального коэффициента поглощения, отражения, излучения, спектральной яркости как характеристик сред, покрытий, поверхностей, излучателей. Спектрофотометры позволяют регистрировать световые потоки в широком интервале изменения длин волн от 185 нм до ~1100 нм, т. е. в ультрафиолетовой (УФ), видимой и ближней инфракрасной (ИК) области спектра. Это дает большие возможности для количественного и качественного определения различных веществ. Спектрофотометр используется для исследования свойств разных веществ путем анализа спектрального состава отражённого или прошедшего через вещество излучения в оптическом диапазоне по отражению (поглощению) различных длин волн электромагнитного излучения. При исследовании кинетики химических реакций обычно используется тот факт, что исходные вещества и продукты реакции имеют разное поглощение. Это позволяет следить за изменением их концентраций во времени. УФ спектрофотометрия нашла широкое применение и в фармации, т. к. это наиболее простой и эффективный метод анализа лекарственных средств.

Очевидно, что оптимизация и повышение качества метрологического контроля спектрофотометров является весьма важной проблемой.

В последние годы, особенно расширилось применение спектрофотометрии для количественного и качественного анализа (в том числе в биомедицинских приложениях, в которых исследуются жидкие образцы).

Целью данной работы является исследование возможности использования жидких веществ со стабильными и точно известными характеристиками спектров оптической плотности, для поверки и калибровки спектрофотометров.

Основные параметры спектрофотометров:

- спектральная ширина полосы пропускания;
- разрешающая способность.

Поверка и калибровка осуществляется в соответствии с государственными стандартами, которые устанавливают правила, требования и нормы, определяющие организацию и методику проведения работ по обеспечению единства и точности измерений (например, ГОСТ 8.229—2013) .

Проведение поверки:

- Внешний осмотр.
- Определение разрешающей способности.
- Определение погрешности градуировки шкалы волновых чисел.
- Определение уровня мешающего излучения.
- Определение абсолютной основной погрешности спектрофотометра.

Для поверки и калибровки спектрофотометров, используемых в биомедицинских приложениях, удобно применять жидкие вещества со стабильными и точно известными характеристиками спектров оптической плотности по частоте и интенсивности этих спектров (жидкие эталоны оптической плотности).

[1]Работа инициирована РУП «Гродненский центр стандартизации, метрологии и сертификации».

В качестве таких эталонов могут быть использованы:

- оксид гольмия;
- дихромат калия;
- нигрозин.

Для калибровки значений (шкалы) волновых чисел (длин волн) в УФ и видимой областях спектрального диапазона удобно применять жидкий эталон оптической плотности на основе оксида гольмия (рисунок 1). Для калибровки значений оптической плотности возможно применение водных растворов нигрозина. Зарегистрированы спектры оптической плотности водных растворов нигрозина разной концентрации (рисунок 2). Максимум полосы поглощения для каждого спектра находится на длине волны около 575 нм.

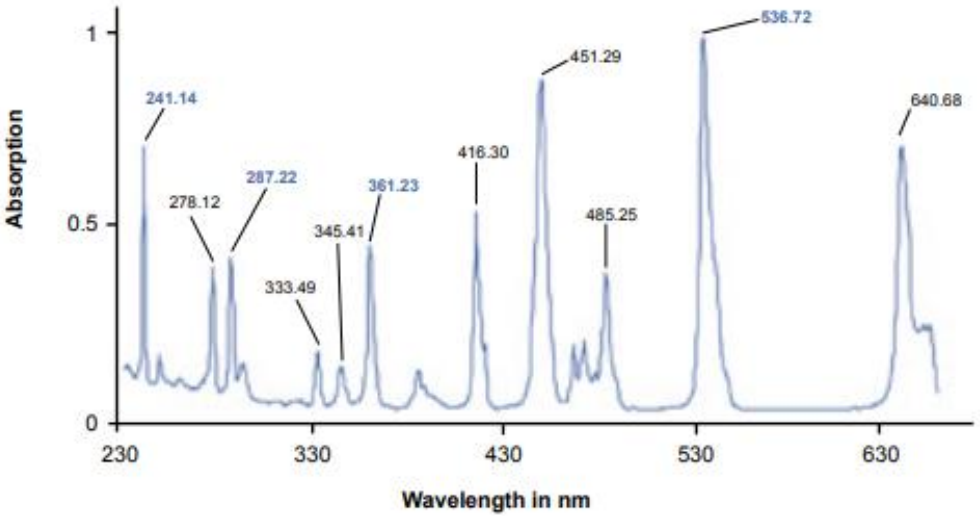


Рисунок 1 – Типичный спектр поглощения оксида гольмия в перхлорной кислоте

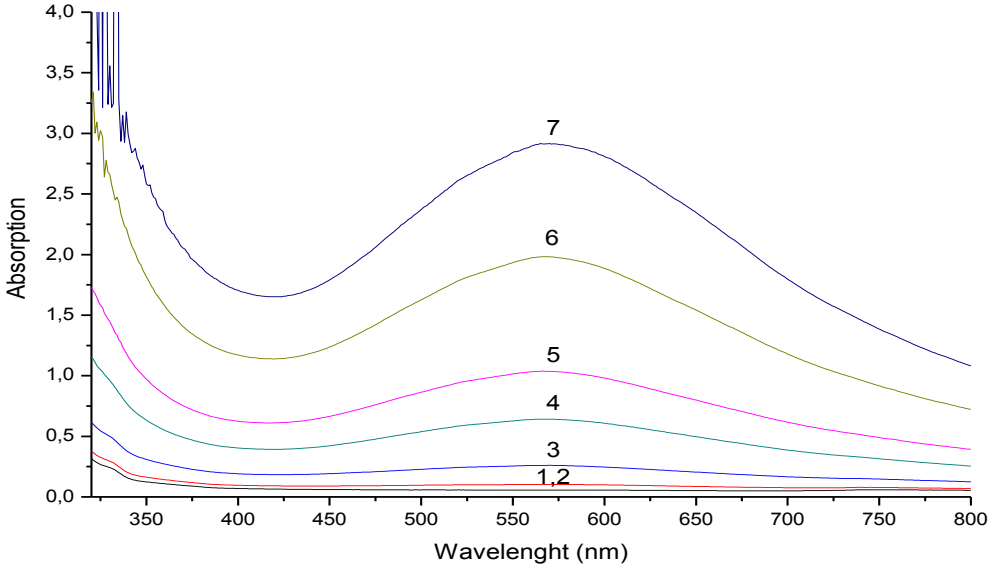


Рисунок 2 – Спектры поглощения водных растворов нигрозина различных концентраций

Предложены жидкие эталоны оптической плотности для поверки (калибровки) спектрофотометров.

Зарегистрированы спектры оптической плотности жидких эталонов для поверки (калибровки) спектрофотометров.

Список литературы

1. Прохоров, А. М. Физический энциклопедический словарь [Электронный ресурс] / А. М. Прохоров. – М. : Советская энциклопедия, 1983. – Режим доступа: http://physiclib.ru/physicenc/index.shtml.

2. Спектрофотометрия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studfiles.net/preview/6014405/page:2/

3. Тарасов, К. И. Спектральные приборы / К. И. Тарасов. – 2-е изд. – М., 1977.

4. ГОСТ 8.229–2013. Спектрофотометры инфракрасные. Методика поверки [Электронный ресурс]. – Ввв. 01.01.2015. – Режим доступа: http://gostpdf.ru/cont/files/8.229-2013/gost-8.229-2013.14403.pdf.

In this work we explored liquid optical density standards (substances with stable and accurately known characteristics of optical density spectra in terms of frequency and intensity of these spectra) for verification and calibrating spectrophotometers. Also we've registered the absorption spectra of such standards with various concentration.

Солома Юлия Викторовна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, soloma_jv_15@student.grsu.by.

Научный руководитель – *Василюк Геннадий Тимофеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, vasilyuk@grsu.by.

УДК 37.016:53

В. В. ЮШКЕВИЧ

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ ФОРМУЛ В ШКОЛЬНОМ КУРСЕ ФИЗИКИ

Раскрыта значимость формул в курсе физики. Описаны семь способов выводов формул. Представлены результаты анализа учебного пособия.

Формулы по физике отражают функциональные зависимости между различными физическими величинами и представляют собой математическую запись физических законов. На всех этапах процесса изучения физики используются формулы: для введения новых понятий, на лабораторных работах, при решении задач. Таким образом, работа с формулами являются неотъемлемой частью процесса изучения физики.

При выводе формул можно руководствоваться следующим алгоритмом:

1. Актуализация знаний. На этом этапе необходимо опросить у учащихся величины, определения, формулы которые в дальнейшем пригодятся для вывода формул.
2. Обсуждение алгоритма вывода формулы с классом.
3. Вывод формулы, основанный на беседе с учащимися.
4. Обсуждение полученной формулы. Выражение её через другие физические величины.
5. Формулировка основных выводов, вытекающих из данной формулы.
6. Решение качественных задач для проверки понимания сущности выведенной закономерности.
7. Решение расчетных задач, для закрепления вывода формулы и её запоминания.
8. Рассказ о том, как данная формула была выведена учеными.

Анализ учебных пособий по физике показал, что при изложении учебного материала авторы используют 4 способа выводов формул. Рассмотрим эти способы.

1. Представление формул в готовом виде. Часть формул школьного курса физики представляется без вывода. Они сопровождается только пояснением физических величин, которые в них входят. Чаще всего данный способ применяется относительно тех формул, которые вводятся в начале изучения новой темы. Указанные формулы, как правило, сопровождаются определением новых физических понятий. Например, формулы для расчета: скорости равномерного движения, объема параллелепипеда. Формулы, введенные данным способом, учащимся необходимо запомнить в готовом виде.

2. Теоретический вывод формул. Для ряда формул по физике используется теория с математическими выкладками. Данный метод применим к тем формулам, для вывода которых у школьников достаточно знаний по математике и физике. Например, формулы для расчета: периода колебаний пружинного маятника, внутренней энергии однородного идеального газа.

Используя данный способ учащимся необходимо запоминать и следить за ходом вывода формул. Если вывод достаточно объемный, то появляется риск того, что учащиеся могут потерять нить рассуждений. Если вывод формул не сложный, то теоретический вывод позволяет упростить понимание и запоминание данных формул, а также глубже понять их физический смысл.

3. Экспериментальный вывод формул. Данный способ заключается в том, что функциональные зависимости между физическими величинами устанавливаются через эксперимент. Описанный в учебнике для данных формул эксперимент учитель может продемонстрировать в реальных или виртуальных условиях. Например, формулы для вывода закона Ома, вывода формулы для вычисления мгновенной скорости материальной точки.

Данный способ дает возможность включать учащихся в самостоятельную деятельность по выводу формул, например, через выполнение фронтальных опытов или наблюдений и анализ демонстрационных опытов. Учащиеся могут непосредственно убедиться в справедливости физических законов. Ограничение данного подхода связано с затратой времени на уроке.

4. Вывод формул через логические рассуждения, основанные на мысленном эксперименте. Есть формулы, для ввода которых используется мысленный эксперимент. При этом в учебнике описывается некоторая физическая ситуация, анализ которой позволяет путем логических рассуждений установить функциональные зависимости рассматриваемых физических величин. Иногда вывод формул не сопровождается описанием какой-либо физической ситуации, а основываются на логических рассуждениях. Например, для вывода формул: модуля ускорения, угловой скорости, ускорения свободного падения.

На наш взгляд, данный способ выводов формул чаще всего может иметь место, если невозможно вывести формулы теоретически и экспериментально.

Можно выделить еще 3 способа, которые не представлены в школьном курсе физики: способ аналогий, графический способ и метод размерностей.

5. Вывод формул на основе аналогий заключается в том, что одним физическим величинам ставятся в соответствие другие физические величины. При этом зная функциональную зависимость первых, можно установить характер зависимости для вторых. Данный подход уместно применять в случае, если для вывода формулы нужно владеть математическим аппаратом, недоступным для учащихся. Например, удобно использовать электромеханические аналогии для вывода следующих формул: энергия электрического поля конденсатора, энергия магнитного поля катушки, циклическая частота и период колебательного конура.

Применение данного метода имеет опасность, которая заключается в том, что учащиеся могут принять аналогию между физическими величинами за их равенство.

6. Вывод формул графическим способом. Для вывода ряда формул необходимо уметь брать интеграл. Формулы для определения данных физических величин можно получить графическим методом. Как правило, исходные величины рассчитываются как площадь под графиком. Например, расчет работы переменной силы, работы газа в произвольном процессе, нахождение пути, при движении тела со скоростью, которая изменяется по произвольному закону.

7. Вывод формул методом размерностей. Данный способ предполагает вывод формулы на основе знаний размерности искомой величины.

За курс физики в 7 классе дается 13 формул [1]. Большая часть формул представляется учащимся в готовом виде (46 % формул). Это обусловлено тем, что учащиеся раньше не изучали данный предмет, и они не имеют еще представления о картине мира. Наименьшее число формул вводится через логические рассуждения, основанные на мысленном эксперименте (23 % формул). Оставшаяся часть формул вводится через теоретический вывод (31 % формул). Экспериментальный вывод формул в этом классе не используется. На наш взгляд, в указанном классе необходимо больше использовать экспериментальный подход к изучению физики и меньше теоретический, поскольку в данном возрасте еще плохо развито аналитическое мышление.

За курс физики в 8 классе дается 29 формул [2]. Большая часть формул вводится через теоретический вывод (34 %). Наименьшее число формул вводится через логические рассуждения, основанные на мысленном эксперименте, и экспериментальный вывод формул (по 21 %). Оставшаяся часть формул представляется учащимся в готовом виде (24 %). В этом классе используются все способы вывода формул примерно в равных долях.

За курс физики в 9 классе дается 44 формул [3]. Большая часть формул вводится через теоретический вывод (32 %). Это объясняется тем, что учащиеся 9 класса владеют достаточным математическим аппаратом для вывода сложных формул. В этом классе применяются все способы выводов формул. Наименьшее число формул представляется учащимся в готовом виде (16 %). Оставшаяся часть формул вводится через логические рассуждения, основанные на мысленном эксперименте (25 %) и экспериментальный вывод формул (27 %).

За курс физики в 10 классе дается 36 формул [4]. Большая часть формул представляется учащимся в готовом виде (39 %). Это объясняется тем, что в 10 классе вводится много новых физических величин и понятий. Наименьшее число формул вводится через логические рассуждения, основанные на мысленном эксперименте (14 %). Оставшаяся часть формул вводится через теоретический (28 %) и экспериментальный вывод (19 %).

За курс физики в 11 классе дается 24 формулы [5]. Большая часть формул вводится через теоретический вывод (42 %). Наименьшее число формул вводится через логические рассуждения, основанные на мысленном эксперименте (8 %). Оставшаяся часть формул вводится через экспериментальный вывод (29 %) и также представляются учащимся в готовом виде (21 %).

Таким образом, авторы учебного пособия по физике за 7–11 классы предлагают 146 формул. На практике реализуются только 4 способа вывода формул. Большое количество формул выводится с помощью способа теоретического вывода формул. Эти формулы занимают 33 % всех формул. Меньше всего используются формулы, вывод которых осуществляется через логические рассуждения, основанные на мысленном эксперименте. Они занимают всего 18 % всех формул. В 9 классе формул изучается больше, чем в остальных классах.

Список литературы

1. Исаченкова, Л. А. Физика : учеб. пособие для 7-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / Л. А. Исаченкова, Ю. Д. Лещинский ; под ред. Л. А. Исаченковой. – 2-е изд., перераб. – Минск : Народная асвета, 2017. – 167 с.

2. Исаченкова, Л. А. Физика : учеб. пособие для 8-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / Л. А. Исаченкова, Ю. Д. Лещинский, В. В. Дорофейчик ; под ред. Л. А. Исаченковой. – 2-е изд., перераб. – Минск : Народная асвета, 2018. – 174 с.

3. Исаченкова, Л. А. Физика : учеб. пособие для 9-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / Л. А. Исаченкова, Г. В. Пальчик, А. А. Сокольский ; под ред. А. А. Сокольского. – 2-е изд., перераб. – Минск : Народная асвета, 2015. – 221 с.

4. Громыко, Е. В. Физика : учеб. пособие для 10-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / Е. В. Громыко, В. И. Зенькович, А. А. Луцевич, И. Э. Слесарь. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2013. – 272 с.

5. Жилко, В. В. Физика : учеб. пособие для 11-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / В. В. Жилко, Л. Г. Маркович. – 2-е изд., пересмотр. и доп. – Минск : Народная асвета, 2014. – 287 с.

Revealed the importance of formulas in the course of physics. 7 ways of derivation of formulas are described. Presents the results of the analysis of the training manual.

Юшкевич Виктория Викторовна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, jshkevichvv15@gmail.com.

Научный руководитель – *Харазян Оксана Гагиковна*, кандидат педагогических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kharazian.og@gmail.com.

СОДЕРЖАНИЕ

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

Hasanien A. Alsharif. Surface morphology of nickel composite coatings formed under the effect of UV- and X-rays radiation 3
Акулич В. А., Рябцева А. С., Патапович М. П. Роль объёмно-структурированных стандартных образцов в повышении чувствительности интегральных спектрометрических методов 4
Аль-Камали М. Ф. С. Х., Алексеенко А. А. Получение и области применения SiO_2- ксерогелей и порошков на их основе, содержащих наночастицы восстановленных металлов 6
Анушкевич И. А. Определение температуры лазерно-эмиссионной плазмы методом Орнштейна 8
Анушкевич И. А. Расчёт концентрации электронов в лазерно-эмиссионной плазме 11
Белько Н. В. Влияние pH и ионной силы водной среды на процесс агрегации индотрикарбоцианинового красителя 13
Бобкова М. В., Мельникова Е. А. Формирование сингулярных световых пучков с заданной поляризационной структурой электрически управляемыми жидкокристаллическими элементами 16
Бушкевич И. А. Термическая стабильность сплава системы Al-Mg-Li, легированного скандием и цирконием 18
Величко А. М. Температурная трансформация полосы поглощения междоузельного кислорода в германии 20
Гоголева С. Д. Квантово-химические расчёты поверхностей потенциальной энергии основного и возбуждённого состояний катиона молекулы 2-[4'-(диметиламино)фенил]-6-метил-бензтиазола 22
Губаревич И. К. Влияние внешних электрических полей на пароплазменное образование при воздействии лазерного излучения на металлы 24
Евдокимов А. Ю. Структурные изменения в заэвтектическом силумине при воздействии компрессионными плазменными потоками 26
Евстигнеева В. П., Czarnecka K. Исследование температурной зависимости удельного сопротивления в магнитном поле сплавов CoNiFe, сформированных при воздействии рентгеновского излучения 28
Ёрш Д. С., Протасеня А. И. Дефекты в кремнии *n*-типа, имплантированном низкоэнергетическими ионами водорода 30
Зерница Д. А. Влияние изотермического отжига на фазовый состав фольг Sn – 20 мас. % Zn, полученных сверхбыстрым затвердеванием 32
Карпач П. В. Модуляция флуоресценции фотохромного нанокомпозита на основе квантовых точек 35
Качан М. Д. Суперячейка обратной решётки кристаллов 36
Ковалёнок А. А. Трансформация спектра комбинационного рассеяния света в твёрдых растворах *кремний-германий* при изменении их компонентного состава 39
Копать А. С. Влияние параметров лазерного излучения на интенсивность спектральных линий алюминия лазерно-эмиссионной плазмы 40
Копать А. С. Влияние межимпульсного интервала на интенсивность спектральных линий белой технологической глины при двухимпульсном возбуждении лазерно-эмиссионной плазмы 44
Крищук А. В. Влияние термической предыстории на термоэлектрические характеристики слоистого кобальтита кальция 46
Латушко С. И., Желудкевич Д. В. Эволюция кристаллической структуры керамических составов $BiFeO_3$, замещённых ионами Ba и Ti 48
Луценко В. Е., Григорьева Д. В. Влияние противовоспалительных и антибактериальных препаратов на функциональный ответ нейтрофилов 51
Лытнев И. Д., Филип Я. Вольтамперометрические методы определения концентрации тяжёлых металлов в воде 52
Меттиев А. К. Рост каверны при лазерном воздействии на прозрачный диэлектрик в условии существования более крупной осциллирующей каверны 54
Минченя А. А., Климович П. Г. Кислотно-основное равновесие корролов в бинарных растворителях MeCN-EtOH 57
Мир Д. В., Писаренко Н. С. Моделирование задержек сигнала в межуровневой структуре межсоединений интегральных микросхем 58
Никитина А. В. Уширение контура спектральных линий в спектрах нестационарной ёмкостной спектроскопии глубоких уровней 61
Нургелдиева Г. Н. Нагревание прозрачных диэлектриков при воздействии на их поверхность лазерного излучения 62
Ольховик В. В. Исследование влияния задержки между импульсами на интенсивность анализируемых спектральных линий 65
Парафинюк Д. А., Холов П. А., Сукалин К. С., Райченок Т. Ф., Гапоненко Н. В. Оптические свойства многослойных структур, сформированных золь-гель методом 67
Прилуцкий С. А. Модификация фазового состава циркония под действием компрессионных плазменных потоков 69
Радевич Ю. Л. Оптические свойства наночастиц на основе Ag-In-S/ZnS 71
Русак Г. А. Микроструктура быстрозатвердевшего сплава $Bi_{32}In_{41}Sn_{27}$ 73

Санюкевич Д. С. Влияние задержки между импульсами возбуждения лазерно-эмиссионной плазмы на интенсивность спектральных линий ... 75
Санюкевич Д. С. Зависимость интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы от расфокусировки лазерного излучения ... 77
Середенко А. В. Фотостабильность и ресурс работы комплексов включения лазерных красителей с β-циклодекстрином и наночастицами серебра ... 80
Стасевич Н. А. Электрогидравлический способ обогащения диатомита ... 83
Степанюк Н. А. Особенности структуры сплава FeCuCoMnNi ... 86
Сугак Я. Н. Определение микродеформаций и размеров зёрен в многослойных плёнках ... 88
Таболич А. А. Влияние функционального состава поверхности ультрадисперсных алмазов на стабильность спектральных свойств их водных суспензий ... 90
Трубецкая А. С., Титова А. В., Маслова Г. Т. Использование морфоструктурного анализа и лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии высохших капель плазмы крови для диагностики пациентов с опухолями головного мозга (астроцитома) ... 92
Трубецкая А. С., Титова А. В., Маслова Г. Т. Использование морфоструктурного анализа и инфракрасной спектрометрии для диагностики опухолей головного мозга (астроцитома) ... 94
Халупа И. И. Модифицирующая способность наночастиц в полимерных композитах ... 97
Хорольский А. В. Концентрационные и температурные зависимости эффективных радиусов макромолекул сывороточного альбумина человека ... 98
Цветков В. А. Исследование морфологии поверхности твёрдых растворов *кремний-германий* при изменении их компонентного состава ... 100
Чвек М. А. Трансформация зонной структуры растворов *кремний-германий* в зависимости от их компонентного состава ... 101
Шевелёва В. В. Кинетика высокотемпературного окисления циркония ... 103
Юсенко А. А. Влияние смесей механоактивированных наночастиц различного строения на структуру и свойства малонаполненных композитов ... 105
Янучек Д. Н. Акустическая диагностика зоны лазерного разрушения металлической мишени ... 107

Секция 2. **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФИЗИКЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

Войтеховский Е. О. Сравнительный анализ использования возможностей библиотек CMSIS и SPL в разработке управляющих программ для ядер Cortex M4 ... 108
Григуть О. В. Моделирование измерения сопротивления обмоток силового трансформатора в системе MatLab-Simulink ... 110
Диас Л. Роселина А., Котов Д. А. Расчёт распределения толщины плёнки на плоской подложке, получаемой методом магнетронного распыления ... 112
Козлов А. О. Моделирование одноразмерных периодических структур ... 114
Курапцова А. А. Влияние солнечного излучения на гетероструктуру кремний/оксид цинка ... 115
Лахмицкий Н. В. Анализ спектров поглощения многокомпонентных растворов индотрикарбоцианиновых красителей ... 117
Нгуен Куанг Шан. Стационарные состояния модели Раби ... 119
Ремизевич М. В. Переключение и синхронизация бистабильных ловушечных состояний ... 122
Старовойтов Н. А. Влияние фрактальной структуры наполнителя на эффективную теплопроводность композиционной системы ... 123
Фельшерук А. В. Комплексная диэлектрическая проницаемость монослоя графена в терагерцовом диапазоне частот ... 125
Чекель А. В. Метод расчёта давлений в межпозвонковом диске шейного отдела позвоночника ... 127

Секция 3. **ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

Акулич В. А., Колбасин А. И., Патапович М. П. Аппаратурный комплекс лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии ... 129
Банцевич П. П. Назначение, классификация и основные принципы построения электрических сетей ... 131
Барахоев А. Л., Тубольцев В. В. Регулируемый источник питания для генератора озона технологического назначения ... 133
Белофост С. Н. Получение данных клавиатурного почерка пользователей ... 135
Данилов М. А. Некоторые вопросы повышения эффективности системы электроснабжения собственных нужд на электростанциях большой мощности ... 137
Ерёмина Е. О. Полихроматор изображения для спектроскопии с пространственным разрешением ... 138
Журавская К. В. Измерение скорости распространения звука в различных средах в лабораторном практикуме ... 140

Жуковский Ю. Ю., Курганский В. И., Жук Е. В. Исследование показателя качества обслуживания клиентов в сфере услуг ... 141
Занько А. И., Ясюнас А. А. Получение плёнок SiO_2 методом CDV с применением плоского источника индуктивно-связанной плазмы ... 142
Запорожченко Ю. В., Яцевич Е. В., Аксючиц А. В. Изменение адгезионных свойств поверхности кремния после обработки в плазме атмосферного разряда ... 145
Кадач Р. С. Модернизация энергоснабжения артезианских скважин в д. Новая Гожа ... 147
Калинов А. А., Клёнин Е. Г. Терморегулятор для автоматизированной установки для проведения испытаний образцов на коррозийную стойкость ... 149
Кедало П. А. Модель и эксперимент многоуровневого доступа к медицинским данным ... 151
Киселёв А. В. Анализ существующих измерителей загрязнённости воздуха ... 153
Кисель С. А. Модернизация схемы электроснабжения Гродненского облисполкома на основе автоматического ввода резерва ... 155
Кобылянец Я. Д., Купчевский А. Т. Терморегулирование и термостатирование ёмкостей при поверке (калибровке) алкотестеров ... 157
Костиков О. В. Изучение нелинейного осциллятора Дуффинга ... 159
Купчевский А. Т., Кобылянец Я. Д. Терморегулирование при измерении вязкости ... 161
Леонович Н. В., Толкач М. А., Занько А. И. Реактор осаждения алмазоподобных углеродных покрытий ... 163
Маршалок Е. В. Акустический калибратор ... 165
Мищенко А. Д. Модернизация ЗРУ 6 и 10 кВ ПС-110 Станиславово ... 166
Палмера М., Котов Д. А. Тепловая модель торцевого холловского источника ионов ... 167
Петрулевич Е. Г. Реконструкция электрощитовой с заменой на автоматические выключатели ... 170
Пилимон Р. Г. Модернизация котельной на ОАО «Гроднохлебопродукт» ... 172
Полубятко А. И. Устройство для одновременной поверки импульсных расходомеров ... 174
Савощеня А. В. Поверка и калибровка средств измерений массы малых значений ... 175
Тетько А. В. Система электродеионизации водоподготовки в химической промышленности ... 176
Тихон О. И. Метод комбинированной фотохимически стимулированной обработки кремниевых пластин ... 178
Яцевич Е. В., Запорожченко Ю. В., Аксючиц А. В. Управление поверхностными свойствами полимеров в плазме атмосферного разряда ... 180

Секция 4. **АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

Аксенова А. Ю. Компьютерная визуализация физических процессов на примере парадокса Лошмидта ... 183
Виноградов Е. В. Недостатки метода Цернике и Принса ... 184
Григорьева Т. В. Оптимальные условия теплового взрыва медного проводника в воде для реализации электрогидравлического эффекта ... 186
Губаревич И. К. Установка для создания внешнего электрического поля при воздействии лазерного излучения на различные образцы ... 189
Даденков И. Г. Запись динамических голограмм в фоторефрактивных кристаллах силиката висмута ... 190
Дубешко С. В. Проблемы при решении графических задач по молекулярной физике в средней школе ... 192
Коваленко А. Д. Тестирование как углубленный инструмент изучения физики ... 193
Коваленко А. Д. Систематизация знаний и психологическая готовность как залог успеха на централизованном тестировании ... 196
Микулевич Т. М., Ануфриева В. А. Резонансные явления при обтекании препятствий воздушными потоками ... 198
Полудень Э. В. Фундаментальные физические константы в школьном курсе физики ... 200
Пузанова А. Д. Закономерности затухания флуоресценции наноструктурированных форм полиметиновых красителей ... 202
Рахматов М. Н., Маслов В. А., Абдуллаев С. Ф. Результаты исследования содержания тяжёлых металлов в аэрозоле и почвах Согдийской области ... 204
Сергей Е. Ю. Обработка результатов физических измерений при выполнении учебного физического эксперимента ... 206
Солома Ю. В. Жидкие эталоны оптической плотности ... 209
Юшкевич В. В. Методические основы изучения формул в школьном курсе физики ... 211