



УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ГРОДНЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ЯНКИ КУПАЛЫ»

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

НАУЧНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ ИЗДАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

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

(Гродно, 7–8 апреля 2022 г.)



Гродно
ГрГУ им. Янки Купалы
2022

УДК 538.9
ББК 22.35
Ф50

Редакционная коллегия:

*Г. А. Гачко (гл. ред.), Н. Г. Валько (зам. гл. ред.),
С. С. Ануфрик, А. А. Маскевич, А. Е. Герман*

Издаётся в авторской редакции

Ответственный за выпуск *Б. А. Ассанович*

Дизайн упаковки: *А. Е. Герман*

Руководитель редакции *Е. А. Смирнова*

Техническое редактирование: *М. В. Вахмянина, Е. С. Франко*

Компьютерная вёрстка: *И. П. Зимницкая*

Ф50 **Физика** конденсированного состояния [Электронный ресурс] : материалы XXX междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 7–8 апр. 2022 г.) / ГрГУ им. Янки Купалы, физ.-техн. фак. ; редкол.: Г. А. Гачко (гл. ред.), Н. Г. Валько (зам. гл. ред.) [и др.]. – Объём электрон. дан. 13,5 Мбайт. – 31,0 уч.-изд. л. – Гродно : ГрГУ, 2022. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Тираж 16 экз. – Заказ 021.

ISBN 978-985-582-488-7

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

УДК 538.9
ББК 22.35

Издатель и изготовитель:

учреждение образования

«Гродненский государственный университет имени Янки Купалы».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,

изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/261 от 02.04.2014.

Ул. Ожешко, д. 22, 230023, Гродно, Республика Беларусь.

www.grsu.by

ISBN 978-985-582-488-7

© Учреждение образования
«Гродненский государственный университет
имени Янки Купалы», 2022

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

УДК 678.686

S. MAZHEIKA, H. MALTANAVA, E. OVODOK, S. POZNYAK

**PIEZORESISTIVE PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITE MATERIALS DOPED
WITH CARBON NANOTUBES**

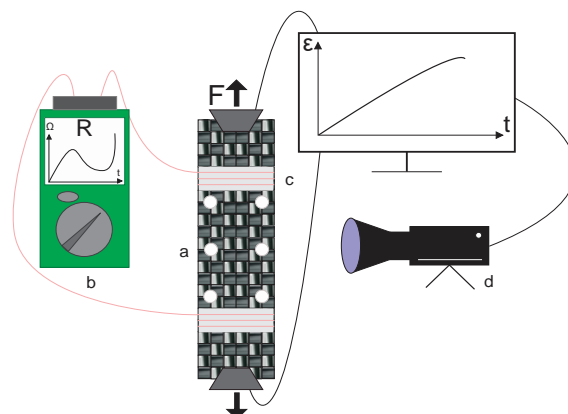
Epoxy based polymer composites have been prepared using multi-walled carbon nanotubes as a filler. The electrical and mechanical properties as well as the piezoresistive effect of the obtained composites have been studied. The percolation threshold for an epoxy composite filled with nanotubes is ~ 0.013 wt. %. The piezoresistive response of composites depends on the content of carbon nanotubes. Composites containing 0.1 wt. % carbon nanotubes are characterized by a higher sensitivity to deformation compared to samples with higher filler content (0.25 wt. % and 0.5 wt. %).

Polymer composites containing conductive nanosized fillers attract great attention due to their wide range of potential high-tech applications [1]. Multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs) considered to be prospective filler in such materials owing to its unique physicochemical properties. The conductive composites based on epoxy resin and MWCNTs open up new possibilities for creation of multifunctional materials. For example, the electrical conductivity of epoxy resin – MWCNTs composites is directly correlated with the macroscopic strain applied to the material. The piezoresistive effect of such composites allows to monitor in real-time mechanical behavior of structural components made from such material by measuring their electrical properties [2].

The aim of this work was to obtain conductive composites «epoxy resin – MWCNTs» as well as studying their strain-dependence electrical resistance behavior.

For the preparation of composites, commercially available Biresin CR122 epoxy resin and CH122-5 hardener were used. MWCNTs (NC7000TM) with a diameter of 9.5 nm and an average length of 1.5 μm were used as the conductive filler. Composites with different content of MWCNTs were prepared by mixing pre-dispersed MWCNTs in hexane (using ultra-sound treatment) with epoxy resin. Then, a hardener was added to the epoxy dispersion with constant mechanical stirring. After that, prepared batch was poured into silicone molds, and cured for 12 h at room temperature. For complete curing, the obtained samples were heated at 80 $^{\circ}\text{C}$ for 2 hours.

Uniaxial tensile tests were carried out in accordance with ISO 527 on a Zwick universal testing machine with a load cell of 2.5 kN at a strain rate of 1 mm/min. Measurement of the electrical resistance of epoxy composites was performed by a two-probe method using an APPA505 True RMS multimeter connected to a computer (Fig. 1).



a – sample placed between grips, b – APPA 505 multimeter, c – areas of ohmic contacts,
d – video-extensometer is focused on the test specimen upon which contrasting targets (white dots) have been added

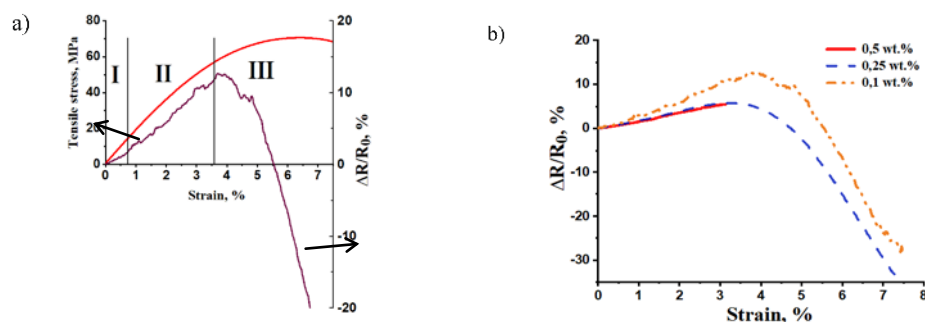
**Figure 1 – Scheme of experiment for electrical conductivity on the tensile strain dependence.
The associated software ensures the distance between targets is continuously measured during testing**

The electrical conductivity of the epoxy polymer in the absence of MWCNTs is very low (less than 10^{-9} S/m). The addition of MWCNTs leads to a significant increase in the electrical conductivity of the composite, which reaches a value of 4 S/m at a content of 2 wt. % MWCNTs in the epoxy matrix. Specific electrical conductivity of epoxy

composites containing 0.1 wt. %; 0.25 wt. % and 0.5 wt. % MWCNTs was 0.012; 0.14 and 0.60 S/m, respectively. It has been found that the percolation threshold for the composites prepared using pre-dispersion in hexane is 0.013 wt. %.

Fig. 2a demonstrates typical dynamics of relative resistance $\Delta R/R_0$ versus applied tensile strain for an epoxy resin-based composite filled with 0.1 wt. % MWCNTs. It can be seen that the electrical resistance under tension changes nonmonotonically, so three main areas can be distinguished on the curve. In region I (the region of elastic deformation), the resistance increases linearly from 0 % strain to ~0.7 %. Region II exhibits non-linear behavior and a stepwise increase in resistivity (damage detection stage). With a further increase in strain, the change in resistivity passes through the inflection point and reaches its maximum at ~3.7 % strain (region III). A further increase in strain above 4 % leads to an almost linear decrease in $\Delta R/R_0$ until the sample fails.

The tensile strength of bare epoxy resin is 70 MPa. The introduction of small amounts of carbon nanotubes (up to 0.1 wt. %) into the epoxy matrix does not lead to significant changes in the tensile strength, but a further increase in the amount of carbon additives significantly reduces the strength of the «MWCNTs-epoxy resin» composites.



a) the dependence of the strength and the relative resistance of an epoxy composite filled with 0.1 wt. % MWCNTs on the relative uniaxial strain; b) the dependence of the relative resistance of epoxy composites with different MWCNTs concentrations on the relative uniaxial strain

Figure 2

According to [2], a linear increase in resistance (region I) is caused by an increase in the distance between MWCNTs in the composite, as a result of sample stretching. In regions II and III, plastic deformation processes occur in the composite, leading to irreversible changes in the conductive network of the filler. However, during plastic deformation of composites, there is a balance between the restoration and destruction of the conductive network. On the one hand, inelastic deformation of the matrix can lead to rupture of the conducting networks. On the other hand, due to Poisson compression (a decrease in size in the transverse direction and an increase in length in the direction of tension), the MWCNTs are reoriented and aligned in the zone of high local deformation. Thus, the destruction of conducting networks of MWCNTs, which is expressed in an increase in resistance, is replaced by the formation of new contacts between MWCNTs. These effects lead to the appearance of an extremum on the curve « $\Delta R/R_0$ – deformation» and a subsequent decrease in resistance.

It was found that the tensile strength of composites is significantly affected by the concentration of the filler (Fig. 2b). For different resistance-strain curves, region I is very similar. At the same time, regions II and III differ significantly depending on the MWCNTs concentration. A sample containing 0.5 wt. % MWCNTs is more brittle compared to other composites and fails at ~3 % deformation without reaching region III. Composite containing 0.1 wt. % MWCNTs shows a more pronounced non-linear behavior (region II), and the change in resistance induced by strain of this composite is higher compared to other samples. Thus, a further increase in the concentration of MWCNTs leads to a decrease in the deformation sensitivity of epoxy-based composites, since a more developed conductive network of MWCNTs provides a smaller distance between particles during deformation. The higher sensitivity of the composite containing 0.1 wt % MWCNTs may be associated with the key role of the tunneling effect in the piezoresistive response.

Thereby, epoxy-based composites containing carbon nanotubes have been obtained. It has been established that the percolation threshold for the resulting composites is ~0.013 wt. % MWCNTs. The resulting composites demonstrate a nonlinear character of the change in resistance during uniaxial tension, which is explained by a change in deformation modes (elastic deformation is replaced by plastic one). It is shown that the piezoresistive response of «epoxy resin-MWCNT» composites depends on the content of carbon filler. Composite containing 0.1 wt. % MWCNTs, has a higher sensitivity compared to samples with a high content of filler. This fact is explained by the formation of a MWCNTs conductive network and its effect on the piezoresistive response of the composites.

References

1. Thostenson, E. T. Carbon nanotube network: sensing of distributed strain and damage for life prediction and self-healing / E. T. Thostenson, T. W. Chou // *Adv. Mater.* – 2006. – Vol. 18, № 23. – P. 2837–2841.

2. Strain-dependent electrical resistance of epoxy/MWCNT composite after hydrothermal aging / O. Starkova [et al.] // Compos. Sci. Technol. – 2005. – Vol. 117. – P. 107–113.

Получены полимерные композиты на основе эпоксидных смол с использованием многостенных углеродных нанотрубок в качестве наполнителя. Исследованы электрические и механические свойства, а также пьезорезистивный эффект полученных композитов. Порог перколяции для эпоксидного композита, наполненного нанотрубками, составляет ~0,013 мас. %. Пьезорезистивный отклик композитов зависит от содержания углеродных нанотрубок. Композиты, содержащие 0,1 мас. % углеродных нанотрубок, характеризуются более высокой чувствительностью к деформации по сравнению с образцами с более высоким содержанием наполнителя (0,25 мас. % и 0,5 мас. %).

Mazheika Semyon, Belarusian State University, Chemistry Faculty, Minsk, Republic of Belarus, mazheikosiem@gmail.com.

Maltanova Hanna, The Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus.

Ovodok Evgeniy, The Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus.

Poznyak Sergey, The Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus.

УДК 533.9.082.5;543.423;621.373.826

В. А. АКУЛИЧ, Н. А. ЛАПЦЕВИЧ, М. П. ПАТАПОВИЧ

ПРОЦЕСС НАПЫЛЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ТВЁРДУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Проведен анализ возможности напыления тонких пленок различных материалов на металлическую поверхность при воздействии мощных лазерных импульсов на поверхность мишени в атмосфере воздуха. Эксперименты проводились с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1. Проведено краткое обсуждение полученных результатов.

Для производства различных изделий можно использовать такой материал как медь в чистом виде и в виде сплавов с другими компонентами. Она меньше алюминия подвержена коррозии, следовательно, будет меньше реагировать с водой, что позволяет применять медные составляющие в системах домашнего отопления. Благодаря высокой теплопроводности, медь и ее сплавы могут быть использованы в теплообменниках и холодильных установках, а также для никелирования и хромирования стали.

Одним из инструментов современных технологий, позволяющих совершенствовать устройства квантовой электроники, является техника импульсного лазерного напыления. К достоинствам данного метода можно отнести его универсальность по отношению к материалам, возможность исключения посторонних примесей, гибкость данного метода и возможность контроля плёночных структур в процессе их роста. Кроме того, развитие технологии импульсного лазерного напыления невозможно без модернизации используемых методик и разработки новых [1, 2]. Следует также отметить, что для развития микроэлектроники требуется создание качественных нанопленок, в состав которых входит олово. Данный материал представляет собой пластичный, ковкий и легкоплавкий блестящий металл, который используется в основном как безопасное и нетоксичное покрытие как в чистом виде, так и в сплавах с другими металлами.

Для исследования возможностей напыления нанопорошки методом лазерной абляции с использованием сдвоенных импульсов в ходе проводимых экспериментов был задействован лазерный двухимпульсный спектрометр LSS-1 (производство совместного белорусско-японского предприятия «LOTIS ТП»), который предназначен для качественного, полуколичественного и количественного определения состава различных материалов посредством анализа эмиссионных спектров плазмы. Лазер может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц и максимальной энергией излучения каждого из сдвоенных импульсов до 80 мДж; длина волны составляет 1064 нм. Размер сфокусированного пятна был примерно 50 мкм [3]. На рис. 1 приведен фрагмент спектрометра (а) и внешний вид поверхности нанопленки олова, напыленной на стекло (б).

В ходе проведенных предварительных исследований были выбраны оптимальные режимы работы и длины волн аналитических линий: для меди – Cu (510.798 нм); для олова – Sn (452.56 нм).

Чтобы оценить результат воздействия сдвоенных лазерных импульсов на поверхность сплава, необходимо рассмотреть, как зависит интенсивность спектральных линий элементов от их количества и номера. В частности, на рис. 2 приведен послойный анализ исследования пленок олова, напыленных на поверхность меди. При этом энергия первого импульса составила 49 мДж, второго – 46 мДж, временной интервал между импульсами равнялся 10 мкс. Общее число последовательных сдвоенных импульсов в серии равнялось 250.

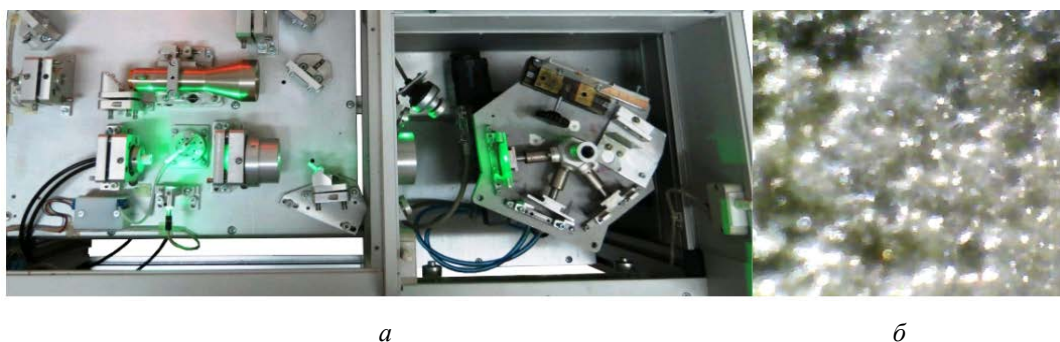


Рисунок 1 – Внешний вид рабочей части спектрометра (а) и полученной наноплёнки (б)

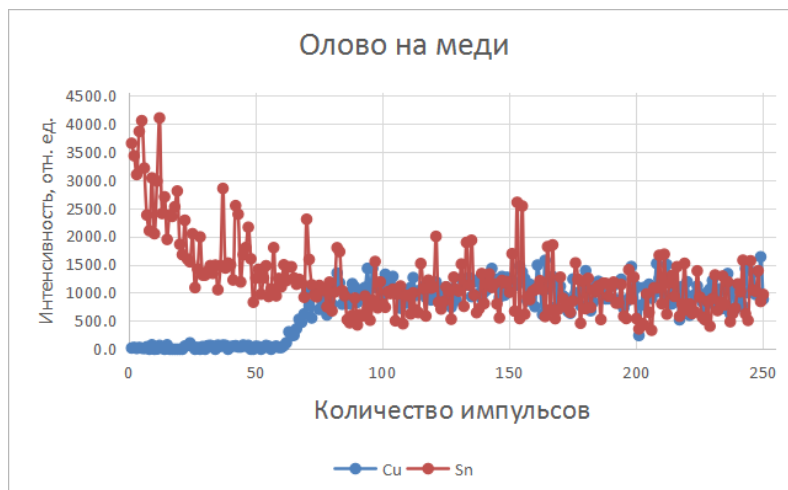


Рисунок 2 – Послойный анализ плёнки олова, напылённой на медную поверхность

Результаты проведенного эксперимента четко отражают, что линия меди начинает проявляться, т. е. имеет место пробой оловянной пленки, после 59-го импульса. Медь практически равномерно поступает в лазерный факел после образования полноценного канала, когда интенсивность линии становится примерно максимальной: после 68-го импульса. При этом олово также достаточно хорошо поступает в лазерный факел. Для сравнения, на рис. 3 приведен результат напыления пленки из меди на поверхность олова при тех же условиях эксперимента.



Рисунок 3 – Послойный анализ плёнки меди, полученной на поверхности олова

Данный рисунок отражает тот факт, что медная пленка начинает пробиваться с 72-го импульса, а олово начинает себя проявлять только после 120 импульсов.

Таким образом, проведенные спектроскопические исследования тонкопленочных покрытий, как олова, напыленного на поверхность меди, так и меди, напыленного на олово, показали, что использование двоек лазерных импульсов позволяет проводить лазерное напыление тонких пленок непосредственно в воздухе. Это снижает негативное воздействие окружающей атмосферы на процессы осаждения до приемлемого уровня.

Список литературы

1. Атомно-эмиссионный многоканальный спектральный анализ: научное и практическое применение / Е. С. Воропай [и др.] // Вестн. Бел. гос. ун-та. Сер. 1. – 2009. – № 1. – С. 14–20.
2. Laser-induced vaporization of a metal surface / M. Aden [et al.] // J. of Physics. D, Appl. Physics. – 1992. – Vol. 25, № 1. – P. 57–65.
3. Ермалицкая, К. Ф. Исследование влияния третьих элементов на интенсивность линий в спектрах сплавов на основе меди при искровом возбуждении / К. Ф. Ермалицкая // Вестн. Бел. гос. ун-та. Сер. 1. – 2007. – № 2. – С. 31–34.

The possibility of deposition the nanofilms of chemical elements on the surface of various materials under the action of high-power laser pulses in air is experimentally shown. The experiments were performed using laser double-pulse atomic emission spectrometer LSS-1. The obtained results have been summarized.

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

Лапцевич Никита Александрович, студент 3 курса уровня высшего образования факультета электросвязи Белорусской государственной академии связи, Минск, Республика Беларусь.

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

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

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

УДК 621.373.826

С. Н. АНУЧИН, А. А. СМЕРТИНА

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСА ВКЛЮЧЕНИЯ ФЕНАЛЕМИНА 160 С β -ЦИКЛОДЕКСТРИНОМ

Одной из проблем, ограничивающих сферу практических применений лазеров на красителях, является фотораспад их молекул и, как следствие, недостаточный ресурс работы активных сред. Особенно это актуально для лазеров на красителях с ламповой накачкой, где в излучении накачки присутствует жесткое УФ-излучение. Под воздействием излучения накачки органические молекулы участвуют в фотохимических реакциях, в результате которых образуются фотопродукты, вносящие потери в области усиления активной среды.

Реализация возможностей практического применения лазеров на красителях связана с дальнейшим улучшением их параметров, определяемых характеристиками растворов красителей. Вода, является предпочтительным растворителем, обладая при возбуждении наименьшими термооптическими искажениями, что отражается на пространственно-угловых характеристиках генерации. Однако в чистых водных растворах происходит димеризация и агрегация молекул красителей, что резко снижает КПД генерации. Для устранения эффекта агрегации и димеризации необходимо защитить молекулы красителя от воды, снизить потери на триплет-триплетное поглощение и ингибировать фотохимические реакции при УФ возбуждении [1]. Перспективными добавками для этого являются циклодекстрины, молекулы которых имеют тороидальную форму и полость, в которую могут внедряться молекулы красителя [2]. При правильном подборе геометрических размеров молекул красителя и полости циклодекстрина можно сформировать в растворе комплексы включения типа «гость – хозяин», позволяющие полностью защитить лазерный краситель от нежелательного воздействия растворителя, молекулярного кислорода и УФ-излучения накачки. Молекулы циклодекстрина могут взаимодействовать с молекулами красителя как во внутренней гидрофобной полости, образуя комплексы включения, так и по внешней гидрофильной сфере образуя ассоциативные комплексы за счет межмолекулярных водородных связей.

Циклодекстрины, формируя комплексы включения с органическими молекулами, могут менять их фундаментальные оптические свойства. В этой связи, создание высокоэффективных активных сред перестраиваемых лазеров на основе комплексов включения с циклодекстринами представляет большой научный и практический интерес.

Объектом исследования является комплекс включения феналемина 160 с β -циклодекстрином. Синтез комплекса включения красителя с β -CD осуществлялся в соответствии с методом сорастирания, описанным в [2].

На рисунке 1 представлены спектры поглощения крезил фиолета в этаноле и комплекса включения с β -циклодекстрином в водно-этанольном растворе [3–5].

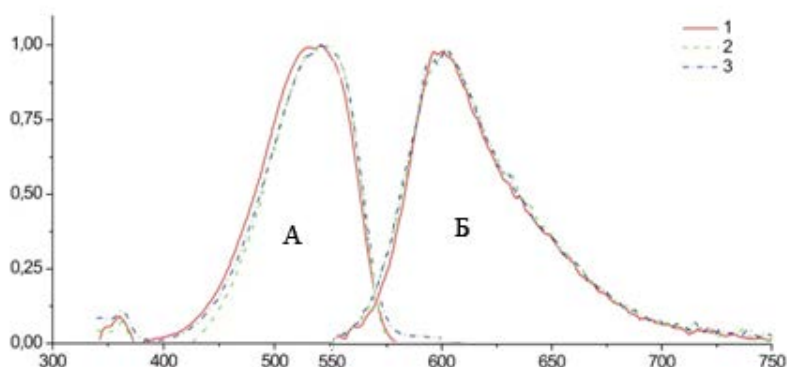


Рисунок 1 – Спектры поглощения (А), флуоресценции (Б) феналемина 160 в водно-этанольном растворе (1); с β -CD в соотношении 1:1 (2); с β -CD в соотношении 1:5 (3)

Как видно из рисунка 1, при образовании комплекса включения наблюдается слабое батохромное смещение спектра поглощения и флуоресценции (до 5 нм) по сравнению с исходным красителем.

На рисунке 2 приведен ИК-спектр поглощения феналемина 160, его комплекса включения и β -CD. Как видно, в спектре комплекса включения феналемина 160 появляются новые полосы при частотах 1020 см^{-1} и 2906 см^{-1} , характерные для β -CD. При этом в спектре КВ наблюдается снижение интенсивности всех полос. Полосы, соответствующие феналемину 160 в спектре комплекса включения испытывают как гипсохромное, так и длинноволновое смещение относительно своего исходного положения. Наиболее значительное высокочастотное смещение присуще полосе при 3165 см^{-1} ($+23\text{ см}^{-1}$), соответствующей колебаниям аминогруппы. Для полосы 2994 см^{-1} наблюдается обратное батохромное смещение на -88 см^{-1} , связанное с валентными колебаниями феналеминового ядра. Наблюдаемое высокочастотное смещение указанных полос валентных колебаний может быть обусловлено межмолекулярным взаимодействием с β -CD, вследствие образования водородных связей с внешней оболочкой CD. Значительное снижение частот валентных колебаний феналеминового ядра может свидетельствовать о встраивании его части в полость молекулы циклодекстрина.

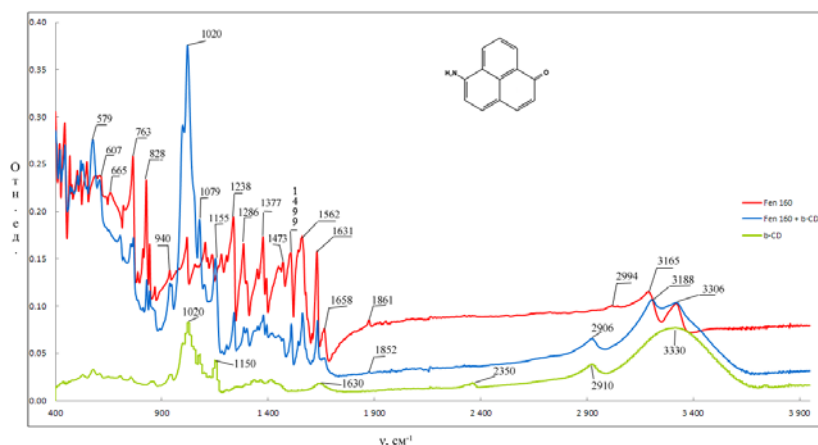


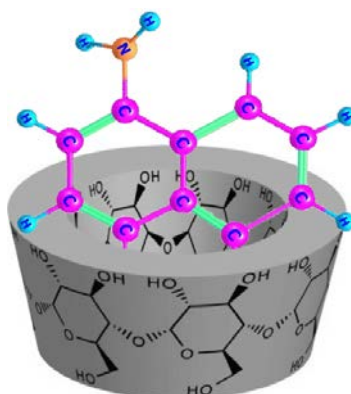
Рисунок 2 – ИК-спектр поглощения феналемина 160, β -CD и его комплекса включения

Колебания карбонильной группы феналемина 160 (1861 см^{-1}) затухают, что может быть связано с её встраиванием в полость β -CD и экранировкой (таблица 1).

Полное вхождение молекулы феналемина 160 в полость β -CD ограничено стерическими факторами из-за больших размеров феналеминового ядра. Поэтому комплексообразование может происходить за счёт частичного встраивания карбонильной группы с частью ядра молекулы красителя в полость циклодекстрина и образованием водородных связей между аминогруппой с внешней гидрофильной сферой β -CD. Это подтверждается также малым смещением спектра поглощения (рисунок 1А). Поэтому наиболее вероятной моделью КВ феналемина 160 с β -CD может являться комплекс, представленный на рисунке 3.

Таблица 1 – Отнесение колебаний полос ИК спектра фенолемина 160 и его комплекса включения с β -CD [6]

Fen 160 эксперимент	Частота ν , см^{-1}		Отнесения колебаний
	Fen 160 теория	Fen 160+ β -CD	
3306	3500-3300	3306	Валентные колебания О-Н (гидратированные соли)
3165	3500-3000	3188	Валентные колебания N-H
2994	3000	2906	Валентные колебания С-Н
1861	1800	1852	Валентные колебания С=О
1658	1650	1665	Валентные колебания С=О
1631	1650	1640	Валентные колебания С=C
1562	1560	1569	Деформационные внеплоскостные колебания ароматического кольца
1499	1500	1509	Симметричные валентные колебания =C-H
1473	1450	1466	Ножничные колебания =C-H
1452	1450	1455	Ножничные колебания =C-H
1371	1300	1377	Колебания колец (ядро)
1286	1250-800	1281, 1289	Колебания колец (ядро)
1238	1250-800	1244	Колебания колец (ядро)
1170	1250-800	1150	Асимметричные колебания колец (ядро)
1165	1250-800	1155	Асимметричные колебания колец (ядро)
1016	1100-600	1020	Деформационные внеплоскостные колебания =C-H
940	940	934	Колебания колец производных бензола (C=C-C=O)
828	820	831	Валентные внеплоскостные колебания -C-N-
763	1100-600	764	Деформационные внеплоскостные колебания =C-H
607	700-600	609	Деформационные слабые колебания \equiv C-H
	700-600	579	Деформационные слабые колебания \equiv C-H

Рисунок 3 – Вероятная 3D модель комплекса включения фенолемина 160 с β -CD

Список литературы

1. Лазеры на красителях / под ред. Ф. П. Шефера ; пер. с англ. – М. : Мир, 1976. – 360 с.
2. Методы получения наноконплексов биологически активных веществ с циклическими олигосахаридами, анализ их физико-химических свойств и использование в пищевом производстве / М. А. Капустин [и др.] // Труды БГУ-2016. – Т. 11, ч. 1. – Минск : Изд-во БГУ, 2016. – С. 73–100.
3. Смолич, П. А. Спектральные свойства комплекса включения крезил фиолета с β -циклодекстрином / П. А. Смолич, С. Н. Анучин // Физика конденсированного состояния : материалы XXVIII междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 17 апр. 2020 г. / Гродн. гос. ун-т им. Янки Купалы ; гл. ред. А. Е. Герман ; редкол.: В. А. Лиопо [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2020. – С. 101–103.
4. Brackmann, Ulrich. Lambdachrome. Laser Dyes / Ulrich Brackmann // Lambda Physik AG D-37079, Goettingen, Germany, 3rd Edition, 2000. – 294 p.
5. Sabadini, E. Solubility of cyclomaltooligosaccharides (cyclodextrins) in H₂O and D₂O: a comparative study / E. Sabadini, T. Cosgrove, F. D. C. Egidio // Carbohydrate Research. – 2006. – Vol. 341, № 2. – P. 270–274.
6. Справочные таблицы основных спектроскопических данных (ИК-, УФ-, ЯМР-спектроскопия и масс-спектрометрия) // КОХ ХФ. – Минск : БГУ, 2001. – 44 с.

One of the problems limiting the scope of practical applications of dye lasers is the photodisintegration of their molecules and, as a result, the insufficient life of active media. This is especially true for lamp-dye dye lasers, where hard UV radiation is present in the pump radiation. Under the influence of pump radiation, organic molecules participate in photochemical reactions, resulting in the formation photo products, introducing losses in the amplification region of the active medium.

Анучин Сергей Николаевич, зав. лабораторией, физико-технический факультет, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, anuchin_sn@grsu.by.

Смертина Алеся Александровна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, Smertina_AA_18@student.grsu.by.

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

УДК 535.371

И. П. БЕЛОВ

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА БЕНЗТИАЗОЛОВОГО КРАСИТЕЛЯ

Исследованы спектры поглощения и флуоресценции нового бензтиазолового красителя Th-C9 в растворителях различной полярности и вязкости. Показано, что квантовый выход флуоресценции имеет сильную зависимость от вязкости растворителя, что позволяет отнести его к классу флуоресцентных молекулярных роторов. Сделан вывод о том, что новый краситель может быть полезным флуоресцентным маркером для исследования процессов образования амилоидных фибрилл и агрегации белков.

Флуоресцентные методы исследования обладают исключительно высокой чувствительностью и дают уникальные возможности изучения возбуждённых состояний молекул, фотохимических реакций, динамики быстрых молекулярных процессов, структуры и свойств сложных химических и биологических объектов. При этом используется свечение красителей – флуоресцентных маркеров, спектральные свойства которых зависят от свойств микроокружения [1].

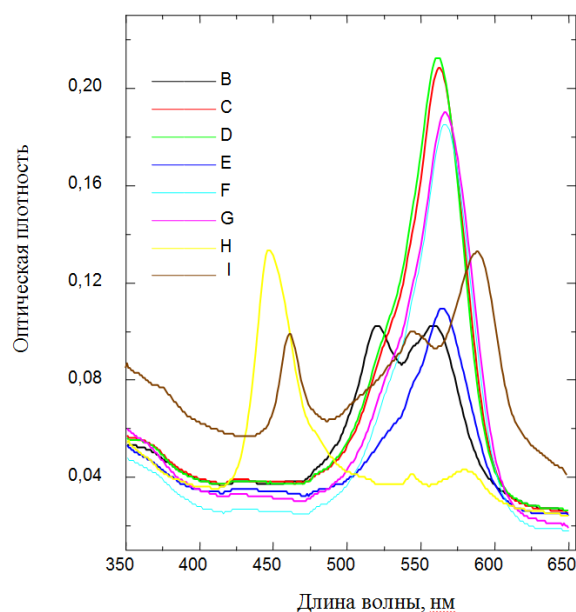
Перспективными флуоресцентными маркерами для исследования биополимеров являются молекулярные роторы [2]. Термин «молекулярные роторы» относится к соединениям, молекулы которых состоят из двух или более фрагментов, способных вращаться друг относительно друга. Внутримолекулярное вращение в них осуществляется при внешнем воздействии (света, электрического поля, потока жидкости и т. д.). Среди многообразия молекулярных роторов имеется группа соединений, молекулы которых при электронном возбуждении способны переходить в скрученное состояние в результате переноса заряда и последующего вращения одной части молекулы относительно другой. Эту зависимость используют для измерения изменений локальной вязкости, в том числе в клетках живых организмов, поскольку интенсивность флуоресценции и квантовый выход зависят от вязкости растворителя и жесткости микроокружения, в котором находится молекула красителя [2].

В биомедицинских исследованиях для детекции упорядоченных белковых водонерастворимых агрегатов, амилоидных фибрилл, широко используется бензтиазоловый краситель – тиофлавин Т. Тиофлавин Т является молекулярным ротором [3]. Особенностью его флуоресценции является то, что в водном растворе он практически не флуоресцирует, однако при встраивании в структуру амилоидных фибрилл квантовый выход его флуоресценции увеличивается на три порядка. Несмотря на высокую чувствительность к вязкости и жесткости микроокружения данный краситель обладает существенным недостатком – он характеризуется флуоресценцией в сине-зеленой области спектра, где имеется значительное поглощение биологических тканей. Это затрудняет использование тиофлавина Т для проведения исследований биологического материала. В связи с этим, актуальными являются работы, направленные на создание и исследование новых флуоресцентных маркеров, обладающих свойствами молекулярных роторов и имеющих поглощение и флуоресценцию в красной области спектра [4].

В данной работе приводятся результаты спектрально-люминесцентных исследований нового бензтиазолового красителя Th-C9. У молекулы Th-C9, в отличие от тиофлавина Т, более длинная цепь п-сопряжения и ароматические фрагменты имеют большие геометрические размеры, что затрудняет их вращение. Спектры поглощения красителя в различных растворителях представлены на рисунке 1. Видно, что в спиртовых растворах, ДМСО и глицерине спектр имеет максимум поглощения, соответствующий длине волны ~560 нм. В водном растворе длинноволновый максимум испытывает незначительный гипсохромный сдвиг ~5 нм. Кроме того, в спектре появляется дополнительно коротковолновая полоса в области 515 нм. В диоксане, являющемся наименее полярным растворителем, длинноволновый максимум имеет гипсохромный сдвиг, составляющий примерно 15 нм. Одновременно появляется интенсивный коротковолновый максимум на 450 нм.

Коротковолновый сдвиг спектра поглощения в полярных растворителях характерен для многих исследованных бензтиазоловых красителей [5] и объясняется как результат стабилизации основного состояния вследствие диполь-дипольных взаимодействий хромофора с полярным окружением.

Причиной появления коротковолновой полосы поглощения в водном растворителе по всей вероятности является агрегация молекул красителя. Агрегация молекул в водных растворах характерна для большинства исследованных бензтиазоловых красителей [4, 6]. Показано, что при агрегации образуются димеры и более сложные агрегаты, обладающие более коротковолновым положением спектра поглощения по сравнению с мономерами. Мы предполагаем, что и в нашем случае причиной наблюдаемых изменений спектров поглощения является агрегация красителя. Подтверждением тому может служить рисунок 2, где представлены спектры красителя в водном растворе при изменении его концентрации от $2,4 \cdot 10^{-5}$ до $2,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Видно, что увеличение концентрации красителя приводит к трансформации спектра, причем в коротковолновой области появляются, по крайней мере, два максимума: на ~ 518 и ~ 590 нм. Наши опыты показали, что агрегация не наблюдается в спиртовых растворах даже при микромолярной концентрации красителя.



В – вода, С – этанол, D – метанол, E – 1-пентанол, F – глицерин, G – ДМСО, H – диоксан, I – амилоидные фибриллы

Рисунок 1 – Спектры поглощения Th-C9 в различных растворителях и при встраивании в амилоидные фибриллы

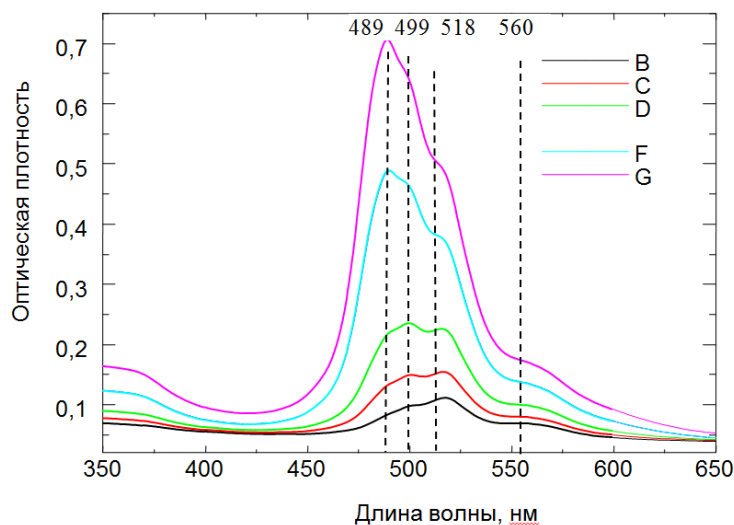


Рисунок 2 – Спектры поглощения Th-C9 в воде. Концентрация красителя 2,4; 4,8; 9,1; 18; 20,4 и 25 ммоль/л

Основные спектральные характеристики нового красителя приведены в таблице. Из таблицы видно, полярность растворителя (величина ϵ) влияет на положение спектра поглощения и флуоресценции. Квантовый выход флуоресценции красителя от полярности растворителя практически не зависит, при этом наблюдается сильная зависимость квантового выхода от вязкости растворителя (величины η). Так в глицерине имеющем вязкость 1000 мПа·с квантовый выход флуоресценции увеличивается в 62 раза по сравнению с водным раствором. Полученные результаты показывают, новый краситель имеет сильную зависимость квантового выхода флуоресценции от вязкости растворителя и, следовательно, может быть отнесен к классу флуоресцентных молекулярных роторов. Это позволяет надеяться на то, что он может быть полезным красителем для исследования процессов образования амилоидных фибрилл и агрегации белков.

Таблица – Спектральные свойства Th-C9 в различных растворителях

№ п/п	Растворитель	ϵ	Вязкость, η , мПа·с	$\lambda_{\text{погл}}$, нм	$\lambda_{\text{фл}}$, нм	Относительный квантовый выход флуоресценции
1.	Вода	78,3	1,0	565	587	1
2.	Этанол	24,3	1.057	561	595	4,3
3.	Метанол	32,7	0.539	561	592	2,1
4.	1-Пентанол	15,4	8,5	565	595	7,8
5.	Глицерин	60	1200	567	593	62
6.	ДМСО	47	2,0	566	599	7,2
7.	Диоксан	2,0	1,1		594	2,1

Список литературы

1. Лакович, Дж. Основы флуоресцентной спектроскопии / Дж. Лакович. – М. : Мир, 1986. – Т. 55, № 6.
2. Ужинов, Б. М. Молекулярные роторы – люминесцентные сенсоры локальной вязкости и вязкого течения в растворах и организованных системах / Б. М. Ужинов, В. Л. Иванов, М. Я. Мельников // Журнал Российской академии наук. – 2011. – № 5.
3. Thioflavin T as a Molecular Rotor: Fluorescent Properties of Thioflavin T in Solvents with Different Viscosity / V. I. Stsiapura [et al.] // Journal Physical Chemistry. B. – 2008. – Vol. 112, No. 49. – P. 15893–15902.
4. Маскевич, А. А. Спектральные свойства бензтиазолового красителя, модифицированного полиэтиленгликолем / А. А. Маскевич // Журнал прикладной спектроскопии. – 2021. – Т. 88, № 6. – С. 852–857.
5. Маскевич, А. А. Флуоресцентные свойства анионного производного тиюфлавина Т / А. А. Маскевич // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2021. – № 2. – С. 4–14.
6. Aggregation of thioflavin T and its new derivative in the presence of anionic polyelectrolyte / A. V. Lavysh [et al.] // Biointerface Research in Applied Chemistry. – 2016. – Vol. 6, Iss. 5. – P. 1525–1530.
7. Левшин, Л. В. Люминесценция и её измерения: Молекулярная люминесценция / Л. В. Левшин, А. М. Салецкий. – М. : МГУ, 1989. – 272 с.

The absorption and fluorescence spectra of a new benzthiazole dye Th-C9 were studied in solvents of various polarities and viscosities. It is shown that the fluorescence quantum yield has a strong dependence on the viscosity of the solvent, which makes it possible to attribute it to the class of fluorescent molecular rotors. It is concluded that this allows us to hope that the new dye can be a useful fluorescent marker for studying the processes of amyloid fibril formation and protein aggregation.

Белов Иван Павлович, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, belov_ip@grsu.by.

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

УДК 538.911

М. М. БЕЛОВ

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ ГЕЛИЯ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ТВЁРДОГО РАСТВОРА НА ОСНОВЕ V-Nb-Ta-Ti

Исследовано влияние облучения ионами He^{2+} на структурно-фазовое состояние многокомпонентного твердого раствора на основе системы V-Nb-Ta-Ti. Показано, что сплав VNbTaTi является высокоэнтропийным и обнаруживает большее значение деформации кристаллической решетки после облучения по сравнению с чистым ванадием. Предложен возможный механизм радиационной стойкости высокоэнтропийного сплава.

Развитие атомной энергетики в мире предъявляет повышенные требования к используемым конструкционным материалам, технологии их производства и контролю работоспособности. Под действием облучения данные материалы испытывают структурно-фазовые превращения, оказывающие отрицательное влияние в первую очередь на механические свойства. Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) на основе однофазного твердого раствора и большого числа (более пяти) основных элементов в эквимольных или почти эквимольных отношениях являются перспективным для получения радиационно-стойких материалов для атомной энергетики. Считается, что максимизация конфигурационной энтропии ВЭС способствует формированию однофазного разупорядоченного твердого раствора вместо выпадения сложных интерметаллидных или вторых фаз, в результате чего сплав имеет простую микроструктуру с улучшенными свойствами по сравнению с традиционными сплавами [1]. Многочисленные исследования показали, что ВЭС обладают высокими пределом упругости, усталостной прочностью, термической и коррозионной стойкостью, сопротивлением ползучести, радиационной стойкостью. Свойства данных сплавов связывают с четырьмя основными эффектами: высокой энтропией, большой деформацией решетки, многоэлементностью состава и замедленной диффузией [2].

Многокомпонентные твердые растворы на основе системы V-Ti-Nb-Ta были синтезированы с использованием металлов высокой чистоты (>99,9 %) методом дуговой плавки с последующей гомогенизацией. Далее проводился отжиг на протяжении 24 ч и 72 ч при температуре 1150 °C с промежуточной холодной прокаткой до 85 % сокращения толщины. Образцы облучались при комнатной температуре ионами He²⁺ с энергией 40 кэВ и флюенсом 2×10^{17} см⁻².

Фазовый состав образца изучался методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре Rigaku Ultima IV с использованием медного излучения ($\lambda = 0,15418$ нм). Для исследования воздействия имплантированного гелия на приповерхностный слой, съемка образцов производилась при малом фиксированном угле падения рентгеновских лучей (1°).

Расчет энергетических потерь был проведен в программе SRIM 2013, используя модель Кинчина-Пиза. Пороговые энергии смещения для элементов V, Nb, Ta, Ti соответственно равны 40, 78, 91 и 30 эВ [3]. На рисунке 1 представлены профили распределения имплантированных ионов He²⁺ и результаты моделирования радиационного повреждения (измеряемого в смещении на атом, сна). Максимальный пробег ионов гелия составил 275–325 нм с максимумом повреждений для ванадия на глубине 160–170 нм, а для сплава VNbTaTi – 120–140 нм. Наибольшее значение повреждающей дозы составляет 3,5–6,5 сна, в зависимости от образцов. Концентрация имплантированных ионов He²⁺ не превышает 17–23 %.

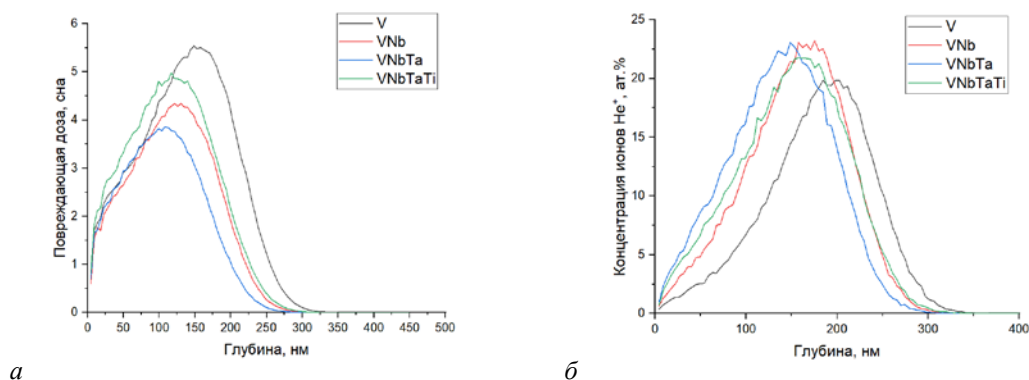


Рисунок 1 – Профили распределения ионов He²⁺ (а) и повреждающей дозы (б) в образцах V, VNb, VNbTa и VNbTaTi по глубине

На рисунке 2 представлены дифрактограммы, полученные методом РСА, для необлученных образцов. Общий вид представленных дифрактограмм (узкие и интенсивные дифракционные пики) свидетельствует о высокой степени кристалличности сплавов. Видно, что во всех многокомпонентных твердых растворах на основе системы V-Nb-Ta-Ti формируется однофазный твердый раствор с ОЦК-решеткой. Параметр решетки для образцов V, VNb, VNbTa, VNbTaTi составил 0,3027 нм, 0,3177 нм, 0,3227 нм и 0,3234 нм, соответственно. Увеличение параметра решетки согласуется с увеличением среднего атомного радиуса твердых растворов.

На рисунке 3 показаны дифрактограммы образцов, облученных ионами гелия. Фазовый состав системы сохранился, однако наблюдается более выраженная асимметрия пиков и их смещение в сторону меньших углов, что указывает на деформацию кристаллической решетки, вызванную облучением.

Для количественной оценки влияния радиационного повреждения на структуру образцов было рассчитано относительное изменение параметра решетки (деформация решетки) и ее объема, относительно необлученных образцов, как показано на рисунке 4а.

Как видно из рисунка, с увеличением числа элементов в сплаве, деформация и относительный объем кристаллической решетки увеличиваются. При этом с увеличением сложности состава сплавов наклон данной зависимости становится менее пологий. Кроме того, на рисунке 4б показаны значения микродеформации для исходных и облученных образцов на основе системы V-Nb-Ta-Ti, где следует отметить увеличение микронапряжений в более сложных системах, как в исходных образцах, так и в облученных ионами гелия.

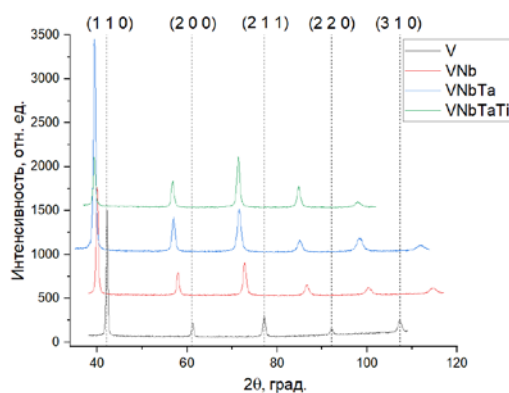


Рисунок 2 – Рентгеновские дифрактограммы исходных образцов системы V-Nb-Ta-Ti

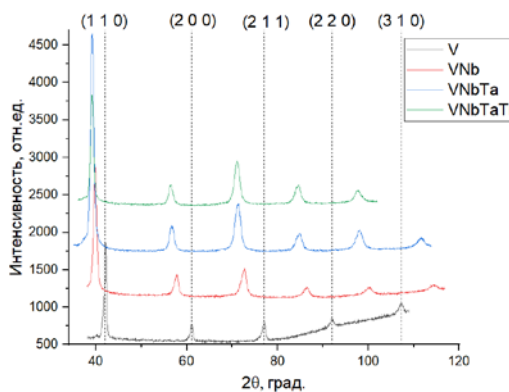


Рисунок 3 – Рентгеновские дифрактограммы образцов системы V-Nb-Ta-Ti, облученных ионами He^{2+} с энергией 40 кэВ

Можно предположить, что в многокомпонентных твердых растворах на основе V-Nb-Ta-Ti с ростом сложности состава происходит уменьшение подвижности точечных радиационных дефектов и усиление их рекомбинации. Это приводит к подавлению роста гелиево-вакансионных кластеров [4, 5] и как следствие гелиевых пузырей, уменьшая их размер и увеличивая плотность. Это приводит к росту уровня напряжений в многокомпонентных сплавах [6].

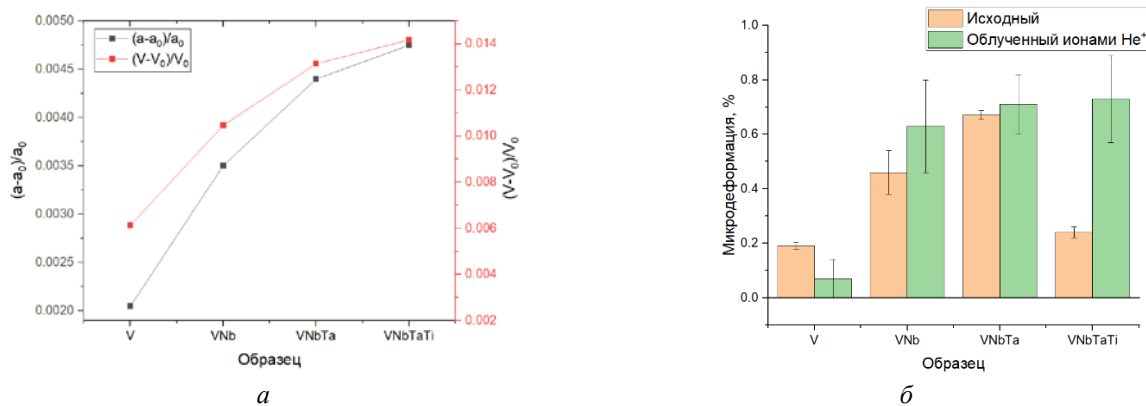


Рисунок 4 – Относительное изменение параметра и объема кристаллической решетки для системы V-Nb-Ta-Ti, облученной ионами He^{2+} с энергией 40 кэВ (а) и значения микронапряжений (напряжений второго рода) от сложности состава системы V-Nb-Ta-Ti для исходных и облученных образцов (б)

Таким образом, фазовый состав многокомпонентного твердого раствора на основе V-Nb-Ta-Ti является устойчивым к облучению ионами гелия с энергией 40 кэВ и флюенсом $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Было показано, что после облучения многокомпонентные твердые растворы имеют большую деформацию по сравнению с однокомпонентными. Было предложено, что увеличения числа элементов в системе V-Nb-Ta-Ti снижает подвижность дефектов, созданных облучением, что приводит к образованию более мелких кластеров и повышению микродеформации.

Список литературы

1. Tsai, M. H. High-Entropy Alloys: A Critical Review / M. H. Tsai, J. W. Yeh // Mater Res Lett. – 2014. – Vol. 2. – P. 107–123.
2. Microstructures and properties of high-entropy alloys / Zhang, Y. [et al.] // Progress in Materials Science. – 2014. – Vol. 61. – P. 1–93.
3. Helium bubble formation in refractory single-phase concentrated solid solution alloys under MeV He ion irradiation / N. Jia [et al.] // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 2021. – Vol. 550. – 152937.
4. On the existence and origin of sluggish diffusion in chemically disordered concentrated alloys / N. Yuri [et al.] // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 2018. – Vol. 22. – P. 65–74.
5. Evolution of irradiation-induced strain in an equiatomic NiFe alloy / W. Ullah Mohammad [et al.] // Scripta Mater. – 2017. – Vol. 140. – P. 35–39.
6. Effect of electronic energy dissipation on strain relaxation in irradiated concentrated solid solution alloys / Neila Sellami [et al.] // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 2019. – Vol. 23. – P. 107–115.

The effect of irradiation with He^{2+} ions on the structural-phase state of a multicomponent solid solution based on the V-Nb-Ta-Ti system has been studied. It is shown that the VNbTaTi alloy is high-entropy and exhibits a higher crystal lattice deformation after irradiation compared to pure vanadium. A possible mechanism for the radiation resistance of a high-entropy alloy is proposed.

Белов Михаил Михайлович, студент 4 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, mb17023@gmail.com.

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

УДК 541.15

Д. И. БОГДЕВИЧ

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОНКУЮ СТРУКТУРУ АЛКИДНЫХ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Представлены результаты исследования влияния ультрафиолетового излучения на степень кристалличности алкидных лакокрасочных покрытий. Покрытия отверждались под действием ультрафиолетового излучения (207 нм). Выявлено влияние УФ-излучения на степень кристалличности алкидных лакокрасочных покрытий. Показано, что отверждение при воздействии УФ-излучения приводит к увеличению степени кристалличности алкидных лакокрасочных покрытий.

Способ отверждения покрытий ультрафиолетовым излучением получил промышленное развитие в конце 60-х годов прошлого века и в настоящее время считается одним из наиболее перспективных благодаря ряду неоспоримых достоинств: относительно высокой производительности, малым затратам энергии, несложности технологического оборудования [1].

Способ используют главным образом при получении покрытий из материалов способных отверждаться за счет реакции полимеризации. Принцип отверждения основан на способности ультрафиолетовых лучей инициировать реакцию полимеризации олигомерных материалов.

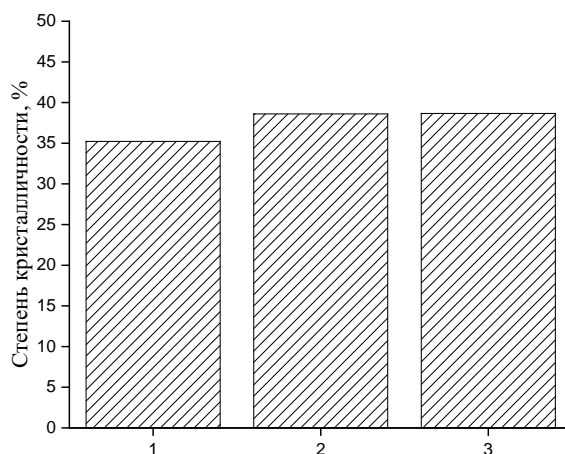
За счет того, что в составе алкидных лакокрасочных материалах имеются органические растворители, эти краски отличаются высокой адгезией к любым поверхностям. При этом покрытие имеет не только защитную функцию, но также может остановить коррозионные процессы, которые уже начались [2, 3]. Так в частности, в работе [3] представлены данные по влиянию ультрафиолетового излучения на коррозионную стойкость покрытий на основе алкидных лакокрасочных материалов. Показано, что отверждение лакокрасочных материалов при воздействии УФ-излучения приводит к увеличению коррозионной стойкости алкидных лакокрасочных покрытий [3]. Выяснено, что микротвердость алкидных лакокрасочных покрытий, отвержденных при воздействии УФ-излучения, увеличивается с увеличением времени отверждения УФ-излучением.

Целью данной работы было исследование влияния ультрафиолетового излучения на степень кристалличности алкидных лакокрасочных покрытий.

В качестве объектов исследования использовалась алкидная краска марки ПФ-115, которая наносилась ровным слоем на сталь 08 кп, а затем отверждалась при воздействии ультрафиолетового излучения. Источником излучения служила эксимерная лампа на основе газовой смеси криптон-бром (KrBr), барьерного разряда, с максимумов спектра излучения 207 нм. Плотность мощности излучения – не менее 5 мВт/см². Покрытия отверждались в течение 5 и 15 мин.

Для оценки влияния ультрафиолетового излучения на тонкую структуру алкидных лакокрасочных покрытий методом рентгеноструктурного анализа были проведены экспериментальные исследования степени кристалличности. Исследования проводились на дифрактометре ДРОН 3М в CuK α излучении.

Степень кристалличности алкидных лакокрасочных покрытий отвержденных при естественных условиях ниже, чем степень кристалличности покрытий, отвержденных при воздействии УФ-излучения. Результаты исследования показаны на рисунке 1.



1 – отверждение при естественных условиях; 2 – отверждение УФ-излучением в течение 5 мин.; 3 – отверждение УФ-излучением в течение 15 мин.

Рисунок 1 – Зависимость степени кристалличности от времени отверждения УФ-излучением

Таким образом, было проведено исследование влияния ультрафиолетового излучения на степень кристалличности алкидных лакокрасочных покрытий. Выяснено, что отверждение покрытий на основе алкидной краски марки ПФ-115 при воздействии УФ-излучения приводит к увеличению степени кристалличности алкидных лакокрасочных покрытий. Так, в частности, степень кристалличности покрытия, отвержденного при естественных условиях, равна 35,23 %, а степень кристалличности покрытия, отвержденного при воздействии УФ-излучения в течение 15 мин., составляет 38,60 %. Эти особенности увеличения степени кристалличности указывают на уменьшение аморфности алкидных лакокрасочных покрытий и увеличение полимеризации.

Список литературы

1. Бабкин, О. Е. Полимерные покрытия УФ-отверждения : учеб. пособие / О. Е. Бабкин. – СПб. : Изд-во СПбГУКиТ, 2012. – 47 с.
2. Рагожкин, Н. С. Влияние термической обработки на коррозионную стойкость покрытий на основе вододисперсионных лакокрасочных материалов / Н. С. Рагожкин, Д. И. Богдевич, Н. Г. Валько // Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения : материалы V междунар. науч. конф. молодых ученых, Гродно, 19 нояб. 2021 г. / ГрГУ им. Янки Купалы ; редкол.: А. С. Воронцов (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2021. – С. 3–8.
3. Валько, Н. Г. Влияние ультрафиолетового излучения на коррозионную стойкость покрытий на основе алкидных лакокрасочных материалов / Н. Г. Валько, Д. И. Богдевич, А. В. Касперович // Технология органических веществ : материалы 86-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 31 янв. – 12 февр. 2022 г. / Белорус. гос. техн. ун-т ; редкол.: И. В. Войтов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2022. – С. 233–235.

The results of the study of the effect of ultraviolet radiation on the degree of crystallinity of alkyd coatings are presented. The coatings were cured under the action of ultraviolet radiation (207 nm). The influence of UV radiation on the degree of crystallinity of alkyd coatings has been revealed. It is shown that curing under the influence of UV radiation leads to an increase in the degree of crystallinity of alkyd coatings.

Богдевич Дарья Ивановна, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь dachamaxacha2000@gmail.com.

Научный руководитель – *Валько Наталья Георгиевна*, кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель декана физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, n.valko@grsu.by.

И. С. ВЕРЕМЕЙ

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЁНОК ZrN/a-ZrCu , ОБЛУЧЁННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

Работа посвящена исследованию микроструктуры многослойных пленок, состоящих из нанокристаллического нитрида циркония и аморфного сплава на основе циркония и меди ZrN/a-ZrCu с разной концентрацией меди $C_{\text{Cu}} = 44,6\text{--}73,8$ ат. %, облученных при комнатной температуре ионами гелия с энергией 40 кэВ и дозой до $1,1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Пленки ZrN/a-ZrCu осаждались методом магнетронного осаждения в вакуумной камере на Si подложке при температуре 300 °С. Толщина индивидуального слоя ZrN составляет 5 нм. Аморфный слой, являющийся хорошим поглотителем радиационных дефектов, напылялся с двумя толщинами 5 и 10 нм. Установлено, что облучение ионами гелия многослойной системы приводит к радиационно-индуцированному распуханию и росту зерен, и эволюции внутренних напряжений.

Методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV исследован фазовый состав, микро и макро напряжения в многослойных пленках. Съемка проводилась под углом 5°, чтобы устранить отражения монокристаллической подложки. Микроструктура пленок исследовалась методом высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (ВРПЭМ).

На рисунке 1 показаны рентгеновские дифрактограммы необлученных многослойных пленок ZrN/a-ZrCu и аморфных пленок ZrCu с концентрациями меди $C_{\text{Cu}} = 44,6$ и 73,8 ат. %. На дифрактограмме видны узкие дифракционные пики, соответствующие кристаллической фазе ZrN и аморфные гало, принадлежащие аморфной фазе ZrCu . Заметно увеличение углового положения аморфного гало с повышением концентрации меди. Это смещение связано с уменьшением свободного объема аморфного слоя на 74 % при изменении концентрации меди с 44,6 до 73,8 ат. %. Выявлено, что положение дифракционных пиков ZrN не зависит от концентрации меди в аморфном слое ZrCu и толщины этого слоя.

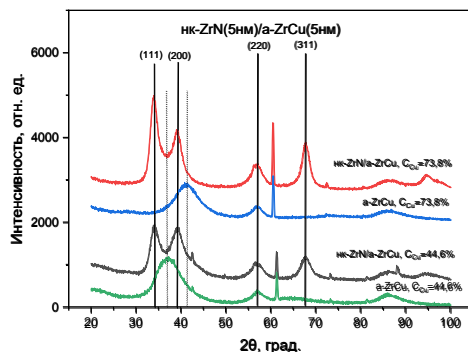


Рисунок 1 – Дифрактограммы исходных аморфных плёнок ZrCu и многослойных $\text{nc-ZrN (5 нм)/a-ZrCu (5 нм)}$ с концентрациями меди $C_{\text{Cu}} = 44,6$ и 73,8 ат. %

Результат фазового анализа облученных образцов предоставлен на рисунке 2. Облучение до дозы $1,1 \times 10^{18}$ не приводит к изменению фазового состава пленок. На дифрактограммах не наблюдается изменения параметра решетки, что связано с процессами релаксации ввиду образования блистеров и эрозии поверхности.

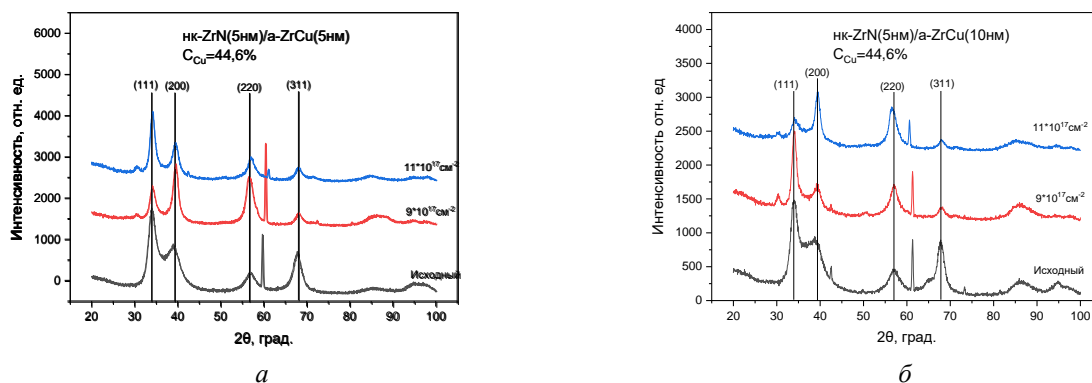


Рисунок 2 – Дифрактограммы облучённых многослойных плёнок ZrN/a-ZrCu $C_{\text{Cu}} = 44,6$ ат. % и толщиной слоёв 5 нм/5 нм (а), 5 нм/10 нм (б)

Определение размера кристаллитов проводилось с помощью рентгеновской дифракции методом Вильямсона-Холла. Данные предоставлены на рисунке 3. Как видно из рисунка, размер ОКР немного превышает половину толщины кристаллического слоя. После облучения размер ОКР увеличивается и в пределах погрешности 10 % соответствует толщине кристаллического слоя. Из литературных источников следует, что данный метод расчета размера ОКР и микронапряжений завышает получаемые значения [1]. Определять размер кристаллитов с помощью рентгеновской дифракции рекомендуется для материалов с размером сферических кристаллитов менее 100 нм.

Так как из разных методов расчета ОКР по уширению дифракционных линий следуют разные значения, то в подтверждение рентгеновским данным были сделаны снимки поперечного сечения многослойных пленок (рисунок 4). На рисунке 4а хорошо видны чередующиеся несмешиваемые слои нанокристаллического ZrN и аморфного ZrCu, в которых под действием облучения искривляется форма слоев (рисунок 4б). Изменение формы слоев (изменение направления ориентации зерен ZrN) сказывается на изменении интенсивности дифракционных линий (100) и (200) фазы ZrN (рисунок 2). При этом следует отметить, что толщина кристаллических слоев до и после облучения остаются без изменений. Изменение толщины многослойных пленок после облучения связано только с увеличением толщины аморфных слоев (распухание).

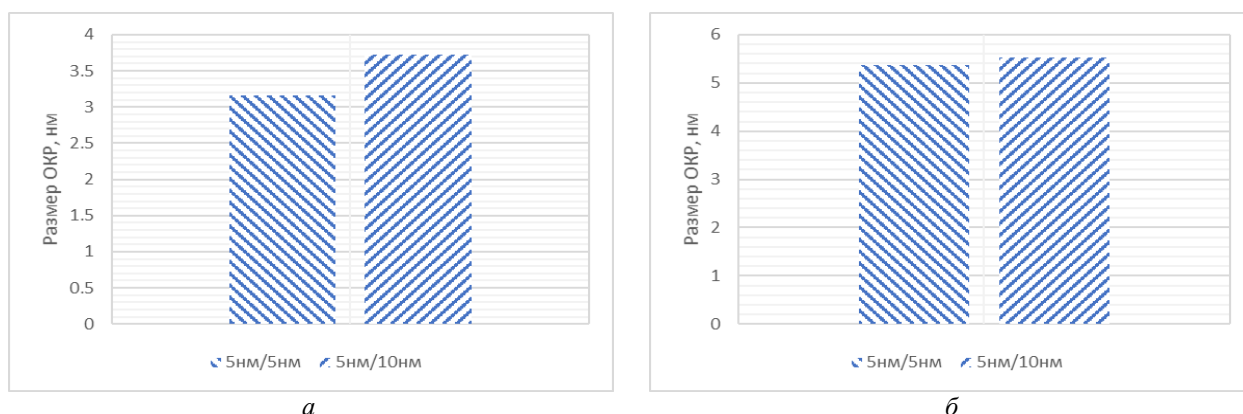


Рисунок 3 – Размер ОКР в многослойных плёнках нк-ZrN/a-ZrCu исходных (а), облучённых (б).
При облучении ионами гелия с энергией 40 кэВ и флюенсе $9 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$

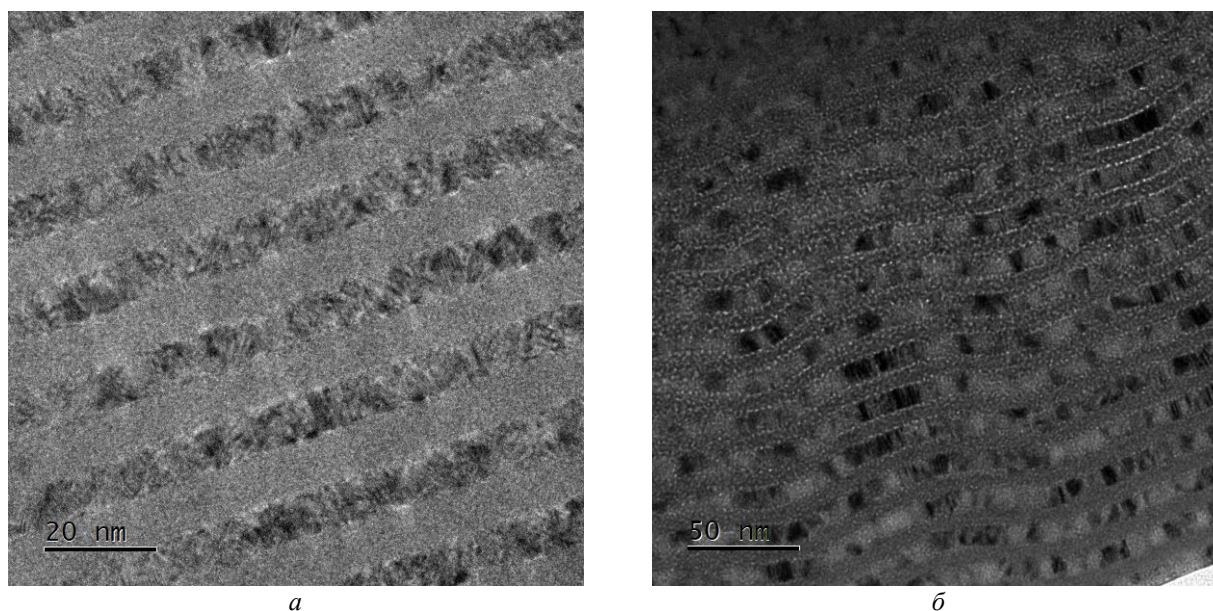


Рисунок 4 – ВРПЭМ-изображения поперечного сечения многослойной плёнки нк-ZrN/a-ZrCu 5 нм/5 нм (а), 5 нм/10 нм (б) при облучении ионами гелия с энергией 40 кэВ и флюенсе $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$

Изменение формы слоев при облучении так же должно сказываться на эволюции макронапряжений в многослойных пленках. Обнаружено, что макронапряжения в облученных пленках, рассчитанные методом $\sin^2\psi$, являются сжимающими (рисунок 5). Повышение дозы облучения приводит к уменьшению сжимающих напряжений. В многослойных пленках с толщиной аморфного слоя 10 нм напряжения релаксируют до меньших

значений. Нанопоры, локализованные на границах раздела кристаллический – аморфный слой, хорошо поглощаются аморфным слоем, и увеличение его толщины приводит к релаксации до меньших напряжений.

Д. Каоуми и др. [2] предложил, что рост зерен в металлах под действием облучения в температурно-независимом режиме происходит в результате тепловых пиков (тепловой фактор), индуцированных первичными ударными столкновениями. Тепловые пики, локализованные в кристаллическом слое на границах зерна, могут приводить к переориентации субзерен. Модель предполагает, что, когда каскады попадают на границы зерна, атомные перестройки в результирующем тепловом пике смещаются из-за кривизны границы зерна, что приводит к росту ОКР. Максимальная концентрация пор имеет место в области среднего проективного пробега ионов гелия, что говорит о преимущественной локализации радиационных вакансий и имплантированного гелия в этой области. Преимущественная локализация пор имеет место на границах раздела аморфный – кристаллический слой (рисунок 4) в силу того, что границы являются эффективными стоками радиационных дефектов [3] и имплантированной примеси. Для дозы 2×10^{17} распухание составляет примерно 1,5 %. Для аналогичных доз для объемных материалов эта величина на порядок выше, что свидетельствует о радиационной стойкости разрабатываемых многослойных систем. Вследствие распухания аморфного слоя в кристаллическом слое образуются деформации (деформационный фактор), которые способствуют росту ОКР.

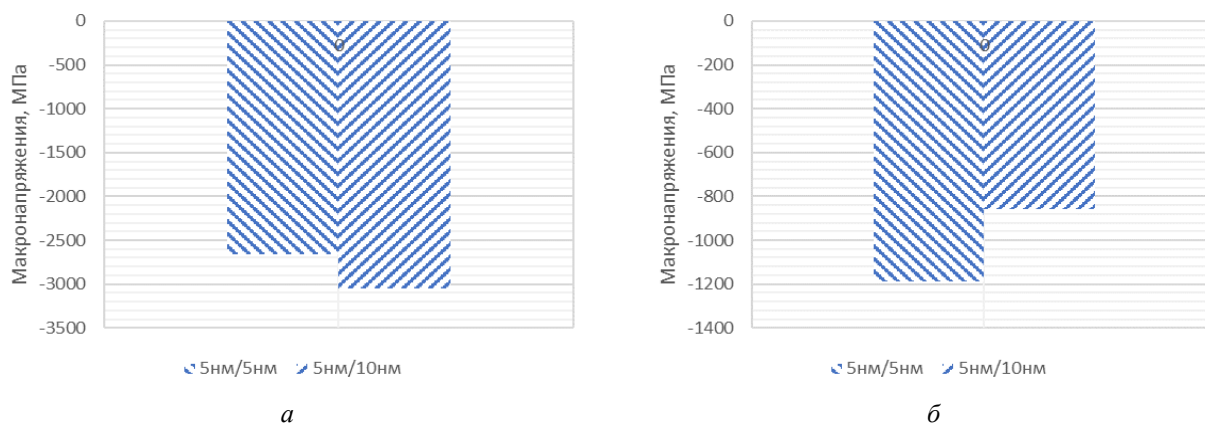


Рисунок 5 – Макронапряжения в многослойных плёнках нк-ZrN/a-ZrCu с разной толщиной аморфного слоя при дозе $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (а), $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (б)

Рентгеноструктурный анализ не выявил изменения фазового состава и параметра решетки. Размер ОКР повышается с увеличением дозы облучения и при этом микроскопия не выявила роста зерен. Тепловой и деформационный фактор способствуют росту ОКР. Облучение вызывает искривление формы слоев, ввиду растворения примесей в аморфных слоях и формированию пузырей на границе. Изменение формы слоев ведет к образованию напряжений. Последующее облучение ведет к формированию блистеров и релаксации напряжений. Распухание составляет 1,5 %.

Список литературы

1. Pierre M. Kibasomba, Simon Dhlamini [et al.]. Strain and grain size of TiO_2 nanoparticles from TEM, Raman spectroscopy and XRD : The revisiting of the Williamson-Hall plot method, Results in Physics 9 (2018) 628–635.
2. Kaoumi, D. A thermal spike model of grain growth under irradiation / D. Kaoumi, A. T. Motta, and R. C. Birtcher // Journal of Applied Physics 104, 073525 (2008); doi: 10.1063/1.2988142.
3. Helium irradiation and implantation effects on the structure of amorphous silicon oxycarbide / Q. Su, S. Inoue, M. Ishimaru [et al.] // Sci. Rep. 7 (2017) 3900(1–8).

The work is devoted to the study of the microstructure of multilayer films consisting of nanocrystalline zirconium nitride and an amorphous alloy based on zirconium and copper ZrN/a-ZrCu with different concentrations of copper $\text{Ccu} = 44.6\text{--}73.8 \text{ at. \%}$, irradiation at a temperature of helium ions with an emission of 40 keV and dose up to $1.1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$. ZrN/a-ZrCu films were deposited by magnetron production in a vacuum Si substrate at a temperature of 300 °C. The thickness consists of an individual ZrN layer of 5 nm. The amorphous layer, which is a good absorber of radiation defects, was deposited with an increased thickness of 5 and 10 nm. It has been established that irradiation of a multilayer system with helium ions leads to radiation-induced swelling and grain growth, and the evolution of decay.

Веремей Илья Сергеевич, физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, stetarum@gmail.com.

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

Н. Л. ГРЕВЦОВ

**БУФЕРНЫЕ СЛОИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ
ДЛЯ ГЕТЕРОЭПИТАКСИИ НИТРИДА ГАЛЛИЯ**

Исследованы закономерности формирования буферных слоев для гетероэпитаксии нитрида галлия на основе пористого кремния, получаемого методом электрохимического анодирования кремниевых пластин. Установлено влияние режимов анодирования на толщину и пористость пористого кремния и его микроскопические структурные параметры. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии с плазменной активацией азота получены гетероэпитаксиальные пленки нитрида галлия на кремниевых подложках с буферными слоями пористого кремния различной морфологии. Определено влияние режимов формирования слоев пористого кремния на кристаллическую структуру получаемых гетероэпитаксиальных пленок нитрида галлия. Показано, что двухслойные образцы пористого кремния обеспечивают лучшее структурное совершенство эпитаксиальных пленок нитрида галлия по сравнению с их однослойными аналогами.

Нитрид галлия GaN является перспективным прямозонным полупроводником, обладающим широкой запрещенной зоной. На его основе возможно изготавливать светодиоды и лазерные диоды, излучающие свет в синей и ультрафиолетовой области спектра, а также мощные и высокочастотные транзисторы, имеющие повышенную стойкость к ионизирующему излучению. К сожалению, до сих пор не разработана технология изготовления подложек GaN большого размера, в связи с чем этот полупроводниковый материал преимущественно наращивается в виде пленок на инородные подложки. Особый интерес представляет формирование пленок GaN на кремниевых подложках: получаемые таким образом гетероэпитаксиальные структуры могут быть использованы для изготовления оптоэлектронных и электронных приборов и интегральных микросхем с применением процессов микроэлектронной кремниевой технологии. Получение гетероэпитаксиальных слоев GaN/Si с высоким структурным совершенством является сложной задачей в связи со значительным различием параметров кристаллических решеток и коэффициентов термического расширения (КТР) GaN и Si. Это приводит к образованию структурных дефектов в пленках GaN, а также к значительным внутренним механическим напряжениям в гетероэпитаксиальных структурах, что отрицательно сказывается на оптических и электрофизических характеристиках пленок. Для обеспечения высокого структурного совершенства структур GaN/Si необходимо использовать буферные слои, назначение которых состоит в компенсации указанных механических напряжений.

Пористый кремний (ПК), получаемый методом электрохимического анодирования, может применяться как буферный слой для наращивания на кремниевых подложках пленок других полупроводниковых материалов. Буферные слои ПК были успешно использованы для эпитаксии арсенида галлия, сульфида свинца и других сложных полупроводниковых соединений. Несмотря на значительный практический интерес к данному вопросу, к настоящему времени опубликовано всего несколько работ [1, 2], в которых сообщается о благоприятном влиянии буферных слоев ПК на структурное совершенство гетероэпитаксиальных структур GaN/Si, получаемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

Уникальной особенностью ПК является возможность варьировать его толщину, пористость и структуру путем регулирования параметров анодной обработки. Кроме того, ПК обладает способностью деформироваться в некоторых пределах без разрушения и тем самым компенсировать разницу в КТР, а также выдерживает нагрев до высоких температур, что немаловажно при использовании высокотемпературных эпитаксиальных методов выращивания пленок GaN. Использование буферных слоев на основе ПК делает возможным получение эпитаксиальных пленок GaN высокого качества с низкими внутренними напряжениями и малой дефектностью, пригодных для изготовления различных опто- и микроэлектронных приборов. Это также позволит обеспечить необходимую для коалесценции зародышей нитрида галлия поверхностную подвижность атомов без угрозы разрушения материала. Выращенные в этих условиях слои GaN будут иметь шероховатость, сравнимую с таковой для аналогичных пленок на сапфировых подложках со ступенями роста атомарной высоты.

В настоящей работе исследованы особенности формирования гетероэпитаксиальных пленок GaN на буферных слоях ПК и показано, что количество ростовых дефектов упаковки можно существенно уменьшить, если проводить эпитаксию GaN на поверхности спеченного буферного двухслойного ПК в две стадии. На первой стадии осаждение GaN необходимо производить с минимально возможной скоростью методом атомно-слоевой эпитаксии (ALD), после чего доращивать на второй стадии методом МЛЭ.

Для экспериментальных исследований использовались подложки кремния электронного типа проводимости, легированные сурьмой, с удельным сопротивлением 0,01 Ом·см и кристаллографической ориентацией (111). Пластины проходили стандартную химическую очистку в перекисно-соляном растворе. Слои ПК изготавливались методом электрохимического анодирования в гальваностатическом режиме. Рабочим электродом (анодом) служил графитовый электрод, на который помещался образец кремния, а в качестве контрэлектрода (катода) выступала спираль из платиновой проволоки. В качестве источника тока использовался потенциогальваностат Metrohm Autolab PGSTAT 302N. Используемый для анодирования

электролит состоял из одной объемной части HF, трех частей деионизованной воды и одной части изопропилового спирта.

Изменение длительности анодирования при различных заданных значениях плотности анодного тока обеспечивало формирование слоев ПК с различными макроскопическими (толщина и пористость) и структурными параметрами. Анодирование при комнатной температуре позволяло формировать слои ПК с пористостью от 50 до 75. Изображение поверхности и скола ПК такого рода, полученное методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), представлено на рисунке 1.

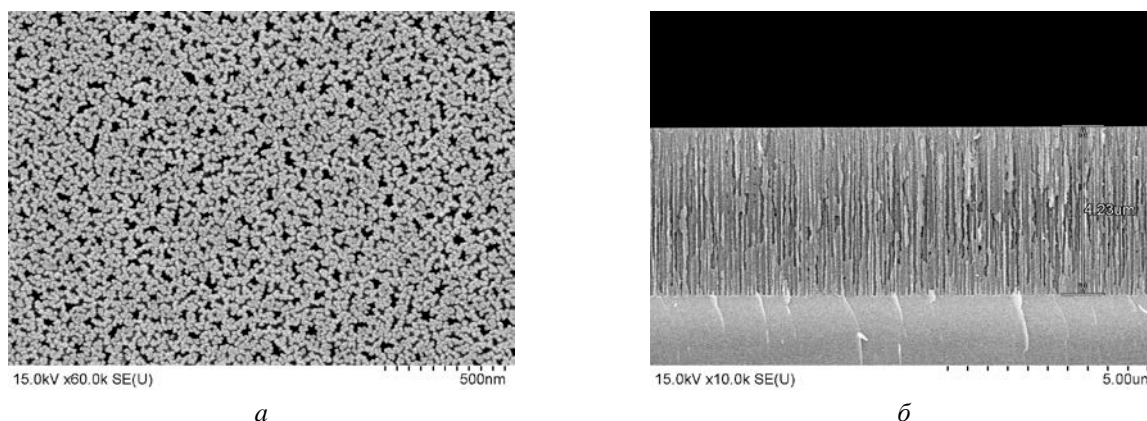


Рисунок 1 – СЭМ изображения поверхности (а) и скола (б) слоя ПК толщиной 4,23 мкм и пористостью 65 %

Установлено, что толщина и пористость ПК, получаемого электрохимическим анодированием монокристаллического кремния в водно-спиртовых электролитах фтористоводородной кислоты, зависят не только от электрических режимов анодирования, но и от температуры электролита (рисунок 2). Анодирование в охлажденном электролите позволило получать слои ПК кремния с пористостью менее 30 %, которые невозможно получить при комнатной температуре.

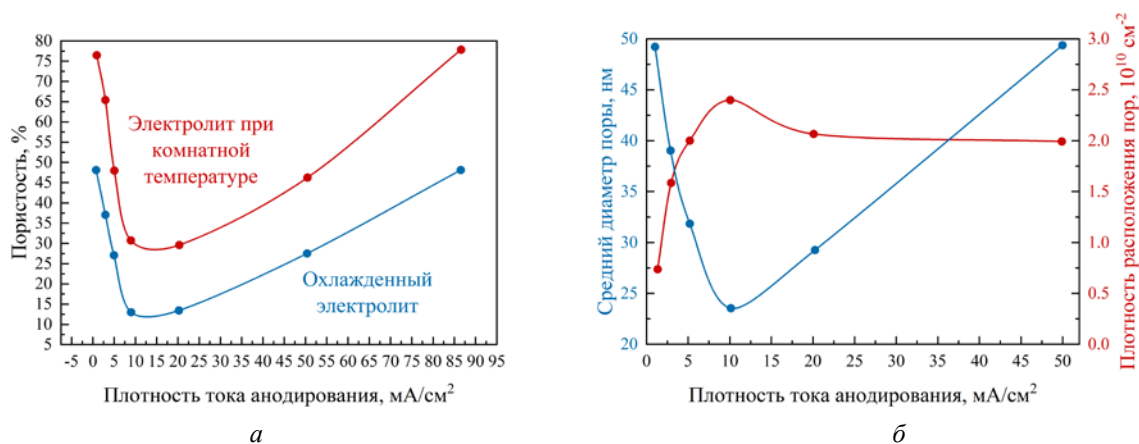


Рисунок 2 – Зависимости (а) пористости и (б) среднего диаметра и плотности расположения пор от плотности тока анодирования и температуры электролита

Полученные слои ПК с пористостью менее 30 % и малыми диаметрами пор (20–50 нм) были использованы в дальнейших экспериментах в качестве верхнего слоя (0,5 мкм) двухслойных пористых буферных слоев для изготовления гетероэпитаксиальных структур GaN на кремниевых пластинах. Второй пористый слой имел толщину 5 мкм и пористость 55–60 %. Пленки нитрида галлия на поверхности однослойных (толщина 5 мкм и пористость 60 %) и двухслойных образцов ПК были сформированы методами атомно-слоевой и молекулярно-лучевой эпитаксии с плазменной активацией азота (МЛЭ ПА).

Рентгенофазовый анализ образцов был выполнен в стандартной геометрии Брэгга–Брентано с использованием характеристического излучения кобальта. Установлено, что самыми интенсивными рефлексами на дифрактограммах являются отражения от плоскости (111) подложки кремния и дифракционные отражения (0002) и (0004) от эпитаксиального слоя нитрида галлия, что свидетельствует о росте слоя GaN вюрцитной сингонии в монокристаллической форме. Анализ результатов позволил сделать заключение о том, что на дифрактограммах обоих типов гетероструктур присутствуют запрещенные для данной геометрии

измерений рефлексы (0003) от слоя нитрида галлия и (222) от кремния. Для слоя нитрида галлия это происходит ввиду снижения его монокристалличности за счет появления дефектов структуры, а для подложки Si (111) обусловлено небольшим отклонением ее ориентации от плоскости (111). Еще одной особенностью полученных гетероструктур является присутствие фазы нитрида кремния, находящейся в аморфном состоянии. Вероятнее всего, слой нитрида кремния образуется на этапе нитридизации перед ростом эпитаксиального слоя нитрида галлия.

Изучение образцов с помощью сканирующей электронной микроскопии показало, что сформированные пленки нитрида галлия имели толщину порядка 1 мкм (рисунок 3).

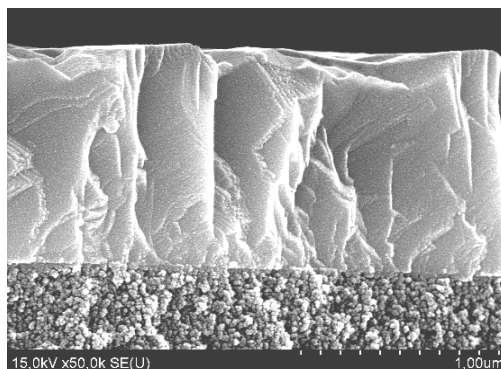


Рисунок 3 – СЭМ изображение скола гетероэпитаксиальной структуры с буферным слоем ПК

Было также оценено качество полученного слоя нитрида галлия и межфазной границы между нитридом галлия и буферными слоями ПК. Для структур с однослойным буферным слоем ПК рост пленки нитрида галлия происходит на подложке, верхний слой которой, примыкающий к границе раздела, имеет пористую структуру. В зависимости от использованного типа буферного слоя эпитаксиальный слой нитрида галлия имеет разную организацию поверхности. Так, при росте на однослойном буферном слое пленка нитрида галлия имеет шероховатую поверхность, на которой присутствуют наноразмерные островки фазы нитрида галлия высотой 25–40 нм и диаметром 90–110 нм. В то же время поверхность слоя нитрида галлия, выращенного на двухслойном буферном слое, образована наноразмерными блоками с формой, близкой к гексагональной. При этом блоки нитрида галлия имеют более равновесную и более однородную морфологическую картину, чем подобные блоки, выросшие на подложке с однослойным буферным слоем ПК.

Полученные экспериментальные результаты показывают, что использование двухслойного буферного слоя ПК, состоящего из верхнего слоя с низкой пористостью и диаметрами пор 20–50 нм, сформированного в охлажденном электролите, и второго слоя ПК с пористостью 60–70 %, сформированного при комнатной температуре, позволяет улучшить структурное совершенство эпитаксиальных слоев нитрида галлия¹.

Список литературы

1. Гетероэпитаксиальные пленки нитрида галлия на подложках кремния с буферными слоями на основе пористого материала / Ю. Н. Бузынин [и др.] // Известия РАН. Сер. «Физика». – 2008. – Т. 72, № 11. – С. 1583–1587.
2. Влияние слоя нанопористого кремния на практическую реализацию и особенности эпитаксиального роста слоев GaN на темплайтах SiC/por-Si/c-Si / П. В. Середин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2020. – Т. 54, № 5. – С. 491–503.

The mechanisms of porous silicon buffer layer formation by electrochemical anodization are investigated. The influence of anodization regimes on the thickness and porosity of porous silicon and its microscopic structural parameters is established. Heteroepitaxial gallium nitride films on silicon substrates with buffer layers of porous silicon are obtained by molecular beam epitaxy. The influence of porous silicon layer formation conditions on the crystal structure of heteroepitaxial gallium nitride films is determined. It is shown that two-layer samples of porous silicon provide a better structural perfection of epitaxial films of gallium nitride compared to single-layer buffer layers.

Гревцов Никита Леонидович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, hrautsou@gmail.com.

Научный руководитель – *Бондаренко Виталий Парфирович*, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, vitaly51@mail.ru.

¹Выполнение исследований финансировалось по заданию 3.1.4 ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Микро- и нанoeлектроника».

Н. О. ДЕМЕНЧУК

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МЕДИ, ОБРАБОТАННОЙ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ, ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОТЖИГЕ

Проведена серия изохронных отжигов меди при температурах от 100 °С до 500 °С, изучено влияние высокотемпературного отжига на образование продуктов окисления на поверхности образцов технической чистой меди, а также изменение ее структуры при окислении в воздушной атмосфере.

На сегодняшний день медь занимает особое место среди различных металлов, т. к. она находит широкое применение в современной промышленности, связано это с тем, что соединения на основе меди обладают высокой коррозионной стойкостью, высокими сверхпроводящими характеристиками и т. д. [1]. В связи с тем, что данный металл расширяет свою область применения, выдвигаются все новые научно-технические задачи, которые, в свою очередь, поднимают требования к свойствам медных изделий. Кроме того, сплавы на основе меди находят применение в хирургии, т. к. они не вызывают никаких реакций в мышечной ткани, костях, в связи с чем используется для изготовления протезов, винтов, черепных пластинок.

Оксиды на основе меди являются перспективными материалами для преобразования солнечной энергии. Материалы на основе CuO обладают большим магнитосопротивлением и высокотемпературной сверхпроводимостью. Cu₂O широко применяется в микро- и наноэлектронике, в том числе в материалах электродов и чувствительных элементах [2]. Кроме того, оксиды меди обладают высокой электрохимической активностью, которая усиливается в 2 раза в наноразмерном CuO по сравнению с поликристаллическим, что открывает перспективы использования CuO в качестве электродов в литиевых источниках тока [3].

Существует множество способов, которые позволяют сформировать оксиды меди на поверхности исследуемого образца (метод конденсации паров меди, метод нагружения сферическими сходящимися ударными волнами и т. д.). В данной работе образование оксидов меди происходило при помощи высокотемпературного отжига, где в качестве атмосферы был кислород.

Объектом исследования являлись образцы технической чистой меди, которая не содержала примесей. Размеры образцов 1×1 см, толщина около 1 мм. Впоследствии данные образцы подвергались высокотемпературному отжигу, суммарное время отжига составило 40 мин. На рисунке ниже представлена фотография данных образцов после отжига.



Рисунок 1 – Образцы меди, подвергнутые высокотемпературному отжигу

Исходя из рисунка 1, можно заметить, что с повышением температуры отжига, цвет образцов меняется. Видно, что, начиная от температуры 200 °С и до 500 °С, на поверхности образцов образуется плотный слой серого цвета.

Рентгеноструктурный анализ, который является основным методом для изучения структуры образцов, показал, что при первом отжиге (рисунок 2), длительность которого составила 20 мин., начиная от температуры 200 °С, происходит образование продуктов окисления, а именно оксидов Cu₂O (куприт) и CuO (тенорит). Из анализа дифрактограмм видно, что интенсивность дифракционных максимумов, соответствующих Cu₂O и CuO, растет с повышением температуры. Кроме того, при температуре 500 °С происходит активное образование оксида CuO.

После второго отжига (рисунок 3) длительность которого составила 40 мин., при температуре 500 °С, наблюдается значительный рост интенсивности пиков соответствующих CuO. Кроме того, можно заметить, что второй отжиг приводит к более интенсивному окислению исследуемых образцов.

Следовательно, при проведении двух последовательных отжигов, было установлено, что первым оксидом, который образуется на поверхности образца (в диапазоне от комнатных температур до 300 °С) является Cu₂O, т. к. содержание Cu в нем больше, чем в CuO, а начиная от температуры 300 °С и выше, происходит интенсивное образование CuO.

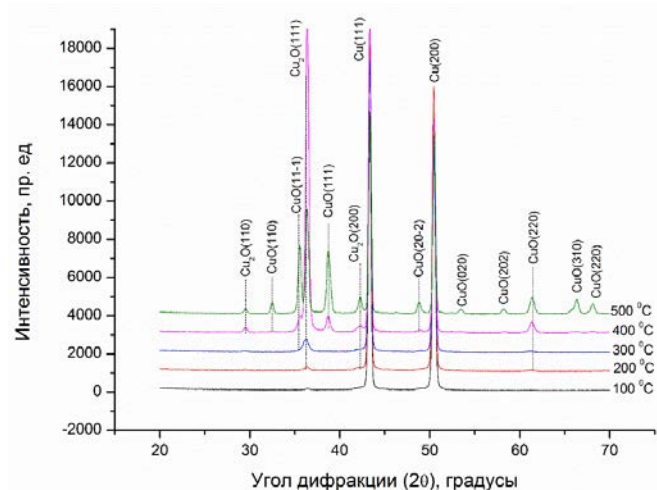


Рисунок 2 – Дифрактограммы образцов меди после отжига длительностью 20 мин.

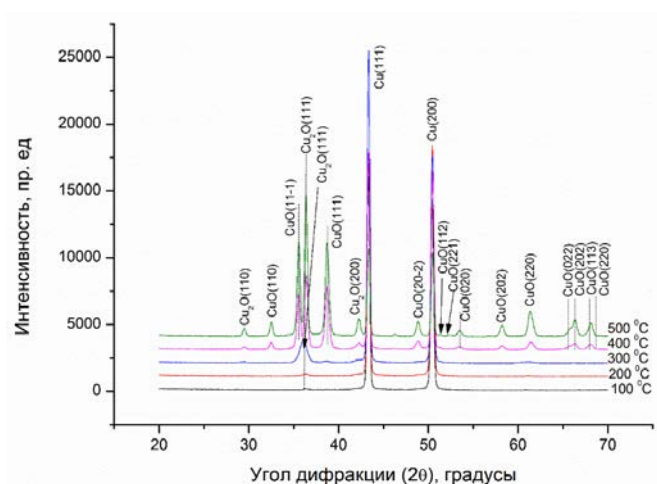


Рисунок 3 – Дифрактограммы образцов меди после отжига длительностью 40 мин.

Для меди был найден параметр элементарной ячейки. По сравнению с табличным значением параметра решетки ($a = 3,6150 \text{ \AA}$), значения, получаемые на эксперименте, оказываются завышенными, что может быть связано с тем, что изначально исследуемые образцы (в форме пластинок) были деформированы при изготовлении, что непосредственно сказывается на кристаллической решетке меди. Но проводя отжиг, было установлено, что по мере роста температуры, а точнее, при температурах выше $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$, параметр решетки меди стремится к равновесному значению.

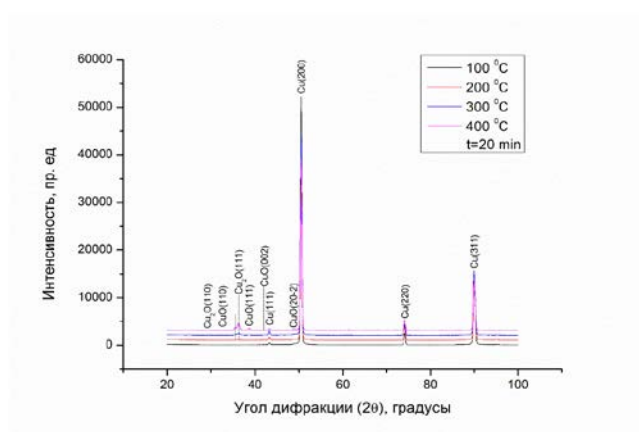


Рисунок 4 – Дифрактограммы образцов меди после воздействия плазмы и отжига длительностью 20 мин.

После отжига образцов меди, которые предварительно были подвергнуты воздействию плазмы, интенсивность линий, соответствующих оксидам меди, намного меньше по сравнению с линиями на рисунке 3. Следовательно, можно сделать вывод, что толщина окисленного слоя становится меньше.

Таким образом, в работе показано, что при высокотемпературном отжиге технически чистой меди, ее параметр решетки при температурах выше 300 °С стремится к равновесному значению, также было установлено, что при температурах ниже 300 °С происходит образование преимущественно Cu_2O , а при температурах выше, чем 300 °С происходит образование CuO , что обусловлено увеличением содержания кислорода в кристаллической решетке меди. Также экспериментально установлено, что воздействие плазмы резко сокращает толщину оксидного слоя, следовательно, предварительная обработка образцов плазменными потоками препятствует окислению.

Список литературы

1. Горбатенко, В. П. Материаловедение : учеб. / В. П. Горбатенко, Т. В. Новоселова. – Невинномысск : ЭльДирект, 2018. – 324 с.
2. Синтез и исследование стабильных коллоидных растворов наночастиц меди / А. Е. Тюрина [и др.] // Физика твердого тела. – 2014. – Т. 56, вып. 7. – С. 1379–1385.
3. Julifn Morales, Luis Sanchez, Francisco Martin [et al.] // Electrochimica Acta. – 2004. – Vol. 49. – P. 4589–4597.

In this work a series of isochronous annealing of copper was carried out at temperatures from 100 °C to 500 °C, influence of high-temperature annealing on formation of products of oxidation on surfaces of samples of technically pure copper and also change of its structure at oxidation in the air atmosphere is studied.

Деменчук Наталья Олеговна, студентка 4 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, natalia.demenchuk@yandex.by.

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

УДК 538.91

А. С. ДОВГАЛЮК

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И КИНЕТИКА ОКИСЛЕНИЯ ВОЛЬФРАМА, ЛЕГИРОВАННОГО МЕДЬЮ, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА

Представлены структура поверхности, фазовый состав и кинетика окисления вольфрама, легированного медью. Показана зависимость диффузионных процессов от текстуры исследуемых материалов. Образцы вольфрама с медным покрытием обрабатывались компрессионным потоком плазмы с различной плотностью поглощенной энергии. В результате подобной обработки был получен двухфазный сплав W/Cu.

В настоящее время вольфрам и его сплавы получили довольно широкое распространение, а в особенности композиты на основе вольфрама и меди (W-Cu композиты), которые используются в микроэлектронике. Вольфрам обладает очень высокой температурой плавления, относится к группе тугоплавких металлов, однако обладает низкой теплопроводностью. В отличие от вольфрама, медь обладает высокой тепло- и электропроводностью, но является слишком мягкой и неустойчивой к высоким температурам. Тем не менее, композиты, включающие оба этих металла, обладают хорошими механическими свойствами, радиационной стойкостью, высокой проводимостью. Чаще всего в качестве исходного материала для получения W-Cu композитов используются порошки вольфрама и меди, которые спекаются с помощью порошковых технологий, однако сформированные структуры характеризуются наличием микропустот, которые нарушают непрерывную структуру проводящей меди и ухудшают механические свойства из-за высокой концентрации напряжений. Изготовить вольфрам-медный сплав с однородной структурой крайне трудно, что объясняется, во-первых, различными их температурами плавления и, во-вторых, нерастворимостью обоих элементов друг в друге [1, 2]. Так, в настоящей работе предложено сформировать вольфрам-медный сплав при помощи импульсного высокоэнергетического плазменного воздействия, которое позволяет осуществить плавление компонентов сплава и дальнейшее их перемешивание.

В работе использовались образцы технически чистого вольфрама размером 10×10 мм и толщиной 2 мм, а также образцы диаметром 12 мм и толщиной 2 мм, на поверхность которых наносилось покрытие меди толщиной около 1 мкм. Образцы имеют различную текстуру, образцы размером 10×10 мм не имеют явно выраженного кристаллографического направления, а образцы диаметром 12 мм текстурированы преимущественно в направлении [110]. Полученные системы обрабатывались компрессионными плазменными

потоками (КПП), генерируемыми в магнетоплазменном компрессоре компактной геометрии в среде остаточного газа (азота) при давлении 400 Па. Длительность разряда составляла 100 мкс. Напряжение на системе конденсаторов варьировалось от 3,5 кВ до 4,0 кВ, что позволяло, изменяя расстояние между поверхностью образца и срезом электродов (L) от 6 до 12 см, изменять плотность поглощенной энергии в пределах, необходимых для плавления как покрытия меди, так и части подложки вольфрама. Фазовый состав модифицированного приповерхностного слоя изучался с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Rigaku Ultima IV в медном излучении (длина волны 0,154178 нм) в геометрии Брэгга-Брентано. С помощью растровой электронной микроскопии проводился анализ морфологии поверхности.

Сформированные вольфрам-медные композиты подвергались изотермическим отжигам с целью установления термической стабильности структуры в условиях работы при повышенных температурах в открытой атмосфере. Отжиги образцов производились при температуре 500 °С с выдержкой 1–3 часа.

В результате плавления приповерхностного слоя системы Cu/W происходит перемешивание двух компонент сплава в жидкофазном режиме [3]. При проведении фазового анализа с помощью рентгеноструктурного анализа в модифицированном слое образцов с обеими текстурами обнаружены фазы меди и вольфрама (рисунки 1, 2). Также на дифрактограммах можно увидеть снижение интегральной интенсивности дифракционных линий меди с повышением плотности поглощенной энергии, что указывает на уменьшение ее объемного содержания в анализируемом слое. Согласно результатам элементного анализа, проведенного методом рентгеноспектрального микроанализа, содержание меди в приповерхностном слое образцов без текстуры, сформированного на максимальном расстоянии ($L = 12$) составляет 63 ат. %, а при минимальном расстоянии ($L = 8$ см) снижается до 1,3 ат. %, что может говорить о частично эрозии поверхности с последующим удалением меди за счет испарения, абляции либо гидродинамического растекания. Такая же тенденция наблюдается и для образцов с ярко выраженной текстурой, так при максимальном расстоянии ($L = 10$ см) содержание меди составляет 48 ат. %, а при минимальном расстоянии ($L = 6$ см) медь не обнаружена.

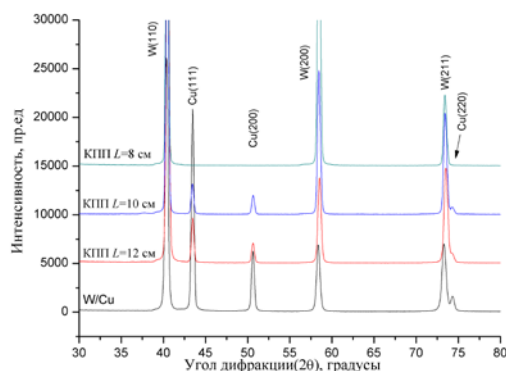


Рисунок 1 – Рентгеновские дифрактограммы Cu/W после воздействия КПП при $U = 4,0$ кВ

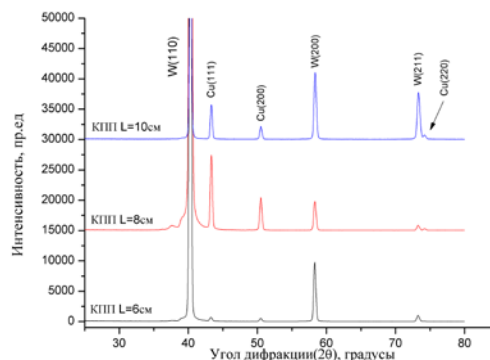


Рисунок 2 – Рентгеновские дифрактограммы Cu/W после взаимодействия с КПП при $U = 3,5$ кВ

При более детальном анализе дифракционных линий вольфрама можно заметить их смещение в сторону больших углов, что говорит об уменьшении параметра решетки вольфрама. Так, после расчёта параметра решетки вольфрама можно отметить, что для нетекстурированных образцов (рисунок 1) на минимальном расстоянии ($L = 8$ см) он составляет $a = 0,3157$ нм, а при максимальном расстоянии ($L = 12$ см) составляет $a = 0,3154$ нм (табличное значение $a = 0,3165$ нм). Для образцов с выраженной текстурой (рисунок 2) на минимальном расстоянии ($L = 6$ см) параметр решетки равен $a = 0,3162$ нм, а при максимальном расстоянии ($L = 12$ см) составляет $a = 0,3165$ нм.

Так как реальная эксплуатация вольфрамового сплава может происходить в условиях повышенных температур при наличии активной воздушной или кислородной среды, было предложено исследовать стабильность полученных структур по отношению к высокотемпературному окислению.

После высокотемпературной обработки образцов в течение 3 часов, изначально обработанных КПП с различными режимами, на дифрактограммах можно заметить дифракционные рефлексы, соответствующие как оксиду вольфрама WO_3 , так и оксидам меди CuO и Cu_2O (рисунок 3). В процессе отжига интенсивность рефлексов оксидов вольфрама и меди растёт.

Изучив дифрактограммы, видно, что дифракционные линии вольфрама смещаются в сторону меньших углов дифракции, что говорит об увеличении параметра решетки, так, для образца, обработанного КПП с минимальной плотностью поглощённой энергии, изначально параметр решетки составлял $a = 0,3154$ нм, после отжига параметр решетки составляет $a = 0,3161$ нм. Видно, что параметр решетки увеличивается, приближаясь к табличному значению легированного вольфрама. По-видимому, это объясняется частичным распадом

твердого раствора на основе вольфрама W(Cu) и высвободившиеся атомы меди вступают в реакцию с кислородом с последующим образованием оксида CuO. Это подтверждает присутствие атомов меди в решетке вольфрама.

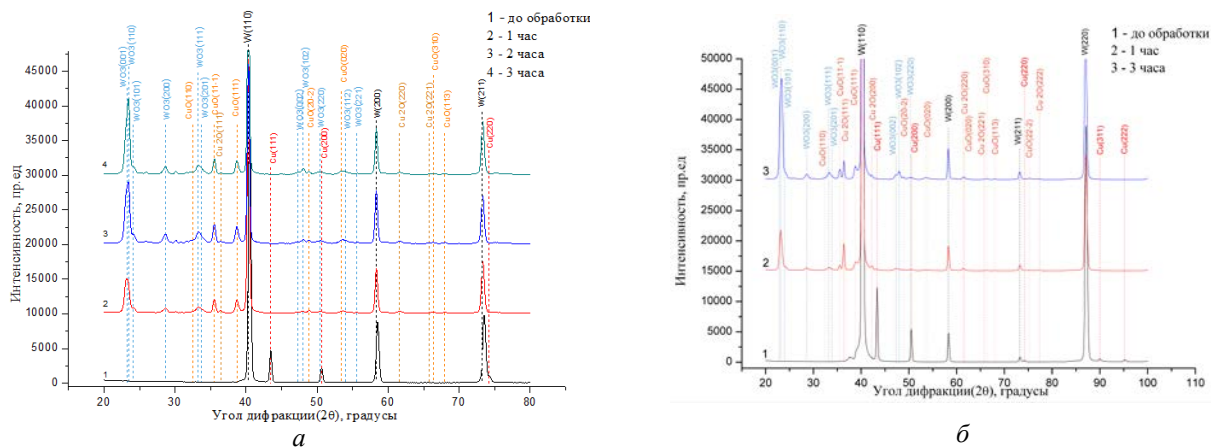


Рисунок 3 – Рентгеновские дифрактограммы W\Si после воздействия КПП при $L = 12$ см и $U = 4,0$ кВ (а) и при $L = 8$ см и $U = 3,5$ кВ (б) и изотермического отжига

Кроме того, в работе была рассчитана доля оксида вольфрама WO_3 в исследуемых образцах. Для этого рассчитывалась относительная интенсивность всех дифракционных линий оксида вольфрама:

$$\gamma = \frac{\sum I_{WO_3}}{\sum I}. \quad (1)$$

Из полученных результатов видно (рисунок 4), что доля оксида в текстурированном образце гораздо меньше, чем в других образцах. То есть происходит уменьшение оксидного слоя, из чего можно сделать вывод, что текстурированные образцы более устойчивы к окислению. Это можно объяснить тем, что плоскость (110) является самой плотноупакованной, то есть кислороду сложнее проникнуть в решётку вольфрама.

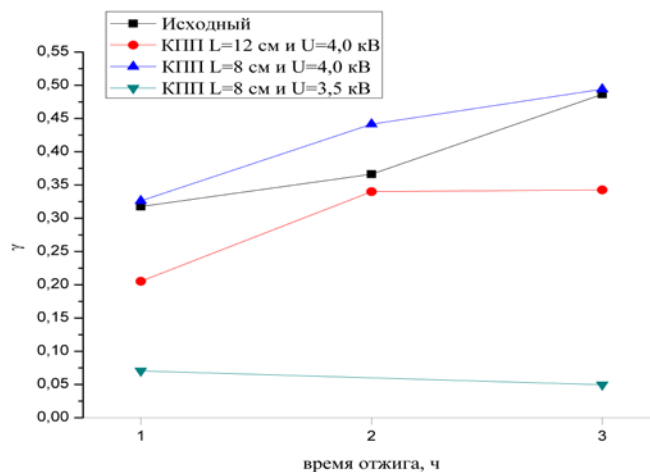


Рисунок 4 – Зависимость доли оксида вольфрама WO_3 в исследуемых образцах от времени отжига

Таким образом, в работе показана перспективность использования компрессионных плазменных потоков для формирования вольфрам-медного сплава путем их воздействия на вольфрам с предварительно сформированным покрытием меди. За счет изменения плотности поглощенной энергии достигается различная концентрация меди в сформированном сплаве. Согласно результатам рентгеноструктурного анализа, медь растворяется в решетке вольфрама, формируя твердый раствор, который частично распадается в процессе нагрева до температуры 500°C и способствует образованию оксидов меди и снижению доли оксида вольфрама WO_3 . Также показано влияние текстуры образцов на кинетику окисления. Практически важным результатом

является формирование такого структурного состояния на поверхности вольфрама, который может характеризоваться более высокой эрозионной стойкостью.

Список литературы

1. Philipps V. Journal of Nuclear Materials, 415 (2011) S2.
2. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками / В. В. Углов [и др.]. – Минск : БГУ, 2013.
3. Конвективный массоперенос в поверхностных слоях титана, подвергнутого воздействию компрессионными плазменными потоками / В. В. Углов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2012. – № 6. – С. 31–39.

The surface structure, phase composition and oxidation kinetics of copper-doped tungsten are presented. The dependence of diffusion processes on the texture of the studied materials is shown. Copper-coated tungsten samples were treated with a compression plasma stream with different absorbed energy densities. As a result of such processing, a two-phase W/Cu alloy was obtained.

Довгалюк Анастасия Сергеевна, студентка 4 курса Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, dovgalukna@gmail.com.

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

УДК 577.3'32/.36;577.32

А. Д. ЖИВОЛКОВСКАЯ, Д. В. ГРИГОРЬЕВА, И. В. ГОРУДКО

НОВЫЙ СИНТЕТИЧЕСКИЙ АНТИМИКРОБНЫЙ ПЕПТИД МЕДИЦИНСКОЙ ПИЯВКИ *HIRUDO MEDICINALIS* ИНДУЦИРУЕТ ИЗМЕНЕНИЕ ТРАНСМЕМБРАННОГО ПОТЕНЦИАЛА НЕЙТРОФИЛОВ

Показано, что взаимодействие нового синтетического антимикробного пептида (АМП) 3967 медицинской пиявки с нейтрофилами приводит к увеличению внутриклеточной концентрации свободных ионов кальция в цитозоле, а также к гиперполяризации плазматической мембраны нейтрофилов. Сделаны предположения относительно механизмов влияния АМП на активность нейтрофилов.

Антимикробные пептиды (АМП) являются ключевым звеном врождённого иммунитета многоклеточных организмов, обеспечивающим эффективную защиту организма от патогенов. АМП ингибируют рост бактерий, при этом обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными антибиотиками, главное из которых – низкая вероятность развития резистентности патогенов. Помимо бактерицидной активности, АМП могут регулировать иммунный ответ и воспаление. Недавно было показано, что синтезированные на основе биоинформатического анализа генома медицинской пиявки *Hirudo medicinalis* катионные АМП обладают антимикробной активностью в отношении грамположительных и грамотрицательных бактерий, низкой гемолитической активностью и не проявляют цитотоксического эффекта по отношению к клеткам млекопитающих [1]. Среди исследованных АМП наибольшей литической активностью в отношении бактериальных мембран обладал АМП 3967 (FRIMRILRVLK). Так, максимальное значение среди минимальных концентраций АМП 3967, необходимых для достижения 100 %-го ингибирования роста *Escherichia coli*, *Chlamydia trachomatis* и *Bacillus subtilis* (МИК_{max}), составило 10 мкМ. Кроме того, было показано, что данный АМП обладает способностью стимулировать активацию НАДФН-оксидазы нейтрофилов [2]. Однако механизмы активации нейтрофилов при действии АМП медицинской пиявки остаются неизученными. Поскольку активация нейтрофилов во многом зависит от функций ионных каналов и внутриклеточных сигнальных путей, целью данной работы явилось исследование влияния АМП 3967 на трансмембранный потенциал и кальциевую сигнализацию в нейтрофилах.

Регистрация изменения трансмембранного потенциала осуществлялась флуоресцентным методом с помощью diO-C3-(5). Внутриклеточную концентрацию свободных ионов кальция ($[Ca^{2+}]_i$) в нейтрофилах определяли с применением флуоресцентного зонда fura 2-AM. Для оценки вклада ионов кальция в изменение трансмембранного потенциала при действии АМП осуществлялась инкубация нейтрофилов с ВАРТА, хелатирующим Ca^{2+} внутри клеток, и EDTA, хелатирующим Ca^{2+} вне клеток.

В результате исследований было установлено, что добавление АМП 3967 в концентрации МИК_{max} к нейтрофилам, находящимся в Ca^{2+} -содержащей среде, приводит к увеличению $[Ca^{2+}]_i$, что может быть обусловлено высвобождением Ca^{2+} из внутриклеточных депо и/или поступлением внеклеточного Ca^{2+} в клетку через каналы плазматической мембраны. Для того, чтобы оценить вклад внеклеточного Ca^{2+} в индуцированное при действии АМП 3967 увеличение $[Ca^{2+}]_i$, нами были проведены эксперименты в бескальциевой среде (0 мМ $CaCl_2$, 5 мМ EDTA). Было установлено, что добавление АМП 3967 к нейтрофилам, находящимся в бескальциевой среде (0 мМ Ca^{2+} , 5 мМ EDTA), также инициировало увеличение $[Ca^{2+}]_i$ за счет высвобождения из внутриклеточных депо, однако эффект АМП 3967 был значительно ниже, чем в Ca^{2+} -содержащей среде.

Последующее добавление CaCl_2 (2 мМ) в бескальциевую среду, содержащую нейтрофилы и АМП 3967, приводило к дополнительному увеличению $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в цитозоле, что свидетельствует о вкладе внеклеточного кальция. Наблюдаемое увеличение $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в нейтрофилах, активированных АМП 3967, после внесения CaCl_2 может осуществляться с участием депо-управляемых Ca^{2+} -каналов (store-operated channels, SOCE), открывающихся при опустошении внутриклеточных депо ионов Ca^{2+} .

После добавления АМП 3967 в концентрации МИК_{max} к суспензии нейтрофилов наблюдалась гиперполяризация клеточной мембраны (до значения $-73,4$ мВ) без дальнейшего восстановления трансмембранного потенциала до значения потенциала покоя ($-65,2$ мВ) (рис. 1). Аналогичный эффект наблюдался при добавлении к нейтрофилам известного агониста активации НАДФН-оксидазы – N-формилметионил-лейцил-фенилаланина [3]. Следует отметить, что гиперполяризация значительно усиливалась (до значения -98 мВ) при добавлении АМП 3967 к суспензии нейтрофилов, предварительно проинкубированных с ВАРТА (рис. 1).

Полученные данные позволяют предположить, что существует как минимум три механизма, ответственных за наблюдаемое изменение трансмембранного потенциала нейтрофилов в ответ на добавление АМП 3967. Поскольку достоверно установлено, что АМП 3967 вызывает увеличение $[\text{Ca}^{2+}]_i$, можно предположить, что данный эффект приводит к активации Ca^{2+} -зависимых K^+ -каналов цитоплазматической мембраны клетки, что в свою очередь приводит к выходу ионов K^+ во внеклеточную среду и наблюдаемой гиперполяризации [3]. Помимо этого известно, что исследуемый АМП стимулирует сборку и активацию НАДФН-оксидазы нейтрофилов. Процесс активации данного ферментного комплекса сопряжен с переносом электронов с НАДФН на O_2 , что в свою очередь сопровождается деполяризацией клеточной мембраны [4]. При этом, из полученных нами данных, можно предположить, что индуцируемое АМП 3967 открытие Ca^{2+} -зависимых K^+ -каналов вносит больший вклад в наблюдаемое изменение мембранного потенциала. Следует отметить, что гиперполяризация мембраны нейтрофилов при действии АМП 3967 может усиливать депо-зависимый вход ионов кальция, который обеспечивает активацию НАДФН-оксидазы [5]. В пользу этого говорят полученные нами данные о том, что активации НАДФН-оксидазы при действии АМП ингибировалась при увеличении концентрации K^+ во внеклеточной среде.

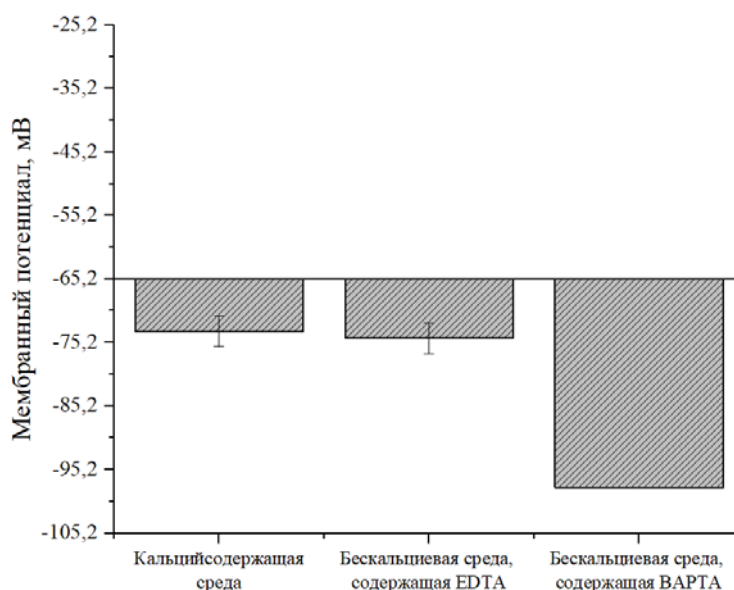


Рисунок 1 – Изменение мембранного потенциала нейтрофилов после добавления АМП 3967 (10 мкМ)

Измерения проводились для суспензий нейтрофилов в Ca^{2+} -содержащей среде; в бескальциевой среде, содержащей EDTA (5 мМ); а также в суспензии нейтрофилов, предварительно проинкубированных с ВАРТА (10 мкМ, 10 мин., 37 °С)

При хелатировании внутриклеточного кальция ВАРТА можно исключить вклад деполяризации мембраны, поскольку сборка и активация НАДФН-оксидазы напрямую зависит от наличия ионов кальция в цитозоле [5]. Аналогично необходимо исключить и вклад гиперполяризации за счет активации Ca^{2+} -зависимых K^+ -каналов. В связи с этим, можно предположить о существовании третьего механизма, ответственного за уменьшение мембранного потенциала. Поскольку гиперполяризация значительно усиливается в присутствии ВАРТА, это может свидетельствовать об интенсивном токе K^+ из внутриклеточной среды, или так называемом токе утечки, наличие которого обеспечивается образованием неспецифичных каналов или пор при взаимодействии АМП 3967 с мембраной нейтрофилов.

На основании полученных данных можно заключить, что взаимодействие нового синтетического АМП 3967 медицинской пиявки *Hirudo Medicinalis* с нейтрофилами приводит к увеличению внутриклеточной концентрации свободных ионов кальция в цитозоле, а также вызывает изменение трансмембранного потенциала клеток, при этом природа наблюдаемой гиперполяризации может заключаться в токе ионов K^+ во внеклеточную среду, что требует дальнейшего уточнения. Данные результаты являются перспективными для разработки новых лекарственных соединений на основе АМП.

Список литературы

1. Medicinal leech antimicrobial peptides lacking toxicity represent a promising alternative strategy to combat antibiotic-resistant pathogens / E. N. Graftskaia [et al.] // Eur. J. Med. Chem. – 2019. – Vol. 180. – P. 143–153.
2. Влияние антимикробных пептидов медицинской пиявки *Hirudo medicinalis* на функциональную активность нейтрофилов / И. В. Горудко [и др.] // Современные проблемы медицинской биохимии. – 2022. – № 3. – С. 57–61.
3. Penna, A. Ca^{2+} -Dependent Hyperpolarization Enhances Intracellular Ca^{2+} Signaling Induced by fMLF in Differentiated U937 Cells / A. Penna, A. Stutzin // PLoS One. – 2015. – Vol. 10. – P. 1–13.
4. Petheo, G. L. Voltage- and NADPH-dependence of electron currents generated by the phagocytic NADPH oxidase / G. L. Petheo, N. Demareux // Biochem. – 2005. – Vol. 388. – P. 485–491.
5. Brechard, S. Regulation of superoxide production in neutrophils: role of calcium influx / S. Brechard, E. J. Tschirhart // J. of Leukocyte Biology. – 2008. – Vol. 84. – P. 1223–1231.

In this work we present that the interaction of a new synthetic antimicrobial peptide (AMP) 3967 of a medical leech with neutrophils leads to an increase in the intracellular concentration of free calcium ions in the cytosol, as well as to hyperpolarization of the plasma membrane of neutrophils. We made assumptions concerning the mechanism of AMP effects on neutrophil activity.

Живолковская Анастасия Дмитриевна, студентка 4 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, anzh2204@gmail.com.

Григорьева Дарья Владимировна, кандидат биологических наук, доцент, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, dargr@tut.by.

Горудко Ирина Владимировна, кандидат биологических наук, доцент, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, irinagorudko@gmail.com.

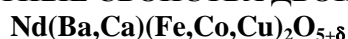
Научные руководители – *Горудко Ирина Владимировна*, кандидат биологических наук, доцент, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, irinagorudko@gmail.com.

Григорьева Дарья Владимировна, кандидат биологических наук, доцент, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, dargr@tut.by.

УДК 544.22+537.31/.32

Я. Ю. ЖУРАВЛЁВА

ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ДВОЙНЫХ ПЕРОВСКИТОВ



Керамическим методом получены твердые растворы $NdBa_{1-x}Ca_xFeCo_{0,5}Co_{0,5}O_{5+\delta}$ ($0,00 \leq x \leq 0,40$), изучены их структура и электротранспортные свойства. Материалы являются полупроводниками p -типа, электропроводность которых уменьшается, а коэффициент термо-ЭДС возрастает с ростом x . Увеличение степени замещения бария кальцием приводит к уменьшению концентрации носителей заряда («дырок») и росту их подвижности в фазах $NdBa_{1-x}Ca_xFeCo_{0,5}Co_{0,5}O_{5+\delta}$.

Слоистые кислороддефицитные двойные перовскиты $LnBaMe'Me''O_{5+\delta}$ ($Ln-Y$, редкоземельный элемент (РЗЭ), Me' , Me'' – $3d$ -металл) обладают комплексом уникальных свойств, включая высокие значения электропроводности и термо-ЭДС, и содержат в своей структуре лабильный (слабосвязанный) кислород, поэтому могут быть использованы в качестве функциональных материалов различного назначения: высокотемпературных оксидных термоэлектриков, электродных материалов для твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), материалов для рабочих элементов полупроводниковых химических газовых сенсоров, катализаторов окисления углеводородов и др. [1, 2]. Электротранспортные характеристики керамики на основе слоистых перовскитов могут быть улучшены за счет частичного замещения ионов металлов в ее структуре. В данной работе изучено влияние частичного изовалентного замещения бария кальцием в $NdBa(Fe,Co,Cu)_2O_{5+\delta}$ на электротранспортные свойства этой фазы.

Образцы твердых растворов $NdBa_{1-x}Ca_xFeCo_{0,5}Co_{0,5}O_{5+\delta}$: $x = 0,00; 0,05, 0,10, 0,40$ были получены по керамической технологии из Nd_2O_3 (НО-Л), $BaCO_3$ (ч.), $CaCO_3$ (ч.), Fe_2O_3 (ос.ч.), CuO (ч.д.а.), Co_3O_4 (ч.), которые смешивали в среде этилового спирта при помощи мельницы Pulverizette 6.0 (Fritsch), прессовали и отжигали на воздухе 40 ч при 1173 К. Спеченные образцы после повторного помола прессовали и спекали на воздухе при температуре 1273 К в течение 9 часов.

Идентификацию образцов проводили с помощью рентгенофазового анализа (РФА, дифрактометр Bruker D8 XRD Advance, $\text{CuK}\alpha$ -излучение) и ИК-спектроскопии поглощения (ИК-Фурье спектрометр Nexus, Thermo Scientific). Значения кажущейся плотности образцов определяли по их геометрическим размерам. Исследование термической стабильности производили на воздухе (300–1100 К, 5 °С/мин., термоаналитическая система TGA/DSC-1/1600 HF). Удельную электропроводность и коэффициент термо-ЭДС керамики определяли на воздухе в интервале температур 300–1100 К. До измерений электрических свойств на поверхности образцов формировали серебряные электроды путем вжигания серебряной пасты при 1100 К в течение 5 мин.

По результатам РФА установлено, что исследуемые образцы были однофазными и имели характерную для слоистых перовскитов тетрагональную структуру (пр. гр. симм. $P4/mmm$). Параметры элементарной ячейки фаз и энергии металл-кислородных взаимодействий в их структуре с ростом x изменялись незначительно. Согласно результатам термического анализа, выделение слабосвязанного кислорода (δ) из образцов начиналось при $T = 650\text{--}730$ К, причем величина потери массы уменьшалась с ростом x . Значения кажущейся плотности керамики были близки, за исключением состава $x = 0,05$, характеризующегося наибольшей пористостью (табл.).

Исследованные материалы представляют собой полупроводники p -типа, причем для составов $x = 0,00, 0,05$ характер проводимости при 725–735 К изменялся на металлический, что сопровождалось возрастанием коэффициента термо-ЭДС (рис. 1а, б) и было обусловлено выделением из образцов слабосвязанного кислорода. Максимум на зависимостях $S = f(T)$ для составов $x = 0,10, 0,40$ вблизи 410–415 К обусловлен, по всей видимости, изменением спинового состояния ионов кобальта в структуре этих фаз [3]. Увеличение степени замещения бария кальцием приводило к снижению удельной электропроводности и возрастанию коэффициента термо-ЭДС твердых растворов $\text{NdBa}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeCo}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_{5+\delta}$ (рис. 1в, з).

Рассчитанные по уравнениям $\sigma_0 = (A/T) \cdot \exp(-E_\sigma/kT)$, $S = (k/e)(-E_S/kT + B)$ и $E_\sigma = E_S + E_m$ значения параметров электропереноса (E_σ , E_S , E_m) приведены в таблице.

Таблица – Значения кажущейся плотности ($\rho_{\text{каж}}$) и параметров электропереноса (E_σ , E_S , E_m , E_n) твёрдых растворов $\text{NdBa}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeCo}_{0,5}\text{Cu}_{0,5}\text{O}_{5+\delta}$

x	$\rho_{\text{каж}}$, г/см ³	E_σ , эВ	E_S , эВ	E_m , эВ	E_n , эВ
0.00	6,17	0.254	0.048	0.206	0,348
0.05	4,96	0.213	0.049	0.164	0,306
0.10	6,20	0.194	0.042	0.152	0,388

На основании полученных значений удельной электропроводности и коэффициента термо-ЭДС по методике [4] были рассчитаны значения взвешенной подвижности носителей заряда (μ_v), а при помощи уравнения $\sigma = e \cdot n \cdot \mu_v$ (e – заряд электрона) – значения концентрации носителей заряда («дырок») (n) в фазах $\text{NdBa}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeCo}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_{5+\delta}$. Установлено, что в интервале температур 400–1000 К значения μ_v изменялись в пределах 0,2–1,5 см²/(В·с), уменьшались при возрастании температуры и увеличивались при замещении бария кальцием (рис. 2а, в). Концентрация носителей заряда в $\text{NdBa}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeCo}_{0,5}\text{Cu}_{0,5}\text{O}_{5+\delta}$ в том же интервале температур изменялась в пределах $(6\text{--}270) \cdot 10^{19}$ см⁻³, возрастала при увеличении температуры и снижалась при увеличении степени замещения бария кальцием (рис. 2б, з). Рассчитанные из зависимостей $n = f(T)$ значения энергии активации носителей заряда (E_n) изменялись в пределах 0,306–0,388 эВ (табл.).

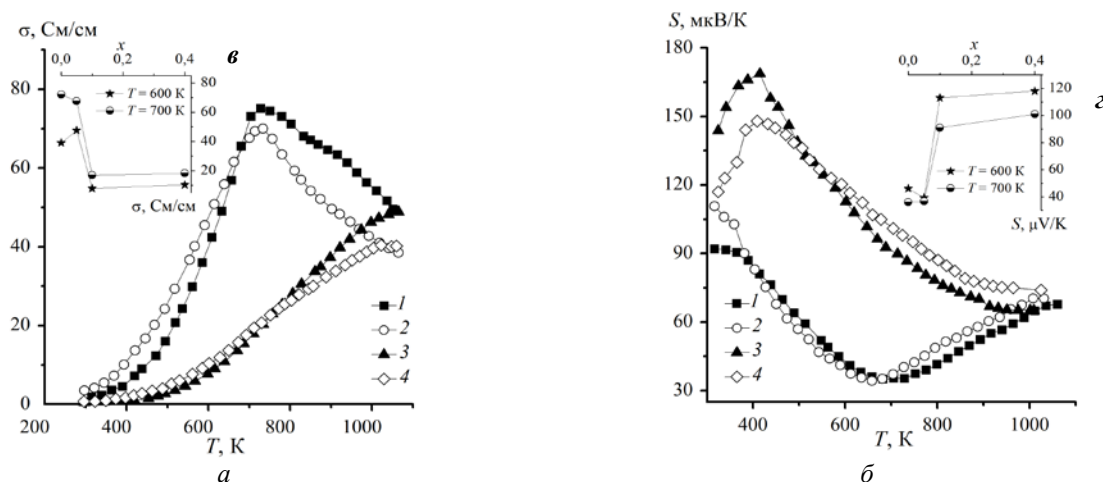


Рисунок 1 – Температурные (а, б) и концентрационные (в, з) зависимости удельной электропроводности (а, в) и коэффициента термо-ЭДС (б, з) керамики состава $\text{NdBa}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeCo}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_{5+\delta}$: $x = 0,00$ (1); 0,05 (2), 0,20 (3), 0,40 (4)

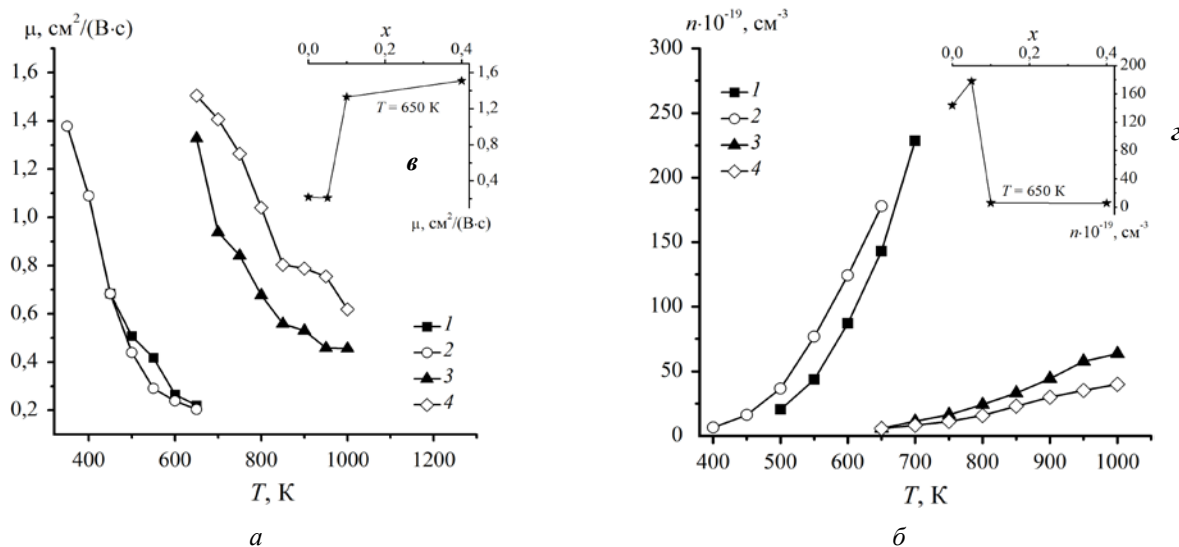


Рисунок 2 – Температурные (а, б) и концентрационные (в, г) зависимости взвешенной подвижности (а, в) и концентрации носителей заряда (б, г) керамики состава $\text{NdBa}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeCo}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$: $x = 0,00$ (1); $0,05$ (2), $0,10$ (3), $0,40$ (4)

Список литературы

1. Klyndyuk, A. I. Layered Oxygen-Deficient Double Perovskites as Promising Cathode Materials for Solid Oxide Fuel Cells / A. I. Klyndyuk, E. A. Chizhova, D. S. Kharytonau, D. A. Medvedev // Materials. – 2022. – Vol. 15, № 1. – P. 141.
2. Сенсорные и каталитические свойства твердых растворов на основе YBaCuFeO_5 / Е. А. Чинова [и др.] // Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 нояб. 2003 г. – Минск : БГТУ, 2003. – С. 317–319.
3. Клындюк, А. И. Синтез и свойства $\text{LnBaFeCoO}_{5+\delta}$ (Ln – Nd, Sm, Gd) / А. И. Клындюк, Е. А. Чинова // Неорганические материалы. – 2013. – Т. 49, № 3. – С. 326–332.
4. Weighted Mobility / G. J. Snyder [et al.] // Adv. Mater. – 2020. – Vol. 35. – P. 200153.

$\text{NdBa}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeCo}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$ ($0,00 \leq x \leq 0,40$) solid solutions were synthesized using ceramic method, their structure and electrotransport properties were studied. The synthesized materials were *p*-type semiconductors, which electrical conductivity decreased, but thermo-EMF coefficient increased with *x* increasing. An increase of substitution degree of barium by calcium lead to a decrease in the concentration of charge carriers («holes») and an increase in their mobility in $\text{NdBa}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeCo}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_{5+\delta}$ double perovskites.

Журавлёва Яна Юрьевна, магистрант, Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь, ya.yu.zhuravleva@mail.ru.

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

УДК 37.016:53

М. Д. ЗАВАДСКИЙ

ДИДАКТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕРАКТИВНОЙ ПРЕЗЕНТАЦИИ В ПРОЦЕССЕ РЕШЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Раскрыто понятие презентации, мультимедийной презентации, интерактивной презентации. Описаны дидактические возможности использования интерактивной презентации в процессе решения физических задач. На примере решения задачи по разделу «Электростатика» показаны преимущества и особенности использования интерактивной презентации при объяснении способа расчета результирующей силы, действующей на заряд со стороны системы зарядов.

В процессе обучения физике важное место занимает решение задач. Решение задач позволяет формировать у обучающихся глубокое понимание сущности физических понятий и явлений, формировать умения и навыки применять физические законы к описанным в задаче ситуациям, а также развивать аналитическое мышление [1]. Эффективным средством обучения решению физических задач может выступить интерактивная презентация. Несмотря на осознание методической значимости использования презентаций в

процессе обучения физике, учителя редко их используют в учебном процессе. Это происходит по разным причинам: во-первых, разработка качественной презентации требует затрату временных ресурсов; во-вторых, большинство учителей не умеют создавать интерактивные презентации; в-третьих, в методической литературе не уделено должного внимания дидактическим возможностям использования интерактивной презентации в процессе обучения физике, в частности, на этапе решения задач. Однако, несмотря на то, что создание презентации – процесс творческий и трудоёмкий, его результаты можно использовать многократно.

Презентация – это набор слайдов, объединённых общей темой и хранящихся в общем файле. В одной презентации может быть произвольное число слайдов. Слайд – относительно автономная информационная структура. Она содержит различные объекты, которые представляются на общем экране в виде единой композиции. Мультимедийная презентация позволяет использовать текст, графику, видео и мультипликацию в интерактивном режиме [2].

Мультимедийная презентация может включать в себя интерактивные объекты, размещённые на слайдах для обучающих целей: кнопки, гиперссылки, триггеры, всплывающие подсказки. Эти объекты позволяют управлять содержанием презентации в целом и содержанием слайда в частности, например, поэтапно выводить рисунки и формулы в процессе решения задач. Презентация с описанными настройками становится интерактивной и может быть использована для работы на интерактивной доске. Это значит, что учитель может легко и быстро управлять презентацией, не отвлекаясь во время работы на компьютер, клавиатуру и мышь. В то же время, работа с презентацией на интерактивной доске позволит учителю сохранить визуальный и эмоциональный контакт с классом.

Презентация является уникальным средством обучения решению физических задач, предоставляющим учителю широкие возможности для управления учебно-познавательной деятельностью обучающихся и содействующим повышению эффективности урока решения задач [3]. Рассмотрим дидактические возможности использования интерактивной презентации в процессе решения физических задач.

1. Интерактивная презентация является средством наглядности и позволяет демонстрировать качественные изображения, сопровождающие решение задач. Это могут быть рисунки, формулы, пояснительный текст, анимации, графики. Рисунки, выполняемые мелом на доске, не всегда получаются аккуратными и четкими, в то время как, возможности презентации позволяют создавать яркие, чёткие и цветные иллюстрации для условия и решения задачи. Таким образом, использование презентации способствует эстетическому воспитанию за счёт применения компьютерной графики, технологии мультимедиа.

2. В процессе решения задачи важно акцентировать внимание обучающихся на ключевые моменты решения. Презентация позволяет создавать смысловое акцентирование представленного на слайде решения задачи. Это можно сделать за счёт дополнительных эффектов анимации иллюстраций решения задачи, выделения важных формул с помощью цвета или увеличения их размеров. Например, при выражении неизвестной физической величины из полученной при решении задачи формулы, можно выделить ярким цветом искомую величину, чтобы сакцентировать внимание на нее.

3. Педагогической ценностью обладают гиперссылки в презентациях. Они позволяют поэтапно выводить решение задачи. Например, постепенно строить график, электрическую схему или другой необходимый для решения задачи рисунок, поэтапно выводить на экран формулы и другую пояснительную информацию. Таким образом, гиперссылки позволяют эффективнее управлять процессом решения задач.

4. Применение интерактивных презентаций в процессе решения задач позволяет рационально использовать время урока. Это является важным достоинством презентации в сравнении с другими наглядными средствами обучения. Экономия времени происходит за счёт быстрого построения сложных рисунков и быстрой записи формул. Учитель может без потери времени многократно возвращаться к различным этапам решения задачи. Кроме того, презентация может располагаться в доступном для учеников месте для того, чтобы они могли и в домашних условиях разобрать решение задачи.

5. Использование презентации на уроке решения задач способствует повышению интереса к процессу решения задач, задействованию чувств и эмоций обучающихся.

Рассмотрим на примере решения задачи по разделу «Электростатика» (10 класс) преимущества и особенности использования интерактивной презентации. Одно из важных умений, которое необходимо сформировать у обучающихся при изучении данного раздела, – это умение определять направление и значение результирующей силы, действующей на заряд со стороны остальных зарядов. Решение задачи на определение результирующей силы предполагает, в первую очередь, выполнение рисунка, на котором должна быть изображена система зарядов, отмечены расстояния между зарядами, а так нарисованы силы, действующие на рассматриваемый заряд со стороны остальных зарядов.

Условие задачи. В вершинах равностороннего треугольника, сторона которого $a = 50$ м, находятся одинаковые заряды $q = 0,32$ мкКл. Чему равен модуль силы, действующей на один из них?

На рисунке представлены слайды презентации, позволяющие учителю наглядно, доступно, последовательно и системно объяснить решение данной задачи, а также рассказать алгоритм решения задач данного типа. Основной алгоритм для решения представленной задачи включает следующие этапы.

Необходимо нарисовать систему зарядов и обозначить расстояния между зарядами. Далее необходимо нарисовать вектора сил, действующих на выбранный заряд со стороны остальных зарядов, а также написать формулы для их вычисления по закону Кулона. Следующим этапом решения задачи должно стать векторное сложение сил и иллюстрация направления искомой результирующей силы. Затем необходимо рассмотреть получившийся силовой векторный треугольник. Анализ треугольника позволит определить значение угла напротив неизвестной стороны треугольника. Зная данный угол, можно по теореме косинусов рассчитать неизвестную величину.

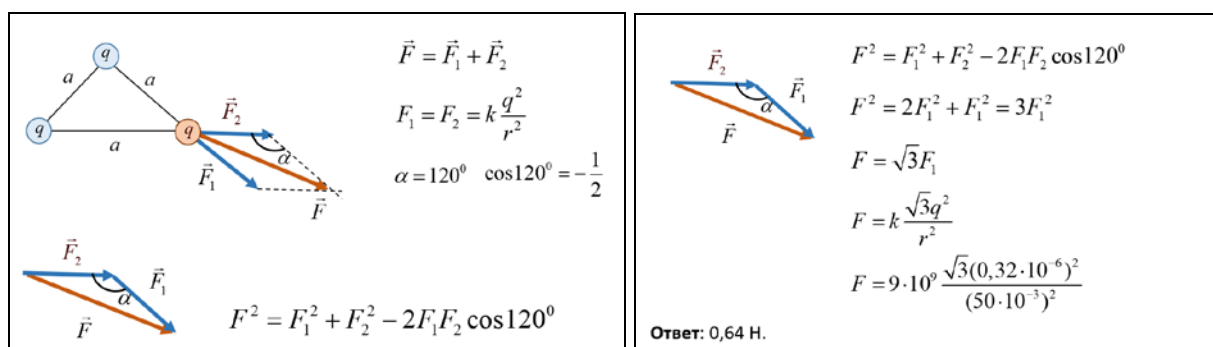


Рисунок – Решение задачи по разделу «Электростатика»

Дидактическая ценность разработанной презентации заключается в следующих аспектах:

1. Презентация разработана таким образом, чтобы у учителя была возможность поэтапно выводить информацию на слайды. На каждый элемент рисунка, а также на каждую формулу наложена анимация появления объекта. Такой подход позволяет доступно объяснить, как определить направление результирующей силы, действующей на третий заряд со стороны остальных зарядов. Поэтапный вывод формул при решении задачи позволяет подробно и доступно показать, как выполнено упрощение выражения для расчёта результирующей силы.

2. При разработке презентации был реализован дидактический принцип наглядности. Рисунки к решению задачи, а также формулы выполнены четко и оформлены аккуратно. Формулы вставлены с помощью специального редактора для формулы. Рисунки выполнены с помощью вставки фигур программы для создания презентаций.

3. При выполнении иллюстрации к решению задачи использовались возможности смыслового акцента. Для этого заряд, который рассматривался в решении задачи, окрашен оранжевым цветом, а остальные заряды окрашены синим цветом. Вектора сил, действующих на третий заряд со стороны двух зарядов, окрашены синим цветом для того, чтобы ученики понимали, со стороны каких зарядов действуют эти силы. Вектор результирующей силы имеет цвет заряда, к которому он приложен. Таким образом, цветовая окраска иллюстрации к решению задачи позволяет повысить его наглядность, четко выделить этапы решения задачи.

4. В данной презентации отдельным рисунком выполнен силовой треугольник. Такой подход позволяет ученикам отделить физический этап решения задачи от математического. Рассмотрев отдельно треугольник, можно прийти к выводу о том, что для нахождения его неизвестной стороны, необходимо воспользоваться теоремой косинусов.

Таким образом, исследования дидактических возможностей интерактивных презентаций, разработанных для решения задач на уроках физики, показали, что такие презентации могут стать эффективным средством для обучения решению физических задач и позволяют реализовать такие возможности, как наглядное представление условия и решения задачи; смысловое акцентирование иллюстраций и решения задачи; организация через гиперссылки эффективного управления процессом решения задачи; рациональное использование времени на уроках решения задач; повышение интереса к процессу решения задач.

При организации урока решения задач учителю необходимо предварительно подготовить интерактивные презентации, позволяющие объяснить метод, алгоритм или принцип решения нового типа задач. Такой подход к организации урока способствует успешному формированию у учащихся умений применять теоретические знания в практических ситуациях, повышает наглядность и доступность процесса решения задач, позволяет разоборать с обучающимися большее число задач, чем при традиционном подходе организации урока решения задач.

Список литературы

1. Шефер, О. Р. Методика формирования у учащихся умений комплексно применять знания для решения физических задач : моногр. / О. Р. Шефер. – Челябинск : ИИУМЦ «Образование», 2009. – 135 с.
2. Запрудский, Н. И. Современные школьные технологии – 2 / Н. И. Запрудский. – Минск : Сэр-Вит, 2010. – 256 с.
3. Урок-презентация / авт.-сост.: В. Н. Пунчик, Е. П. Семенова, Н. Н. Пунчик. – Минск : Красико-Принт, 2009. – 176 с.

The concept of presentation, multimedia presentation, interactive presentation is disclosed. The didactic possibilities of using an interactive presentation in the process of solving physical problems are described. Using the example of solving the problem in the «Electrostatics» section, the advantages and features of using an interactive presentation are shown when explaining the method for calculating the resulting force acting on a charge from the system of charges.

Завадский Максим Дмитриевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, zavadskii Maksim1@gmail.com.

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

УДК 539.2/669(2-8)

Д. А. ЗЕРНИЦА

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ОСОБЕННОСТИ ПРОТЕКАНИЯ РАСПАДА В ФОЛЬГАХ СИСТЕМЫ «ОЛОВО–ЦИНК», ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ИЗ РАСПЛАВА

Представлены результаты исследования кристаллизации быстрозатвердевших фольг сплавов Sn-Zn. Установлено, что твёрдые растворы являются пересыщенными. Дисперсные выделения фаз, распределённые в матрице, появились в результате распада пересыщенного твёрдого раствора. Наряду с дисперсными частицами присутствуют крупные выделения первичного цинка, имеющие малую долю в объёме, и появившиеся при начальном этапе кристаллизации.

В последние десятилетия в электронной промышленности возникла серьезная задача перехода на бессвинцовую пайку. В настоящее время очевидно, что достойной заменой токсичным припоям, содержащих Pb, Cd, и др., могут стать сплавы на основе олова, содержащие цинк. Внимание к ним определяется практической значимостью, что связано с возможностью использования таких сплавов в качестве материалов для бессвинцовой пайки.

Высокоскоростное затвердевание как технология получения материалов, относящаяся к энерго- и ресурсосберегающей, позволяет изготавливать тонкие фольги, имеющие ряд отличительных особенностей от структур литых сплавов, получаемых с низкими скоростями охлаждения [1]. Известно, что при сверхбыстрой кристаллизации на начальной стадии происходит образование пересыщенного твердого раствора, а затем может протекать его распад [2]. К сожалению, в настоящее время вопрос формирования структур и распад пересыщенных твёрдых растворов сплавов Sn-Zn остаётся малоизученным, однако именно механизмы распада твёрдых растворов определяют свойства материала. В связи с этим целью настоящей работы является исследование формирования структуры сплавов системы Sn-Zn при высокоскоростной кристаллизации.

Быстрозатвердевшие фольги получались согласно методике, описанной нами в работе [3]. Методом растровой электронной микроскопии установлено формирование дисперсных частиц цинка в структуре быстрозатвердевших фольг (рис. 1). Частицы цинка (рис. 1а–г) имеют равноосную форму, и однородно распределены в фольге, что видно на поперечном срезе фольги. Пластинчатая структура в не наблюдается, что является важным фактором, поскольку её отсутствие улучшает пластические свойства материалов и не способствует хрупкому разрушению. С увеличением содержания цинка в сплавах доля частиц увеличивается, они укрупняются, и форма от равноосной сменяется на более вытянутую. Кристаллизация сплавов Sn-Zn вблизи эвтектических областей имеет следующую последовательность: при достижении некоторой температуры расплава происходит выделение первичного α -Zn из жидкого раствора.

На микрофотографиях структур в поперечном сечении (рис. 1б, в) картины похожи: наблюдаются крупные выделения Zn, выделившиеся из расплава первыми. При выделении первичного цинка состав расплава изменяется: концентрация Zn в расплаве уменьшается. По мере достижения состава происходит одновременное выделение цинка и олова, т. е. протекает эвтектическое превращение.

Отметим, что помимо этих частиц наблюдаются более дисперсные выделения цинка. Следовательно, при выделении цинка его концентрация в расплаве должна уменьшиться, и раствор обедняется цинком. Следовательно, если в чистом олове растворено небольшое количество цинка, то образуется пересыщенный твёрдый раствор на основе олова. В силу того, что твёрдый раствор пересыщен, комнатные температуры для него являются высокими, и из твёрдого раствора выделяется цинк. Подобный механизм протекает и в областях составов менее 4 мас. % Zn.

Кристаллизация быстрозатвердевших сплавов цинк-олово с малым содержанием олова подобен процессу, рассмотренному выше. Процесс кристаллизации начинается с выделением цинка, который захватывает олово, и затем из этого сплава образуется пересыщенный твёрдый раствор. Белые участки в структуре поперечного сечения (рис. 1д, е) означают максимальную концентрацию олова. Однако утверждать, что фаза цинка не

пересыщена оловом, нельзя. Тёмные выделения на микрофотографии соответствуют твёрдому раствору на основе цинка, который является пересыщенным, и из него постепенно выделяется олово, формируя белые выделения. Аналогичный процесс протекает и в быстротвердевших сплавах с более высокими концентрациями олова.

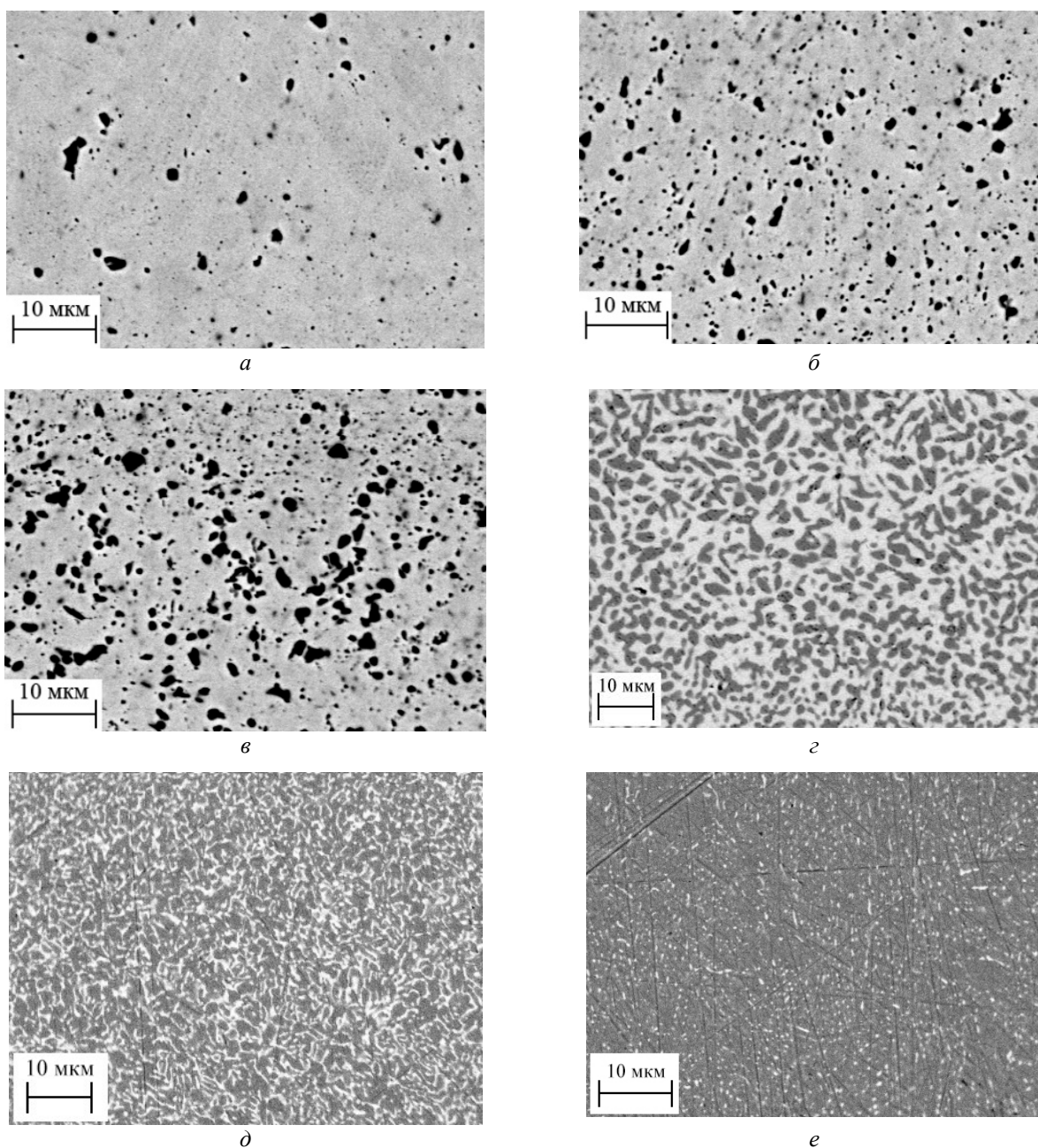


Рисунок 1 – Изображения микроструктур быстротвердевших фольг сплавов, содержащих 4,4 (а), 8,8 (б), 15 (в), 40 (г), 80 (д), 95 (е) мас. % Zn

Рассмотрим формирование структуры в быстротвердевших сплавах Sn-Zn с равными значениями объёмных долей ($c \sim 50/50$ мас. %). При достижении температуры ликвидуса начинает выделяться Zn, что приводит к изменению состава. Частицы цинка увеличиваются, и одновременно протекает эвтектическое превращение, сопровождающееся выделением смеси Zn-Sn. Из переохлаждённого расплава выделяется белая масса, являющаяся смесью олова и цинка, из которой в последующем выделяется олово. Олово пересыщено цинком, что подтверждается наличием чёрных дисперсных точек (рис. 1г), соответствующих фазе цинка.

Протекание распада фиксировалось по изменению среднего значения микротвёрдости и параметра элементарных ячеек a и c (Å) раствора олова. Параметр a_{Sn} имеет тенденцию увеличиваться с увеличением

времени выдержки при $t_{\text{комн}}$. При высокой скорости охлаждения расплава происходит его сильное переохлаждение и цинк захватывается при кристаллизации олова. При этом образуется пересыщенный твёрдый раствор цинка в олове, что и обуславливает уменьшение параметра кристаллической решётки.

Комнатная температура является высокой для олова, и при ней происходят диффузионные процессы, которые приводят к постепенному распаду пересыщенного твёрдого раствора, сопровождаемому увеличением его параметра кристаллической решётки, что наблюдается экспериментально.

Список литературы

1. Garcia, L. R. Mechanical properties of Sn–Zn lead-free solder alloys based on the microstructure array / L. R. Garcia, W. R. Osório, L. C. Peixoto, A. Garcia // Mater. Charact. – 2010. – Vol. 61 (2). – P. 212–220.
2. Васильев, В. А. Высокоскоростное затвердевание расплава (теория, технология и материалы) / В. А. Васильев, Б. С. Митин, И. Н. Пашков ; под ред. Б. С. Митина. – М. : Интермет инжиниринг, 1998. – 400 с.
3. Shepelevich, V. G. The Formation of the Structure of the Alloys of the Tin–Zinc System upon High-Speed solidification / V. G. Shepelevich, D. A. Zernitsa // Inorganic Materials: Applied Research. – 2021. – Vol. 12, No. 4. – P. 1094–1099.

The paper presents the results of a study of the crystallization of rapidly solidified foils of Sn–Zn alloys. It is established that solid solutions are supersaturated. Dispersed phases distributed in the matrix appeared as a result of the decomposition of a supersaturated solid solution. Along with dispersed particles, there are large precipitates of primary zinc, which have a small fraction in volume and appeared at the initial stage of crystallization.

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

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

УДК 539.1.044:544.174

П. В. КАРПАЧ, К. В. ЖУРАВСКАЯ

СПЕКТРЫ ИК-ПОГЛОЩЕНИЯ И СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ФОТОХРОМНОГО ДИАРИЛЭТЕНА В ПЛЁНКАХ

Методами спектроскопии инфракрасного (ИК) поглощения и квантовой химии изучены структура и фотохромные превращения диарилэтена в твердофазных пленках.

Термостабильные диарилэтены (ДАЭ) [1] являются одним из наиболее перспективных классов (наряду со спироциклическими соединениями [2] и фульгидами) фотохромных соединений для применения в устройствах молекулярной электроники и фотоники в качестве фотоуправляемых переключателей [3, 4] и сред памяти с высокой плотностью записи информации.

Фотохромизм ДАЭ состоит в обратимой валентной изомеризации, т. е. в фотоиндуцированном переходе из открытой формы А в циклическую форму В (рисунок 1). Открытый бесцветный изомер ДАЭ (А), поглощая УФ-излучение, превращается в окрашенный (циклический) изомер ДАЭ (В), который под действием видимого излучения, поглощаемого им, снова превращается в исходный открытый изомер. Эти превращения осуществляются только под действием света, поглощаемого соответствующими формами. Они являются термически необратимыми, поскольку термическая релаксация фотоиндуцированного циклического изомера ДАЭ (В) в исходную открытую форму при комнатной температуре не реализуется.

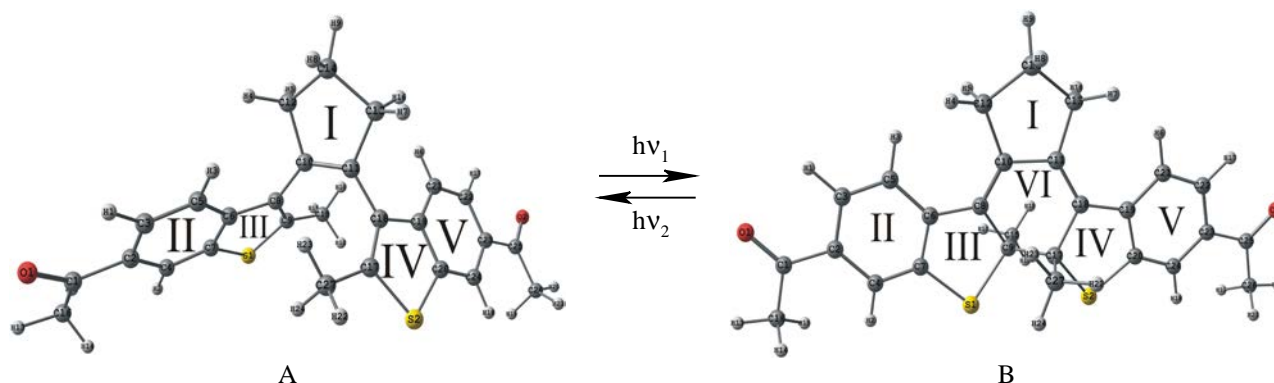


Рисунок 1 – Схема фотохромных превращений ДАЭ1

В настоящей работе с применением методов спектроскопии инфракрасного (ИК) поглощения и квантовой химии исследованы фотоиндуцированные изменения молекулярной структуры фотохромного соединения ДАЭ1 из класса циклопентеновых производных ДАЭ в твердофазных пленках. Спектры ИК-поглощения ДАЭ1 (рисунок 2) регистрировались с применением ИК-Фурье спектрометра Nicolet iS10 (Thermo Scientific, США).

При интерпретации ИК-спектров использовались результаты квантово-химических расчетов молекулы исследуемого диарилэтена. Квантово-химические расчеты выполнены с использованием программного пакета PC GAMESS 7.1.G (Firefly). Равновесная геометрия (рисунок 1) и колебательные спектры молекулы ДАЭ1 рассчитаны с использованием теории функционала плотности (DFT), гибридного функционала PBE0. Расчет ИК спектров молекул (таблица 1) проводился *abinitio* методом с использованием базиса 6-31G.

В расчетных спектрах ИК-поглощения открытого (рисунок 3, кривая 1) и циклического (рисунок 3, кривая 2) изомеров ДАЭ1 наблюдаются значительные различия. Так, в результате фотоциклизации молекулы ДАЭ1 появляются интенсивные полосы около 1235, 1270 и 1589 см^{-1} .

В экспериментальных спектрах ИК-поглощения (рисунок 2) наиболее интенсивны полосы около 1250, 1280, 1356, 1396 и 1593 см^{-1} , относящиеся к деформационным колебаниям связанных колец, а также около 1679 см^{-1} , основной вклад в которую вносят валентные колебания связи $\text{O}_1\text{-C}_1$.

Анализ экспериментальных ИК-спектров пленок ДАЭ1 позволяет говорить о проявлении обратимых фотохромных превращений в этих спектрах, происходящих в результате облучения пленок УФ и видимым излучением. Об этом свидетельствует появление и исчезновение полос, а также перераспределение относительной интенсивности и смещение полос ИК-поглощения. Например, появление после УФ-облучения полос при 594 см^{-1} , 1549 см^{-1} , 1578 см^{-1} (рисунок 1), вклад в которые вносят колебания связи ($\text{C}_9\text{-C}_{17}$), участвующей в реакции обратимой фотоизомеризации молекулы ДАЭ1.

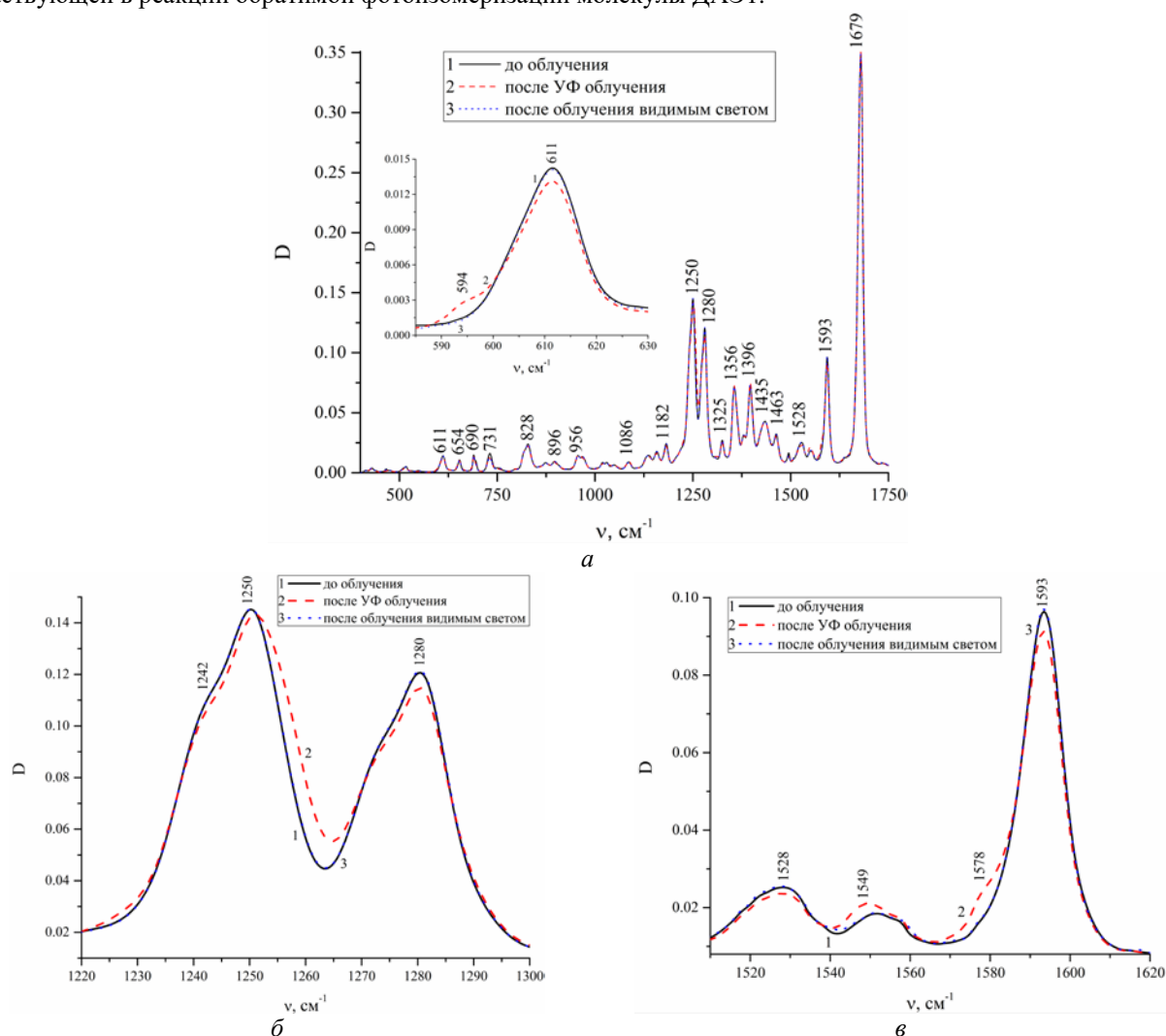


Рисунок 2 – Спектры ИК-поглощения ДАЭ1 в твёрдофазной плёнке (а) и их фрагменты (б, в) до (1), после УФ-облучения ($\lambda = 365 \text{ nm}$) (2) и после облучения видимым светом ($\lambda = 514 \text{ nm}$) (3)

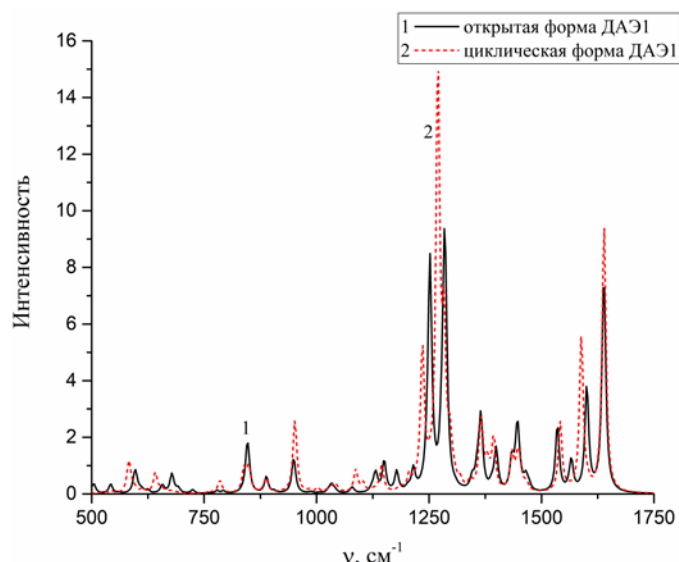


Рисунок 3 – Расчётные спектры ИК-поглощения открытого (1) и закрытого (2) изомеров ДАЭ1

Таблица 1 – Экспериментальные ν_{exp} и расчётные ν_{calc} значения частот колебаний ИК-спектра открытой и циклической форм молекулы диарилэтена ДАЭ1 и их отнесение

$\nu_{\text{exp}}, \text{см}^{-1}$	Циклич. $\nu_{\text{calc}}, \text{см}^{-1}$	Открыт. $\nu_{\text{calc}}, \text{см}^{-1}$	Тип колебания
594	582		$\delta(\text{I, II, III, IV, V, VI}); \delta(\text{O}_1\text{C}_{11}\text{C}_{16}, \text{O}_2\text{C}_{25}\text{C}_{26})$
	586		$\delta(\text{I, II, V, VI}); \delta(\text{O}_1\text{C}_{11}\text{C}_{16}, \text{O}_2\text{C}_{25}\text{C}_{26})$
611		596	$\delta(\text{V}); \delta(\text{O}_2\text{C}_{25}\text{C}_{26}); \rho(\text{C}_{26}\text{H})$
		612	$\tau(\text{II, III, IV, V}); \rho(\text{C}_{16}\text{H}, \text{C}_{26}\text{H})$
		624	$\delta(\text{I}); \tau(\text{I}); \rho(\text{C}_{12}\text{H}, \text{C}_{13}\text{H}, \text{C}_{14}\text{H})$
828	849		$\delta(\text{I, III, IV, V}); \tau(\text{I, II, VI}); \rho(\text{CH})$
		845	$\delta(\text{I}); \tau(\text{II}); \rho(\text{CH})$
		846	$\delta(\text{I}); \tau(\text{V}); \rho(\text{CH})$
		849	$\delta(\text{I}); \tau(\text{II, V}); \rho(\text{CH})$
875	870		$\tau(\text{VI}); \nu(\text{C}_9\text{C}_{17})$
1250		1248	$\delta(\text{II, III}); \nu(\text{C}_1\text{C}_2); \delta(\text{O}_1\text{C}_1\text{C}_{16}); \rho(\text{CH})$
		1252	$\delta(\text{IV, V}); \nu(\text{C}_{23}\text{C}_{25}); \delta(\text{O}_2\text{C}_{25}\text{C}_{26}); \rho(\text{CH})$
	1250		$\delta(\text{I, VI}); \nu(\text{C}_9\text{C}_{17}, \text{C}_{10}\text{C}_{11}); \rho(\text{C}_{12}\text{H}, \text{C}_{13}\text{H}, \text{C}_{14}\text{H})$
	1270		$\delta(\text{I, II, III, IV, V, VI}); \nu(\text{C}_1\text{C}_2, \text{C}_6\text{C}_8, \text{C}_{18}\text{C}_{19}, \text{C}_{23}\text{C}_{25}); \rho(\text{C}_{12}\text{H}, \text{C}_{13}\text{H}, \text{C}_{14}\text{H})$
1255	1272		$\delta(\text{II, III, IV, V, VI}); \nu(\text{C}_9\text{C}_{17}, \text{C}_1\text{C}_2, \text{C}_6\text{C}_8, \text{C}_{18}\text{C}_{19}, \text{C}_{23}\text{C}_{25}, \text{C}_7\text{S}_1, \text{C}_{20}\text{S}_2); \rho(\text{CH})$
1280	1283		$\delta(\text{I, II, III, IV, V, VI}); \nu(\text{C}_6\text{C}_8, \text{C}_{23}\text{C}_{25}); \rho(\text{C}_{12}\text{H}, \text{C}_{13}\text{H}, \text{C}_{14}\text{H}); \delta(\text{O}_1\text{C}_{11}\text{C}_{16}, \text{O}_2\text{C}_{25}\text{C}_{26})$
		1284	$\delta(\text{I}); \rho(\text{C}_{12}\text{H}, \text{C}_{13}\text{H}, \text{C}_{14}\text{H})$
		1288	$\delta(\text{II}); \nu(\text{C}_1\text{C}_2); \delta(\text{CH}); \delta(\text{O}_1\text{C}_{11}\text{C}_{16})$
1356		1357	$\delta(\text{I, II, III, IV, V}); \nu(\text{C}_8\text{C}_{10}, \text{C}_{11}\text{C}_{18}); \rho(\text{C}_{12}\text{H}, \text{C}_{13}\text{H}); \delta(\text{CH})$
	1364	1364	$\nu(\text{C}_{25}\text{C}_{26}); \rho(\text{C}_{26}\text{H})$
	1367	1366	$\nu(\text{C}_1\text{C}_{16}); \rho(\text{C}_{16}\text{H})$
	1394		$\delta(\text{II, III, IV, V}); \nu(\text{C}_3\text{C}_5, \text{C}_4\text{C}_7, \text{C}_{21}\text{C}_{22}, \text{C}_{20}\text{C}_{24}); \delta(\text{CH})$
1396		1398	$\delta(\text{II, III, IV, V}); \delta(\text{CH})$
		1400	$\delta(\text{II, III, IV, V}); \rho(\text{C}_{15}\text{H}, \text{C}_{27}\text{H}); \delta(\text{CH})$
1549	1562		$\delta(\text{I, III, IV, VI}); \nu(\text{C}_8\text{C}_{10}, \text{C}_{11}\text{C}_{18})$
1578	1589		$\delta(\text{II, V, VI}); \nu(\text{C}_{21}\text{C}_{22}, \text{C}_3\text{C}_5, \text{C}_4\text{C}_7, \text{C}_6\text{C}_8, \text{C}_8\text{C}_{19}, \text{C}_{20}\text{C}_{24})$
1593		1566	$\delta(\text{II, III, IV, V}); \nu(\text{C}_2\text{C}_4, \text{C}_8\text{C}_9, \text{C}_{17}\text{C}_{18}, \text{C}_{19}\text{C}_{21}, \text{C}_{23}\text{C}_{24})$
		1601	$\delta(\text{IV, V}); \delta(\text{CH})$
1679	1638	1638	$\nu(\text{C}_1\text{O}_1, \text{C}_2\text{O}_2); \rho(\text{C}_{26}\text{H})$
	1639	1639	$\nu(\text{C}_1\text{O}_1, \text{C}_{25}\text{O}_2); \rho(\text{C}_{16}\text{H})$
	1644		$\delta(\text{I}); \nu(\text{C}_8\text{C}_{10}, \text{C}_{11}\text{C}_{18})$

Примечание: ν – валентное колебание, δ – плоские деформационные колебания кольца или связи, ρ – неплоские деформационные колебания связи, τ – неплоские деформационные колебания кольца.

Список литературы

1. Irie, M. Photochromism of diarylethene molecules and crystals: memories, switches, and actuators / M. Irie, T. Fukaminato, K. Matsuda, S. Kobatake // Chem. Rev. – 2014. – Vol. 114. – P. 12174–12277.
2. Карпач, П. В. ИК-спектры фотохромного индолинового спиропирана / П. В. Карпач // Физика конденсированного состояния : материалы XXVI междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов / ГрГУ им. Янки Купалы ; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2018. – С. 39–41.
3. Карпач, П. В. Модуляция флуоресценции фотохромного нанокompозита на основе квантовых точек / П. В. Карпач // Физика конденсированного состояния [Электрон. ресурс] : материалы XXVII междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 18 апр. 2019 г.) / ГрГУ им. Янки Купалы ; редкол.: А. Е. Герман (гл. ред.) [и др.]. – Объем электрон. дан. 47,5 Мбайт. – 30,0 уч.-изд. л. – Гродно : ГрГУ, 2019. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
4. Карпач, П. В. Спектры ИК-поглощения флуоресцентных фотохромных наноструктур / П. В. Карпач // Физика конденсированного состояния [Электрон. ресурс] : материалы XXVIII междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 17 апр. 2020 г.) / ГрГУ им. Янки Купалы ; редкол.: А. Е. Герман (гл. ред.) [и др.]. – Объем электрон. дан. 68,0 Мбайт. – 32,0 уч.-изд. л. – Гродно : ГрГУ, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

The structure and photochromic transformations of diarylethene in solid-phase films were studied by infrared (IR) absorption spectroscopy and quantum chemistry.

Карпач Павел Викторович, аспирант 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, _pavel_karpach@mail.ru.

Журавская Карина Валерьевна, студентка 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, sa451giu32@mail.ru.

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

УДК 532.783;535.555;532,535.564

К. Г. КОМЯК

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДИФРАКЦИОННЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Работа посвящена изучению поляризационных свойств электрически управляемых дифракционных структур, созданных на основе текстурированной фотоориентации нематического жидкого кристалла. Проанализированы состояния поляризации излучения, прошедшего через ЖК-ячейки при различных значениях напряжения.

Разработка и создание управляемых дифракционных элементов на основе жидких кристаллов (ЖК) является перспективным направлением современной оптики. Такие элементы позволяют формировать световое поле с заданными характеристиками. Повышенный интерес к ЖК-элементам обусловлен также их уникальными свойствами: тонкий оптический слой, низкое рабочее напряжение, высокая анизотропия и дешевизна изготовления. Цель работы – проанализировать поляризационные свойства электрически переключаемых дифракционных структур, изготовленных методом текстурированной фотоориентации нематического жидкого кристалла.

В работе рассмотрены дифракционные структуры типа «сэндвич» с различной ориентацией директора ЖК: периодической твист-планарной и противоположно закрученной твист-твист (твист $\pm 45^\circ$). Необходимая ориентация молекул жидкого кристалла задавалась с помощью текстурированной фотоориентации пленок азокрасителя. Формирование ориентирующих свойств пленок азокрасителя происходило при облучении их линейно поляризованным светом ($\lambda = 465$ нм), причем направление наведенной ориентации перпендикулярно направлению поляризации активирующего излучения [1].

Для изучения поляризационных свойств изготовленных дифракционных ЖК-структур использовался *He-Ne*-лазер, фотодетектор и анализатор. Было исследовано состояние поляризации прошедшего света (нулевой порядок дифракции) и света, дифрагированного в первый порядок. Падающее излучение имело вертикальную поляризацию. Поляризация дифрагированного излучения регистрировалась в выключенном состоянии ЖК-ячеек (0 В) и при двух значениях напряжения, поданного на ячейку (3 В и 15 В).

На рисунке 1 приведены картины дифракции излучения, прошедшего через ячейку с твист-планарной ориентацией молекул ЖК (а) и с твист-твист ориентацией (б) при различных значениях напряжения, поданного на ЖК-элемент. С увеличением напряжения интенсивность всех порядков дифракции убывает, а наибольшую интенсивность имеет прошедшее излучение. Такое перераспределение энергии по порядкам дифракции связано с изменением дифракционной структуры ЖК-ячейки под действием электрического поля. Молекулы жидкого кристалла выстраиваются по полю, что приводит к исчезновению дифракционной структуры.

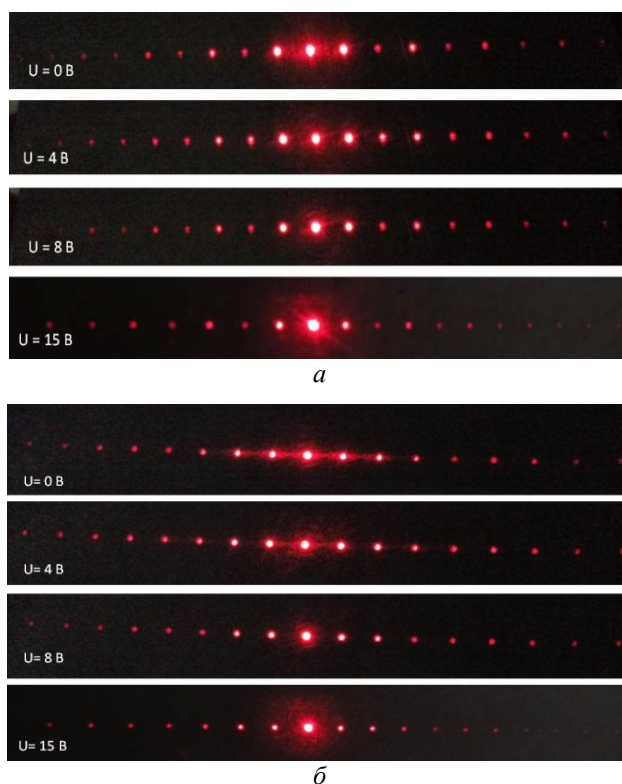


Рисунок 1 – Картины дифракции излучения на ячейке с а) твист-планарной и б) твист-твист ориентацией молекул жидкого кристалла

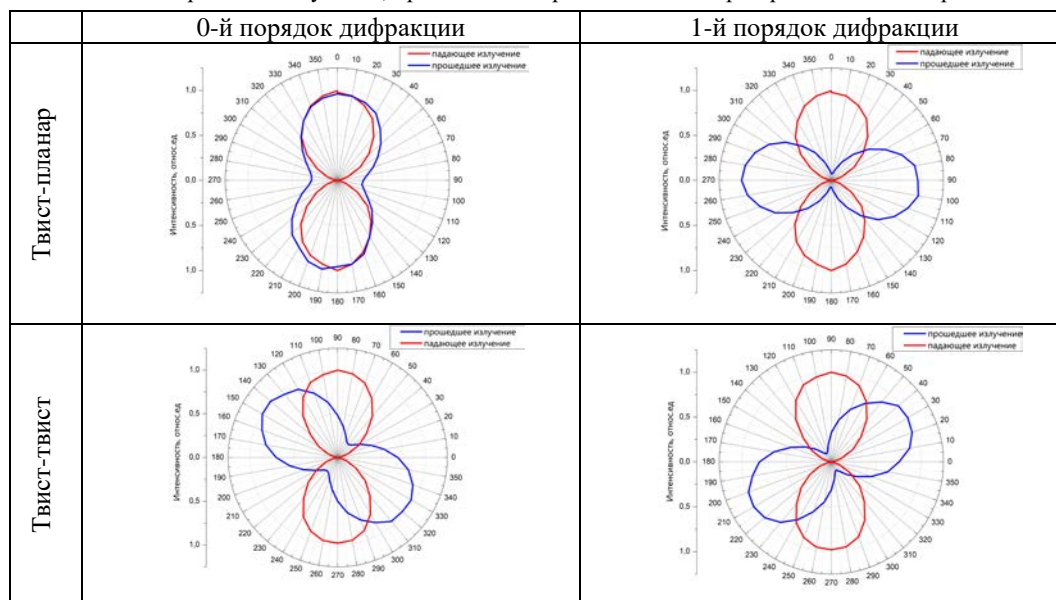
В таблице 1 приведены состояния поляризации излучения, прошедшего через ЖК-ячейки в отсутствие напряжения (красным цветом обозначена поляризация падающего излучения, а синим – прошедшего). В выключенном состоянии ЖК-ячейка с твист-планарной ориентацией поворачивает плоскость поляризации прошедшего и дифрагированного в 1-й порядок излучения на 45 градусов. ЖК-ячейка с твист-твист ориентацией поворачивает плоскость прошедшего излучения на 90° и сохраняет поляризацию излучения, дифрагированного в 1-й порядок. Отметим также, что поляризация в 0-м и 1-м порядках дифракции ортогональна друг другу, что характерно для дифракции на поляризационных решетках.

Таблица 1 – Состояние поляризации излучения, прошедшего через ЖК-ячейки в отсутствие напряжения

	0-й порядок дифракции	1-й порядок дифракции
Твист-планар		
Твист-твист		

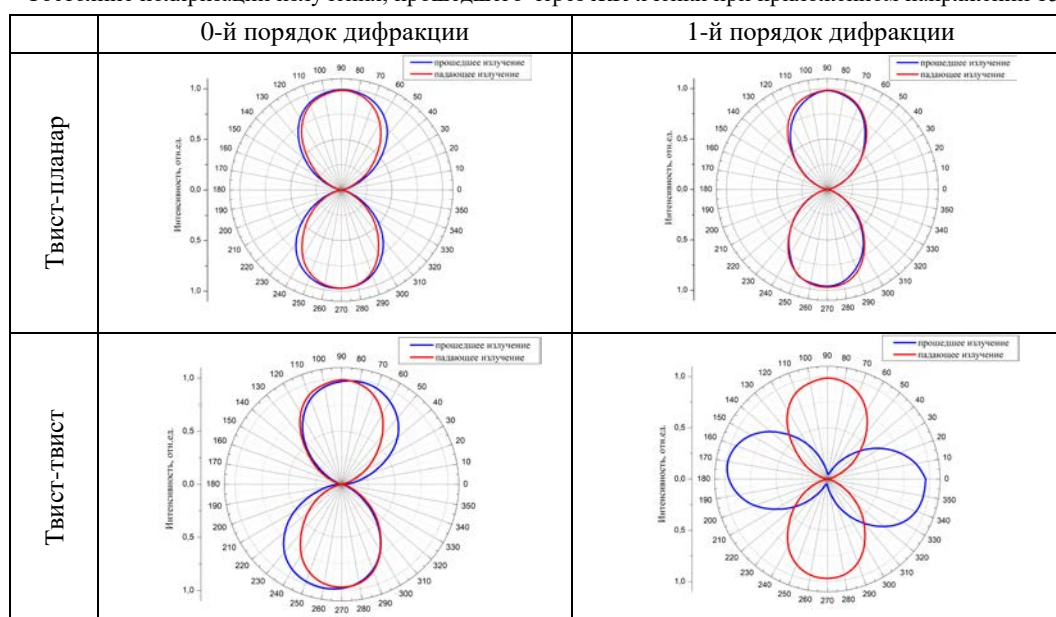
В таблице 2 приведены результаты регистрации поляризации излучения в 0-м и 1-м порядках дифракции при приложенном к ЖК-ячейке напряжении 3 В. Напряжение 3В было выбрано исходя из условия максимума дифракционной эффективности. Как и в отсутствие напряжения, поляризация соседних порядков дифракции остается ортогональной при прохождении излучения через оба типа ЖК-ячеек. Для ЖК-ячейки с твист-планарной ориентацией молекул ЖК прошедшее излучение имеет поляризацию, совпадающую с входной, а в 1-м порядке – ортогональную. ЖК-ячейка с твист-твист ориентацией поворачивает плоскость поляризации на 45 градусов как в 0-м, так и в 1-м порядке дифракции.

Таблица 2 – Состояние поляризации излучения, прошедшего через ЖК-ячейки при приложенном напряжении 3 В



В таблице 3 приведены состояния поляризации излучения, прошедшего через ЖК-ячейки при приложенном напряжении 15 В. При таком значении приложенного напряжения ЖК-ячейка с твист-планарной ориентацией не изменяет поляризацию ни прошедшего излучения, ни дифрагированного в 1-й порядок. Можно сделать вывод, что при напряжении 15 В директор ЖК раскручивается, и дифракционная структура поляризационной решетки стирается. В случае твист-твист ориентации поляризация в соседних порядках дифракции остается ортогональной, что свидетельствует о том, что ЖК-ячейка при напряжении 15 В продолжает функционировать как дифракционная структура, сохраняя свои поляризационные свойства.

Таблица 3 – Состояние поляризации излучения, прошедшего через ЖК-ячейки при приложенном напряжении 15 В



Таким образом, в работе были рассмотрены поляризационные свойства дифракционных ЖК-структур, созданных на основе текстурированной фотоориентации нематического жидкого кристалла. В отсутствие напряжения и при оптимальном напряжении (3 В) ЖК-ячейки функционируют как поляризационные решетки. При приложенном напряжении 15 В дифракционная структура ЖК-ячейки с твист-планарной ориентацией разрушается, а с твист-твист ориентацией сохраняется.

Список литературы

1. Поляризационные свойства электрически переключаемых дифракционных жидкокристаллических решеток / О. С. Кабанова [и др.] // Квантовая электроника : материалы XIII междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–26 нояб. 2021 г. – Минск : БГУ, 2021. – С. 22–25.

In this work, the polarization properties of diffractive LC structures created on the basis of the textured photoorientation of a nematic liquid crystal were considered. In the absence of voltage and at the optimum voltage (3 V), the LC cells function as polarizing gratings. At an applied voltage of 15 V, the diffraction structure of an LC cell with a twist-planar orientation is destroyed, while with a twist-twist orientation, it is retained.

Комяк Клавдия Георгиевна, студентка 4 курса, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, fiz.komyak@bsu.by.

Научный руководитель – Толстик Алексей Леонидович, доктор физико-математических наук, профессор, физический факультет, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, tolstik@bsu.by.

УДК 535.34+535.37

Н. Н. КРАСНОПЕРОВ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ С БЕЛКАМИ СЫВОРОТКИ КРОВИ ЧЕЛОВЕКА

Приведены результаты исследования спектральных свойств индотрикарбоцианиновых красителей при взаимодействии с компонентами сыворотки крови человека. Разработана методика экстракции индотрикарбоцианиновых красителей из растворов сыворотки крови человека. По экстракции определены количество и характер образующихся комплексов красителя с белками сыворотки крови.

Фотодинамическая терапия (ФДТ) один из самых селективных и малоинвазивных методов для лечения злокачественных новообразований различной локализации. Дальнейшее развитие метода ФДТ продолжается по пути совершенствования используемых фотосенсибилизаторов (ФС). По современным представлениям идеальный ФС должен проявлять выраженный фотодинамический эффект при активации излучением в окне прозрачности биологических тканей, обладать высокой избирательностью накопления в тканях-мишенях, биосовместимостью, эффективным профилем фармакокинетики, относительно быстро выводиться из организма и флуоресцировать с достаточным для диагностических целей квантовым выходом. В последние годы отмечается рост исследовательского интереса к полиметиновым красителям (ПК) как к перспективным фотосенсибилизаторам для фотодинамической терапии злокачественных новообразований [1].

По результатам комплексных исследований фотофизических свойств ряда индотрикарбоцианиновых красителей в модельных средах и опухолевых моделях на экспериментальных животных *in vivo* выбран краситель в значительной степени удовлетворяющий этим требованиям [2]. В его основе индотрикарбоцианиновый краситель с хлорзамещенным ортофениленовым мостиком в полиметиновой цепи. Полиэтиленгликоли с молекулярной массой 300 Да (ПЭГ300), ковалентно связанные по концевым группам, обеспечили новому фотосенсибилизатору высокие водорастворимость и биосовместимость.

Эффективность ФС во многом зависит от избирательности его накопления в опухолевых тканях. Большое количество исследований посвящено разработкам новых способов адресной доставки препаратов. Один из путей решения этого вопроса – использование комплексов молекул ФС с носителями, которые обеспечивают эффективное накопление в опухолевых клетках. В этом плане отдельного внимания в качестве эндогенных переносчиков заслуживают компоненты плазмы крови – белки и липопротеины. С другой стороны, сыворотка крови доступная модельная среда для исследования фотофизических свойств ФС в условиях, в которых он находится *in vivo*.

В работе [3] методами спектрофотометрии и эксклюзионной хроматографии показано образование комплексов интрикарбоцианиновых красителей с белками плазмы крови. С помощью гель-электрофореза установлено образование ковалентных комплексов с альбумином и липопротеинами высокой плотности индотрикарбоцианиновых красителей с хлорзамещенным ортофениленовым мостиком в полиметиновой цепи [4]. В данной работе использованы экстракционные методы для количественной оценки образования прочных ковалентных комплексов красителей с компонентами сыворотки крови человека (ЧСК).

Объектами исследования выступали разработанный в лаборатории спектроскопии НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ симметричный индотрикарбоцианиновый краситель ПК1 (рисунок 1), который по многим параметрам перспективен для использования в качестве фотосенсибилизатора для ФДТ [2], а также два близких по структуре красителя – ПК2 и ПК3. У первого по сравнению с ПК1 отсутствуют полиэтиленгликоли на концевых группах, а у второго – хлорзамещенный ортофенилсеновый мостик.

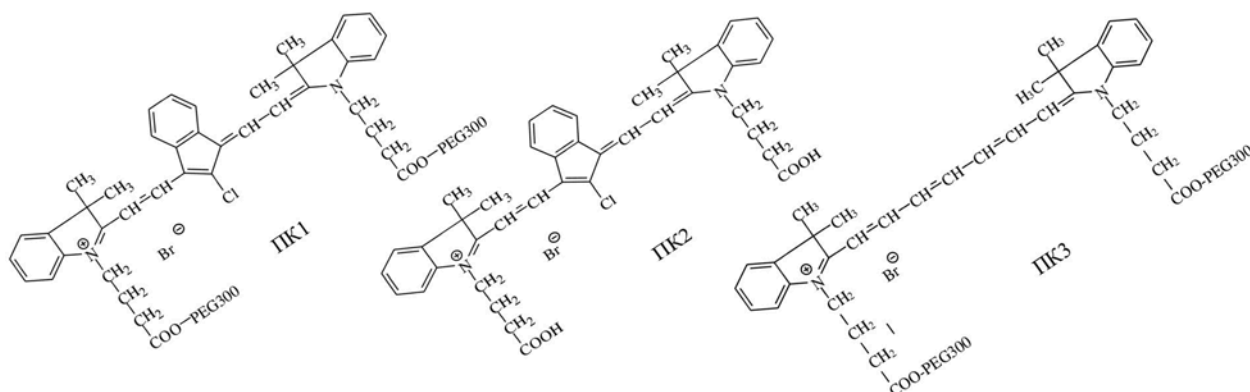
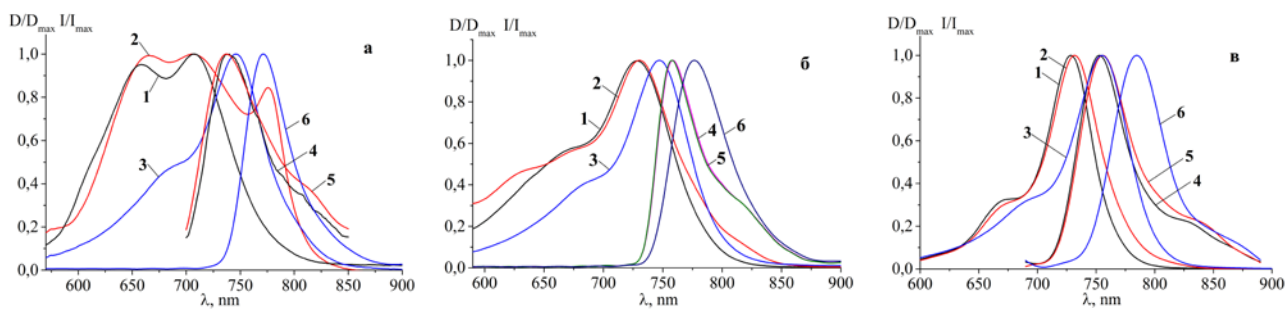


Рисунок 1 – Структура исследованных индотрикарбоцианиновых красителей

Исследования проводились в 5 % растворе сыворотки крови человека (ЧСК) в натрий-калиевом фосфатном буфере Дюльбекко (0,14 моль/л) с $\text{pH} = 7,4$ (ФСБ), что соответствует концентрации альбумина ~30 мкМ. Концентрация красителей в исследованных образцах составляла 10 мкМ (отношение краситель к белку 1:3). При таком отношении концентраций красителя и белка по спектрам поглощения не обнаруживается молекулы красителя, локализованные в водном окружении.

В соответствии с принципами экстракции [5] разработана методика экстракции исследованных красителей из растворов ЧСК. Экстрагент должен обладать высокой экстракционной способностью. В случае с биологическими образцами органический растворитель должен хорошо извлекать исследуемое вещество из водной фазы. Из числа наиболее распространенных растворителей (этанол, метанол, ацетонитрил, уксусная кислота, ДМСО и др.) наиболее подходящим оказался бутанол. Он эффективно экстрагирует красители ПК1–ПК3 из воды и ФСБ (таблица 2). Несомненным преимуществом бутанола является то, что он не смешивается с водой.

Определены фотофизические характеристики красителей в ФСБ, бутаноле и растворе ЧСК (рисунок 2, таблица 1). На спектральные характеристики красителей в ФСБ оказывает заметное влияние агрегация молекул в водном растворе. Краситель ПК2 без ПЭГ является гидрофобным и в воде агрегирует с образованием Н- и J-ассоциатов. Краситель ПК1 гидрофильный, его растворы в ФСБ представляют собой равновесную смесь мономеров и димеров Н-типа. Следует отметить, что при одинаковой концентрации краситель ПК1 в ФСБ агрегирован в меньшей степени по сравнению с его прекурсором без ПЭГ – ПК2. Анализ спектрально-люминесцентных свойств ПК3 в растворах в ФСБ позволяет утверждать, что его молекулы находятся преимущественно в форме мономеров. Вместе с тем флуоресценция исследованных красителей в ФСБ является однокомпонентной: форма не зависит от длины волны возбуждения при сканировании в пределах длинноволновой полосы поглощения, кинетика затухания аппроксимируется одной экспонентой. Спектр флуоресценции красителей при возбуждении в пределах основной полосы поглощения приблизительно зеркально симметричен спектру поглощению их мономеров.



1, 4 – ПК1; 2, 5 – ПК2; 3, 6 – ПК3

Рисунок 2 – Спектры поглощения (1–3) и флуоресценции (4–6) индотрикарбоцианиновых красителей в ФСБ (а), 5 % растворе ЧСК (б) и бутаноле (в) при концентрации 10 мкМ

Таблица 1 – Фотофизические параметры красителей в ФСБ, бутаноле и 5 % растворе ЧСК

		λ_{abs}^{max} , нм	$\Delta\lambda_{abs}^{max}$, нм	λ_f^{max} , нм	$\Delta\lambda_f^{max}$, нм	$\varepsilon \cdot 10^5$, М ⁻¹ см ⁻¹	τ (20 °С), нс	P (20 °С)
ФСБ	ПК1	707	134	738	64	-	0,4±0,1	0,28±0,02
	ПК2	706	170	737	77	-	0,3±0,1	0,31±0,02
	ПК3	746	78	772	49	1,87	0,3±0,1	0,30±0,02
ЧСК	ПК1	729	64	757,0	43	1,88	1,4±0,1	0,42±0,02
	ПК2	731	65	756,5	46	1,96	1,4±0,1	0,39±0,02
	ПК3	748	68	776,0	55	1,89	0,4±0,1	0,40±0,02
н-бутанол	ПК1	728	47	753,0	49	2,27	1,1±0,1	0,28±0,02
	ПК2	732	53	756,0	53	2,37	1,0±0,1	0,30±0,02
	ПК3	755	58	785,0	51	2,16	1,0±0,1	0,30±0,02

Примечание. Параметры приведены для растворов красителей при концентрации 10 мкМ.

Спектральные параметры растворов ПК1 и ПК2 в растворах БСА резко отличаются от таковых в ФСБ: наблюдается смещение максимумов поглощения и флуоресценции в длинноволновую область, уменьшается поглощение в полосе агрегатов, возрастает квантовый выход и время жизни флуоресценции. Не обнаружено влияние молекул БСА на спектрально-люминесцентные свойства ПК3, у которого отсутствует хлорзамещенный ортофениленовый мостик на полиметиновой цепи сопряжения.

В полярных органических растворителях молекулы полиметиновых красителей находятся в форме мономеров, преобладающая ионная форма исследованных красителей в таких средах – свободные ионы. Это подтверждается стабильностью спектров поглощения, возбуждения и испускания флуоресценции во времени, при изменении концентрации и нагревании. По сравнению с локализацией молекул красителей в водном окружении в бутаноле наблюдается bathochrome смещение длинноволновых полос поглощения и флуоресценции, увеличение длительности затухания флуоресценции.

Для экстракции исследуемый раствор красителя смешивался с бутанолом в соотношении объемных долей 1:1. Полученная смесь обрабатывалась ультразвуком в течение 60 минут. Далее центрифугирование в течение 15 минут (8000 об./мин.) для разделения слоев. Содержание красителей в супернатанте и осадке определяли спектрофотометрическим методом. Состояние молекул красителей анализировали путем сопоставления спектрально-люминесцентных характеристик красителей в супернатанте и осадке с данными параметрами в исходных образцах (растворы в ФСБ и ЧСК) и в чистом бутаноле. Спектральные параметры молекул красителей, перешедших в бутанольный экстракт, совпадают со значениями в чистом бутаноле. Совпадение зафиксировано на основании анализа формы спектров поглощения и флуоресценции, а также длительности затухания и степени поляризации флуоресценции. Можно утверждать, что в бутанольном экстракте красители находятся в свободном состоянии. На основании анализа спектров поглощения определена степень экстракции красителей (таблица 2).

Таблица 2 – Степень экстракции (%) красителей из дистиллированной воды и раствора ЧСК (5 %)

	Дистиллированная вода, $C_{кр} = 3,5$ мкМ	Дистиллированная вода, $C_{кр} = 35$ мкМ	Раствор ЧСК (5 %), $C_{кр} = 10$ мкМ, 2 часа инкубации при 37 °С
ПК1	99,4	94,7	49,7
ПК2	99,7	96,4	60,1
ПК3	99,3	95,0	91,4

Измерения показали, что в таких условиях красители ПК1 и ПК2 экстрагируются только на 50–60 %. Повторной экстракцией из водного осадка не удастся извлечь оставшийся краситель. Это указывает на то, что их молекулы в растворе распределены по нескольким типам комплексов с компонентами сыворотки крови, которые отличаются прочностью связи. В работе [4] показано, что данные красители способны образовывать ковалентные комплексы с альбумином и липопротеинами высокой плотности. С помощью экстракции возможно определение доли данных комплексов в растворе.

С другой стороны, степень экстракции ПК3 без хлорзамещенного ортофениленового мостика из раствора ЧСК близка к значению для раствора красителя в ФСБ. С учетом погрешности определения молярного коэффициента поглощения, можно говорить, что данный краситель полностью экстрагируется. Следовательно,

при взаимодействии с компонентами сыворотки крови он не образует с ними прочных комплексов, что согласуется с результатами исследования на гель-электрофорезе.

Бутанол показал свою высокую эффективность в качестве экстрагента индотрикарбацианиновых красителей из модельных сред на основе сыворотки крови. Данная методика может использоваться для экстракции из биологических тканей.

Список литературы

1. Polymethine dyes for PDT: recent advances and perspectives to drive future applications / D. M. Dereje [et al.] // Photochemical & Photobiological Sciences. – 2022. – С. 1–23.
2. Novel indotricarbocyanine dyes covalently bonded to polyethylene glycol for theranostics / A. A. Lugovski [et al.] // Journal of Photochemistry and Photobiology. A: Chemistry. – 2016. – Vol. 316. – P. 31–36.
3. Влияние комплексообразования с белками плазмы крови на спектральные характеристики трикарбацианиновых красителей / Н. В. Белько [и др.] // Весці БДПУ. Сер. 3, Фізіка. Матэматыка. Інфарматыка. Біялогія. Геаграфія. – 2018. – Т. 1. – С. 14–20.
4. Анализ свойств комплексов полиметиновых красителей с белками сыворотки крови методом гель-электрофореза / М. П. Самцов [и др.] // Актуальные вопросы биологической физики и химии. – 2021. – Т. 6, № 3. – Севастополь : Севастоп. гос. ун-т. – С. 499–504.
5. Poole C. F. (ed.). Liquid-Phase Extraction. – Elsevier, 2019.

The results of the study of spectral properties of the new indotricarbocyanine dye in interaction with components of human blood serum are presented. A technique for the extraction of indotricarbocyanine dyes from human blood serum solutions has been developed. According to the extraction, the quantity and nature of the resulting complexes of the dye with serum proteins were determined.

Красноперов Никита Николаевич, студент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, nikita.krasnoperov2001@gmail.com.

Научный руководитель – *Тарасов Дмитрий Сергеевич*, старший научный сотрудник лаборатории спектроскопии Института прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ, Минск, Республика Беларусь, dmitrij-tarasov@list.ru.

УДК 535.34+544.2

Н. В. ЛАБОДА, А. Г. ТИМОШЕНКО

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПРОИЗВОДНОГО РОДАМИНА Б В ПРИСУТСТВИИ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА

Изучены спектральные свойства производного родамина Б в присутствии ионов Fe^{3+} в различных растворителях. Во всех рассмотренных растворителях краситель способен образовывать комплексы с ионами металла, при этом в спектрах электронного поглощения проявляется полоса при 560–564 нм. Для всех растворов полоса наблюдается уже при концентрации ионов Fe^{3+} , равной 25 мкмоль/л. Комплексы обладают стабильностью только в водно-ацетонных растворах, в водно-ацетонитрильных и водно-этанольных растворах с течением времени разрушаются.

В диагностике ранних стадий коррозии металлов большое значение имеет детектирование их ионов. Высокую избирательность и чувствительность их обнаружения могут обеспечить вещества, чьи спектрально-люминесцентные свойства изменяются в присутствии ионов металлов [1]. Одним из таких сенсоров является краситель FD1, производное родамина Б [2, 3]. В данной работе исследуются поведение красителя FD1 в присутствии ионов Fe^{3+} в различных растворителях.

Краситель FD1, представляющий собой ацил-гидразон родамина Б, был синтезирован в НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ (структурная формула представлены на рисунке 1). Его растворы концентрации 25 мкмоль/л приготавливали в смеси вода-ацетонитрил, вода-ацетон и вода-этанол в соотношении жидкостей 1:1. В них добавляли ионы Fe^{3+} в виде водного раствора $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Концентрацию ионов железа в растворах FD1 варьировали от 25 до 250 мкмоль/л. Спектры поглощения растворов регистрировали в сантиметровых кварцевых кюветах при помощи спектрофотометра SOLAR PV1251 спустя одинаковый промежуток времени после приготовления.

В видимой области спектров поглощения всех растворов FD1 без добавления ионов Fe^{3+} отсутствуют полосы поглощения, поглощение имеется лишь в ультрафиолетовой области

При добавлении ионов железа растворы FD1 приобретают малиновую окраску, а в спектрах поглощения проявляется полоса при 560 нм для водно-ацетонитрильных, 563 нм для водно-ацетонных и 564 нм для водно-этанольных растворов (рис. 2). Эта полоса отчетливо видна даже при минимальной используемой концентрации ионов Fe^{3+} равной 25 мкмоль/л. С увеличением концентрации ионов интенсивность полосы при 560 нм возрастает во всех использованных растворителях.

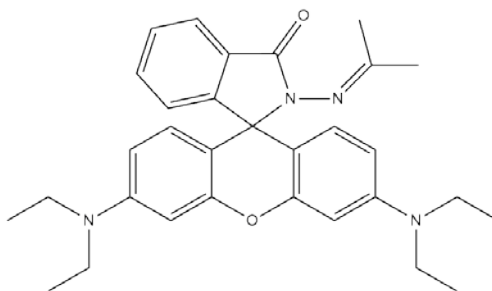


Рисунок 1 – Структурная формула красителя FD1

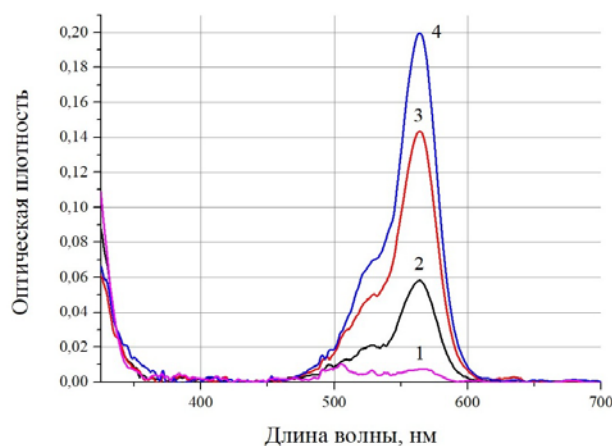


Рисунок 2 – Спектр поглощения раствора FD1 концентрации 25 мкмоль/л в смеси вода–этанол в исходном состоянии (1) и в присутствии ионов Fe^{3+} в концентрации 25 мкмоль/л (2), 150 мкмоль/л (3), 250 мкмоль/л (4)

Появление полосы поглощения при 560–564 нм связано с образованием комплекса красителем FD1 с ионами Fe^{3+} [2, 3]. Однако только в водно-ацетонных растворах данный комплекс проявил стабильность. В водно-ацетонитрильных и водно-этанольных растворах с течением времени комплексы красителя и ионов металла разрушаются, что приводит к убыванию оптической плотности при 560–564 нм (рис. 3), причем данный процесс протекает быстрее при более высоких концентрациях ионов Fe^{3+} . Спустя сутки после приготовления растворов полоса поглощения при 560–564 нм не наблюдается.

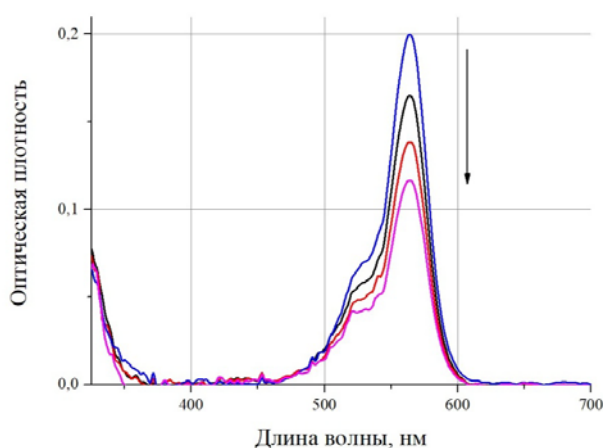


Рисунок 3 – Изменение спектра поглощения FD1 концентрации 25 мкмоль/л в смеси вода–этанол в присутствии ионов Fe^{3+} в концентрации 250 мкмоль/л в течение 30 мин. после приготовления раствора; интервал между измерениями 10 мин.

Изучено поведение красителя FD1 в присутствии ионов Fe^{3+} в водно-ацетонитрильных, водно-ацетонных и водно-этанольных растворах. Во всех рассмотренных растворителях краситель образует комплексы с ионами

металла с последующим проявлением в спектрах поглощения полосы при 560–564 нм. Во всех использованных растворителях полоса четко наблюдается уже при концентрации ионов Fe^{3+} , равной 25 мкмоль/л. Стабильностью комплексы обладают только в водно-ацетонных растворах, в водно-ацетонитрильных и водно-этанольных растворах с течением времени комплексы распадаются, и оптическая плотность при 560–564 нм убывает. Краситель FD1 может рассматриваться в качестве сенсора ионов металлов и, следовательно, использоваться для детектирования коррозии. В дальнейшем будет установлена причины неустойчивости комплексов, исследовано поведения красителя FD1 в других растворах.

Список литературы

1. Luminescence investigation of Fe (III)–rhodamine B complexes obtained by solvent extraction / R. Czoik [et al.] // J. Lumin. – 2013. – Vol. 139. – P. 35–39.
2. Augustyniak, A. Early detection of steel corrosion via «turn-on» fluorescence in smart epoxy coatings / A. Augustyniak, J. Tsavalas, W. Ming // ACS appl. mater. interfaces. – 2009. – Vol. 1, №. 11. – P. 2618–2623.
3. Intelligent anti-corrosion and corrosion detection coatings based on layered supramolecules intercalated by fluorescent off-on probes / J. Lv [et al.] // J. of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. – 2021. – Vol. 118. – P. 309–324.

The behavior of the FD1 dye in the presence of Fe^{3+} ions in various solvents was studied. In all the considered solvents, the dye form complexes with metal ions resulting in the appearance of a band at 560–564 nm in the UV-vis absorption spectra. In all of the solvents, the band is observed even at the 25- μM concentration of Fe^{3+} ions. The complexes are stable only in aqueous acetone, in aqueous acetonitrile or ethanol the complexes degrade over time.

Лабода Николай Вадимович, физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, nikolaj.laboda000@gmail.com.

Тимошенко Артём Геннадьевич, химический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, che.timoshenAG@bsu.by.

Научные руководители – Белько Никита Викторович, кандидат физико-математических наук, Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ, Минск, Республика Беларусь, nikita.belko@gmail.com.

Мальтанова Анна Михайловна, кандидат химических наук, Институт физико-химических проблем БГУ, Минск, Республика Беларусь, annamaltanova@gmail.com.

УДК 533.9.07

А. А. ЛИСКОВИЧ

РОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ Ni-Cr МИШЕНИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ

Установлено влияние зависимости более 20-ти спектральных линий излучения плазмы от температуры, сформированной на поверхности Ni-Cr мишени сдвоенными лазерными импульсами. Показано, что они принимают максимальные значения при достижении температуры мишени в 900 °С, где интенсивность линий возрастает почти в 2,5 раза, а после достижения температуры свыше 900 °С интенсивность начинает спадать.

В современной науке уже давно закрепился метод лазерного эмиссионно-спектрального анализа (LIBS), который основан на быстром нагревании, испарении и возбуждении вещества и регистрации свечения возбужденной в результате плазмы. При воздействии на мишень лазерным излучением высокой плотности на её поверхности и вблизи неё образуется так называемая эрозийная плазма, спектральный состав излучения которой и регистрируется. Данный метод обладает отличительной особенностью, а именно сверхвысокой интенсивностью потока излучения, высокой локальностью при фокусировке и широким диапазоном длительностей импульсов воздействия на изучаемое вещество. LIBS характеризуется высокой оперативностью, отсутствием необходимости подготовки предварительных проб анализируемого материала, возможностью реализации дистанционного анализа материалов, веществ, изделий, возможностью одновременной идентификации большого числа различных химических элементов [1–2].

Лазерно-эмиссионной плазмой называется ионизированный газ, образованный из нейтральных атомов или молекул и заряженных частиц (электронов и ионов) в результате воздействия лазерного излучения на мишень при заданных параметрах. Её характерной особенностью является квазинейтральность, т. е. когда её объёмные плотности положительных и отрицательных заряженных частиц, из которых она образована, практически совпадают. Наличие свободных электрических зарядов делает плазму проводящей средой, что обуславливает её заметно большее (по сравнению с другими агрегатными состояниями вещества) взаимодействие с магнитным и электрическим полями. В этом образованном эмиссионном спектре мишени содержится подробная информация о её элементном химическом составе. Данное физическое явление легло в основу лазерно-эмиссионного спектрального анализа (LIBS).

С помощью лазерной абляции, можно получить плазму, которая состоит из электронов, ионов, нейтральных частиц и кластеров. Основными параметрами, которые влияют на результаты LIBS, являются длина волны, длительность лазерного импульса (задает мощность подводимой к мишени энергию при ее нагреве и лазерную абляцию), энергия лазерного импульса (способность лазерного излучения влиять на величину происходящих процессов), физико-химические характеристики материала исследуемого образца и характеристики аблируемой поверхности. Помимо вышесказанного, необходимо брать в расчёт и окружающую его атмосферу (которая может оказывать значительное влияние на динамику плазменного факела), так как из-за атмосферного давления может зависеть качество всех полученных данных [3–4]. Целью анализа плазмы является структурное определение локальных и мгновенных значений её основных параметров, а именно: концентрации электронов, ионов, атомов и молекул разных сортов в основном и возбужденном состоянии, их температуры и напряженности электрического поля. На основании этих данных может быть осуществлена проверка и построение физической и математической моделей плазмообразующей среды относительных единиц от температуры.

Результативность и качество LIBS определяются интенсивностью спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы относительно фоновое ее излучения. Как было сказано выше на результативность LIBS сильно влияют физико-химические характеристики материала исследуемого объекта и характеристики аблируемой поверхности. Одной из таких характеристик является температура исследуемого объекта. Целью настоящей работы является определение влияния температуры Ni-Cr мишени на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы образованной на ее поверхности наносекундными лазерными импульсами.

Для идентификации спектра лазерно-эмиссионной плазмы необходимо определить относительную интенсивность спектральных линий. Значительный рост линий интенсивности и рост аблированной массы вещества при воздействии на Cu- и Al-мишени сдвоенными лазерными импульсами с плотностью мощности $\sim 10^9$ Вт/см² экспериментально показан в работах [5–7]. Данный рост объяснялся наличием высокой температурой эрозионного кратера, сформированный первым лазерным импульсом в паре. Изучение абляции мишени, находящейся при высокой температуре, показало существенное ее влияние на интенсивность спектральных линий и эффективность выноса материала пламенным факелом из эрозионного кратера [8].

Экспериментальный анализ проводился на модернизированной установке, описанной в [9–10]. Излучение лазера фокусировалось на исследуемую Ni-Cr мишень, на которой формировался лазерно-эмиссионный плазменный факел, излучение которого с помощью оптико-механического блока фокусировки направлялось в монохроматор MS 2004i. Регистрация эмиссионного спектра лазерной плазмы на выходе монохроматора-спектрографа осуществлялась с помощью регистратора оптического излучения UC-16H10420-1106 на базе ПЗС-линеек. Производилась серия воздействий на исследуемую мишень лазерными импульсами YAG:Nd³⁺-лазера (1,06 мкм). Объектом исследования являлся Ni-Cr сплав, содержащий ~ 80 % никеля и ~ 20 % хрома. Нагрев мишени проводился путём пропускания электрического тока через нее. Ее температура измерялась с помощью оптического измерителя температуры ИТ-3СМ. Полученные спектры лазерно-эмиссионной плазмы накапливались, усреднялись и отображались в виде спектра в программе Qsp Client.

Были изучены зависимости интенсивности основных спектральных линий излучения плазмы от температуры Ni-Cr мишени. На рисунке 1 представлены экспериментальные зависимости интенсивности следующих спектральных линий (в относительных единицах) лазерно-эмиссионной плазмы от температуры Ni-Cr мишени (в цельсиях): атомов никеля (313,46 нм), ионов никеля (286,40 нм), атомов хрома (298,64 нм), ионов хрома (283,56 нм). Суммарная энергия лазерных импульсов составляла 15 мДж на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм при использовании YAG:Nd³⁺-лазера, работающего в режиме одиночных и сдвоенных импульсов. Анализ представленных на рисунке 1 кривых позволяет выявить ряд закономерностей и особенностей в их поведении. Интенсивности спектральных линий никеля и хрома остаются без изменения при температурах от 20 до 500 °С. В диапазоне от 500 до 600 °С интенсивности спектральных линий начинают линейно возрастать. Начиная с 600 °С, влияние температуры мишени начинает быть более заметным и интенсивности спектральных линий растут уже нелинейно. При достижении температуры мишени в 900 °С интенсивность линий возрастает практически в 2,5 раза. При температурах больших 900 °С интенсивности линий начинают уменьшаться.

Рост интенсивности спектральных линий при температурах мишени 500–900 °С обусловлен ростом паро-плазменного выноса материала из мишени. При взаимодействии лазерного излучения на «горячую» поверхность мишени, её догревание до температуры плавления обходится меньшей энергией лазерного импульса, чем при взаимодействии лазерного излучения на «холодную» мишень. Энергия, которая образуется за счёт этого догревания, идёт на плазмообразование и испарение мишени.

При температурах близких к температуре плавления материала мишени (при температурах больших 900 °С), с паро-плазменным выносом материала из мишени конкурирует паро-капельный вынос материала мишени. Это подтверждается наличием бруствера, образованного микрокаплями материала мишени вокруг кратера.

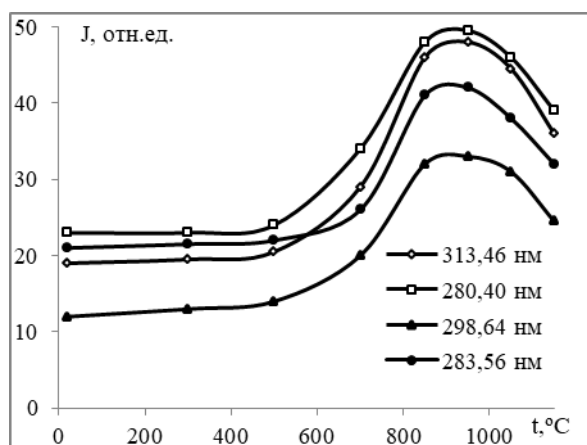


Рисунок 1 – Зависимости интенсивности линий лазерно-эмиссионной плазмы от температуры Ni-Cr мишени

Рост интенсивности спектральных линий, как описанные выше процессы, также будет происходить при взаимодействии сдвоенного лазерного импульса, но уже при температурах на ~ 200 °C меньшей, чем при моноимпульсном лазерном воздействии того же вещества мишени.

Как отмечалось выше, нагревание материала до всё более высоких температур, связан с ростом плотности потока лазерного излучения. Проводимые исследования показывают, что при заданных характеристиках формы и длительности лазерного импульса есть хорошо видимая критическая плотность потока излучения, которая зависит от тепловых и физических параметров облучаемого вещества, начиная с которой происходит его интенсивное испарение. Скорость движения фронта испарения при относительно больших плотностях потока излучения в основном зависит от скорости подвода к облучаемому веществу энергии, а не от кинетики фазового перехода. При этом образуется пар, который сильно экранирует поверхность облучения, из-за чего энергия излучения переходит в часть внутренней и кинетической энергии образованной плазмы, а поэтому обычная теплота испарения оказывается значительно хуже, чем эффективная энергия испарения. Так как от температуры зависит скорость испарения облучаемого материала, для плотности потока существует резкая нижняя граница, которая показывает начало процесса испарения.

При критической плотности потока меньшей резкой границы плотности потока излучения, то эффективная удельная энергия разрушения для исследуемого материала достаточно велика. С возрастанием плотности потока излучения, эффективная удельная энергия будет уменьшаться и достигнет наименьшего значения. При этом устанавливается стационарное движение между газообразной и твёрдой фазой испарения. В промежутке от значения резкая нижняя граница плотности потока излучения до наименьшего её значения будет образовываться переходной режим, который будет сопровождаться перераспределением поглощённой энергии. В момент, когда граница будет оставаться неподвижной, вся энергия поглощения отводится внутрь исследуемого материала за счёт теплопроводности. А при стационарном движении границ фаз теплопроводность становится несущественной, и ключевая часть поглощённой энергии приходится на испарение исследуемого материала. Характеристические параметры процесса испарения облучаемого исследуемого материала в области действия теплового механизма, где резкая нижняя граница плотности потока излучения меньше, чем критическая плотность потока излучения, которая сама меньше, чем некоторое значение плотности потока, можно получить, решая одномерную задачу теплопроводности, в которой полагается, что поглощающий слой бесконечно тонкий.

С ростом критической плотности потока излучения скорость движения фазовой границы становится все более зависимой от температуры испарения исследуемого материала на поверхности, к тому же рост температуры при увеличении критической плотности потока излучения продолжится до тех пор, пока внутренняя энергия пара не достигнет теплоты испарения. И движение фазовой границы будет зависеть от динамики расширения образованного пара, появится зависимость термодинамических величин от температуры, для которой нужно учитывать поглощение излучения в паре корректного решения такой задачи.

При исследовании лазерной абляции в области температуры, которые могут быть близки к критическим и выше, следует использовать уравнения газодинамики [11]. Взаимодействие лазерного потокового излучения большой интенсивности на поверхность твердого тела, исследуемого материала, в этом случае происходит с помощью абляционного процесса, который заключается в испарении и ионизации слоев поверхности мишени, образовании плотной плазмы высокого давления и, как следствие, возбуждении гидродинамического движения в части мишени, где ещё не было испарения [12]. При этом лазерное моделирование ударного разрушения материала уже не является достаточно нормальным, из-за значительных долей энергии лазерного импульса, которые идут на нагрев эмиссионной плазмы.

Список литературы

1. Сковцов, Л. А. Лазерные методы дистанционного обнаружения химических соединений на поверхности тел / Л. А. Сковцов. – М. : Техносфера, 2015. – С. 208.
2. Кремерс, Д. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия / Д. Кремерс, Л. Радиемски. – М. : Техносфера, 2009. – 370 с.
3. Першин, С. М. Нелинейный рост эффективности взаимодействия второго импульса с мишенью при возбуждении плазмы путем импульсов Nd:YAG-лазера / С. М. Першин // Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39, № 1. – С. 63–67.
4. Зажогин, А. П. Динамика процессов абляции и развития приповерхностной лазерной плазмы сплавов алюминия двойными лазерными импульсами / А. П. Зажогин, А. Р. Фадаиян // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2008. – № 3. – С. 15–18.
5. Зноско, К. Ф. Усиление интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы при ее формировании двойными лазерными импульсами / К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 103–115.
6. Зноско, К. Ф. Рост эффективности взаимодействия двойных импульсов YAG:Nd³⁺-лазера с Al мишенью при уменьшении межимпульсного интервала / К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2020. – Т. 10, № 3. – С. 100–113.
7. Зноско, К. Ф. Оптимизация двухимпульсного режима лазерной абляции цветных металлов / К. Ф. Зноско, С. Д. Лешик // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка. – 2021. – Т. 11, № 1. – С. 45–58.
8. Зноско, К. Ф. Влияние температуры мишени на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы / К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2021. – Т. 11, № 1. – С. 94–106.
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. Chemical Composition of Ceramic Tile Glazes / S. S. Anufrik [et al.] // J. of Applied Spectroscopy. – 2016. – Vol. 83, No 5. – P. 764–770.
11. Mulser P, Bauer D. High Power Laser-Matter Interaction. – Berlin, Heidelberg : Springer; 2010. – 416 p.
12. Анисимов, С. И. Избранные задачи теории лазерной абляции / С. И. Анисимов, Б. С. Лукьянчук // УФН. – 2002. – Т. 172, № 3. – С. 301–333.

In the present work, the influence of more than 20 spectral radiations on the plasma from the temperature formed on the Ni-Cr surface by double laser pulses is established. It is shown that they take maximum values at a target temperature of 900 °C, where the growth height increases by almost 2.5 times, and after reaching a temperature above 900 °C, it has to fall.

Лискович Антон Андреевич, магистрант 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, l30041997@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, Республика Беларусь, znosko@grsu.by.

УДК 577.32

А. С. ЛОТАШИНСКИЙ

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ МОЛЕКУЛЫ ТИОФЛАВИНА Т С ДНК

Рассматриваются процессы комплексообразования флуоресцентного зонда Тиофлавина Т (ThT) с дезоксирибонуклеиновой кислотой (ДНК) в водном растворе Tris-буфера (pH = 7.4) в присутствии 0.15M NaCl. На основании изменений в спектре поглощения ThT, обусловленных образованием комплекса ThT-ДНК, при различных соотношениях концентраций Тиофлавина Т и пар оснований ДНК, построен график Скэтчарда, свидетельствующий о наличии двух видов центров связывания на молекуле ДНК с различными константами комплексообразования.

Тиофлавин Т является флуоресцентным зондом, относящимся к классу молекулярных роторов. Его флуоресцентные свойства значительно меняются в зависимости от вязкости микроокружения, либо при встраивании в полости ДНК или амилоидных фибрилл [1]. ДНК – это полимерная молекула, мономерным звеном которой является нуклеотид. В водных растворах молекула ДНК принимает конформацию в виде двойной спирали, стабилизированной водородными связями. Известно, что молекула ThT способна образовывать комплексы с ДНК, что сопровождается значительным увеличением квантового выхода ее флуоресценции.

Целью работы являлось исследование механизма встраивания ThT в полимерную структуру ДНК на основе измерений спектров поглощения, построение графика Скэтчарда и оценка числа и видов центров связывания ThT на ДНК.

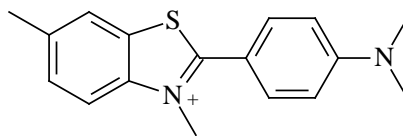
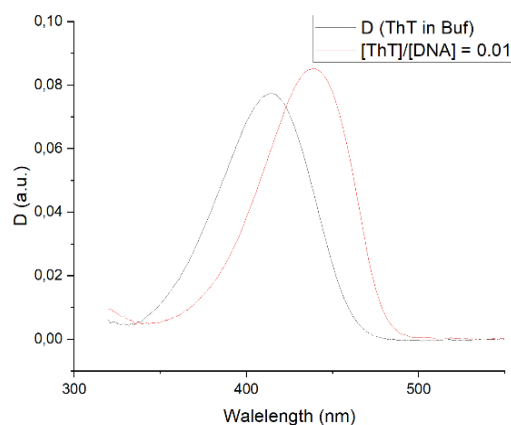


Рисунок 1 – Структурная формула Тиофлавина Т (ThT)

Образование комплексов ThT с ДНК, т. е. связывание молекулы зонда с некоторым центром связывания на ДНК, можно регистрировать по спектрам поглощения (Рисунок 2). Так, при добавлении ДНК к водному раствору ThT пик спектра поглощения ThT смещается в длинноволновую область, что позволяет количественно определять соотношение концентраций свободного ThT и входящего в состав комплекса. Молекула ДНК является сложной полимерной молекулой и может иметь разнообразные центры связывания, отличающиеся как видом, так и количеством. Образование комплексов малых молекул (лигандов, в данном случае ThT) с макромолекулой (ДНК) при достижении равновесных условий характеризуется константой диссоциации

комплекса K_d : $\frac{[A][B]}{[AB]} = kd$ ([A], [B] и [AB] – концентрации свободного лиганда, центров связывания на ДНК и образованных комплексов).

Рисунок 2 – Изменение спектра поглощения при добавлении в раствор ThT некоторого количества ДНК ([ThT] = $2,77 \times 10^{-6} \text{ M}$, [DNA] = $0,277 \times 10^{-3} \text{ M}$)

Для регистрации спектра поглощения использовался спектрометр Specord-200 PC. В работе использовался образец ДНК сельди (D6898, Sigma). Растворы DNA приготавливались в Tris буфере pH = 7.4 с добавлением 0.15 M NaCl.

При расчете количества пар оснований в ДНК молярная масса пары оснований бралась как 650 г/моль. Для расчета концентрации раствора DNA измерялась оптическая плотность при $\lambda = 260 \text{ nm}$. Полученные спектры поглощения раскладывались на составляющие, соответствующие индивидуальным спектрам свободной формы ThT и комплексов ThT-ДНК, в программе PeakFit 4.12.

Для определения константы связывания проводили серию измерений спектров поглощения при различных отношениях концентрации ThT к концентрации пар оснований ДНК [1]. Спектр поглощения водного раствора ThT с ДНК разлагался на индивидуальные компоненты, соответствующие спектрам поглощения свободных молекул ThT, а также образовавших комплекс с ДНК. На основании спектров поглощения каждой из форм ThT (свободной и связанной), определялись их концентрации по закону Бугера-Ламберта-Бера через соотношение: $D = \epsilon Cl$, где D – оптическая плотность, ϵ – молярный коэффициент поглощения, l – длина кюветы с раствором.

Для определения количества и вида центров связывания на ДНК был построен график Скэтчарда [2] (Рисунок 3), форма которого позволяет оценить количество центров связывания и параметры комплексообразования.

График Скэтчарда представляет собой зависимость $\frac{v}{l}$ к v , где $v = \frac{[ThT - DNA]}{[DNA]}$, а l – концентрация

свободной формы ThT (не связанной в комплекс с ДНК): $l = [ThT] - [ThT - DNA]$

Таблица 1 – Концентрации растворов DNA и связанной и свободной формы ThT, ν и $\frac{\nu}{l}$ для графика Скэтчарда

#	[DNA] / [ThT]	[ThT], (M)	[DNA], (M)	l_k (см), кюветы	D(414)	D(441)	[ThT] св, (M)	[ThT-DNA], (M)	[DNA], (M)	ν	$\frac{\nu}{l}$, (M)
1	729	3,89E-07	0,000279	1	0,0088	0,0042	2,46E-07	1,44E-07	2,80E-04	0,00051	2090,92
2	243	1,17E-06	0,000278	1	0,031	0,010	8,61E-07	3,04E-07	2,79E-04	0,0011	1265,97
3	81	3,45E-06	0,000278	1	0,098	0,027	2,71E-06	7,34E-07	2,78E-04	0,0026	971,63
4	27	1,03E-05	0,000276	1	0,32	0,080	8,83E-06	1,50E-06	2,76E-04	0,0054	614,53
5	9	3,10E-05	0,000274	1	0,99	0,22	2,74E-05	3,61E-06	2,74E-04	0,013	480,60
6	3	9,32E-05	0,000268	0,2	0,62	0,12	8,66E-05	6,65E-06	2,69E-04	0,025	285,86
7	1	2,80E-04	0,000251	0,2	1,9	0,22	2,67E-04	1,27E-05	2,51E-04	0,050	188,32

Примечание к таблице 1:

[DNA] / [ThT] – отношение концентрации пар оснований ДНК к концентрации ThT,

[ThT], (M) – суммарная концентрация ThT (моль/литр),

[DNA], (M) – концентрация пар оснований ДНК (моль/литр),

l_k (см) кюветы – длина кюветы,

D(414) – оптическая плотность для максимума спектра свободной формы ThT,

D(441) – оптическая плотность для максимума спектра комплексов ThT-ДНК,

[ThT] св, (M) – концентрация свободной формы ThT,

[ThT-DNA], (M) – концентрация комплексов, ν :

$$\nu = \frac{[ThT - DNA]}{[DNA]}, \quad \nu/l : \frac{\nu}{l} = \frac{[ThT - DNA]}{[DNA]([ThT] - [ThT - DNA])}$$

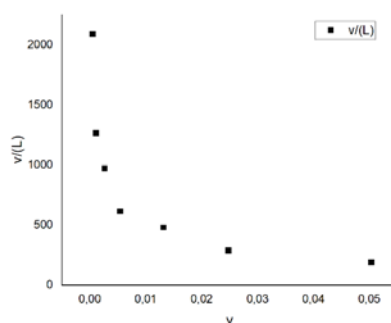


Рисунок 3 – График Скэтчарда для растворов ThT с ДНК

Форма графика Скэтчарда соответствует случаю макромолекулы с двумя различными центрами связывания.

$$\begin{aligned} N_1 &= (7,1 \pm 2,7) \times 10^{-5}; \\ K_1 &= (2,67 \pm 1,615) \times 10^{-7} \text{ M}; \\ N_2 &= 0,044 \pm 0,017; \\ K_2 &= (7 \pm 3) \times 10^{-6} \text{ M}, \end{aligned}$$

где N_1 и N_2 – это количество центров связывания в расчете на пару основания первого и второго типа соответственно, а K_1 и K_2 – их константы диссоциации.

Таким образом, в ходе работы было выяснено, что для молекулы ДНК на одну пару основания приходится два центра связывания с разными константами диссоциации.

Список литературы

1. Spectral properties of thioflavin T and its complexes with amyloid fibrils / E. S. Voropai [et al.] // Journal of Applied Spectroscopy. 2003; 70(6) : 868–874. DOI: 10.1023/B:JAPS.0000016303.37573.7e.
2. Кантор, Ч. Биофизическая химия. Т. 3 / Ч. Кантор, П. Шиммель. – М. : Мир, 1985.

In this work, the complexation of a thioflavin T (ThT) fluorescent probe with deoxyribonucleic acid (DNA) in an aqueous solution of Tris buffer (pH = 7.4) in the presence of 0.15 M NaCl was studied.

Лоташинский Александр Сергеевич, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, allotashinsky@yandex.by.

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

М. А. МАЛЕЦ, В. С. СОКОЛОВСКИЙ, М. П. ПАТАПОВИЧ

ПОСЛОЙНЫЙ АНАЛИЗ НАНОПЛЁНОК ОЛОВА, НАПЫЛЁННЫХ СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НА ПОВЕРХНОСТЬ ОЦИНКОВАННОГО ЖЕЛЕЗА

Экспериментально показана возможность проведения послойного анализа напыления нанопленки на поверхность различных материалов при воздействии мощных лазерных импульсов в атмосфере воздуха. Эксперименты проводились с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1. Проведено краткое обсуждение полученных результатов.

Изучение различных металлов, сплавов, их особенностей позволило создавать такие материалы, которые отличаются уникальными свойствами, причем с течением времени появлялись новые усовершенствования процесса их получения. Одним из примеров широко применяемого в производстве современного оборудования элемента является железо, следовательно, необходимо улучшать его качества: прочность, эластичность, устойчивость к деформации и повышенное сопротивление погодным условиям. Поэтому цинкование становится основным и более практичным видом обработки металлопроката из-за прочности материала и возможности его использования в сфере повышенной влажности, так как его основные эксплуатационные характеристики: хорошая жидкотекучесть (материал в нагретом виде можно легко переместить в форму для отливки), пластичность (упрощается процесс прокатки и снижаются издержки), удобство в ковке (возможность создавать множество видов деталей). Отсюда вытекают основные способы применения этого металла в промышленности: изготовление красок, машиностроение, фармацевтика, коррозионная защита [1, 2].

Для качественного и количественного анализа таких веществ используется метод лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии – метод, основанный на регистрации спектров атомов, находящихся в абляционной плазме. Анализ и целенаправленное изменение распределения состава лазерного факела возможно на основе дополнительного воздействия на первичную плазму. Для создания корректных методик определения интенсивностей, а значит, и концентраций химических элементов, входящих в состав сплава, необходимо также учитывать внешние факторы (параметры лазерного излучения, давление окружающего газа). Метод двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии в качестве источника возбуждения эмиссионных спектров использует сдвоенные лазерные импульсы, сдвинутые друг относительно друга во времени. Это позволяет увеличить аналитический сигнал и снизить погрешность анализа [3].

Для проведения такого рода исследований использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1, где в качестве источника возбуждения плазмы в спектрометре используется двухимпульсный неодимовый лазер с регулируемой энергией и интервалом между импульсами (модель LS2131 DM). Лазер может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов составляет порядка 15 нс. Временной сдвиг между сдвоенными импульсами может изменяться от 0 до 100 мкс с шагом 1 мкс. Для изучения динамики образования лазерной плазмы и дальнейшего послойного анализа сплавов была изучена по эмиссионным спектрам атомов, входящих в состав материала, зависимость интенсивности линий элементов от количества и номера воздействующих одиночных и сдвоенных лазерных импульсов на мишень в атмосфере воздуха [4]. С этой целью в ходе проведенных предварительных исследований были выбраны следующие длины волн аналитических линий: для железа – Fe (438.426 нм), для олова – Sn (452.56 нм), для цинка – Zn (481.205 нм). Следует также отметить, что при атомно-эмиссионном анализе многокомпонентных сплавов серьезную проблему представляет собой также зависимость от «третьих» элементов процессов поступления цинка в плазму, что осложняет определение концентрации основных компонентов при возбуждении спектров [1, 4].

Чтобы проиллюстрировать возможность напыления частиц олова на рабочую поверхность, был исследован результат воздействия серии сдвоенных лазерных импульсов на мишень, расположенную под углом 70° к падающему излучению. В качестве примера, на рис. 1 приведено изображение поверхности нанопленки частиц олова на стекле. Эксперимент проводился при энергии накачки лазера 20 Дж. Для демонстрации особенностей полученных пленок использовался микроинтерферометр Линника МИИ-4, дающий увеличение в 25 раз.

Как видно из рисунка 1, напыленная лазерным излучением поверхность имеет довольно разрыхленную структуру.

С использованием оптимальных рабочих условий (энергия импульсов – 49 мДж и 46 мДж, временной интервал между импульсами – 10 мкс, число последовательных сдвоенных импульсов в серии – 250) был проведен послойный анализ оловянной пленки на оцинкованном железе. Данные выполненных исследований приведены на рисунке 2.

Как видно из полученных данных, линия цинка начинает проявляться после 55-го импульса, когда имеет место пробой оловянной пленки. И цинк, и железо практически равномерно поступают в лазерный факел

после образования полноценного канала, когда интенсивность линии становится примерно на одном уровне: после 100-го импульса. При этом олово также достаточно хорошо поступает в лазерный факел.

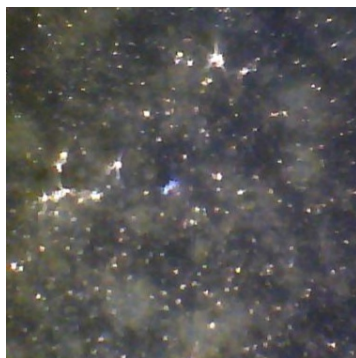


Рисунок 1 – Внешний вид наноплёнки олова на стеклянной поверхности



Рисунок 2 – Послойный анализ плёнки олова, напылённой на поверхность оцинкованного железа

Таким образом, выполненные спектроскопические исследования характеристик лазерной плазмы, образуемой вблизи поверхности мишени, при воздействии на нее серии сдвоенных последовательных импульсов показали возможность контроля и управления характеристиками плазмы. В зависимости от концентрации исходных металлов в используемых сплавах можно варьировать числом и размерами кластеров, входящих в состав пленки. В зависимости от состава соединений данным способом возможно получение нанопорошков и нанопленок как чистых металлов, так и композиционных составов.

Список литературы

1. Жерихин, А. Н. Лазерное напыление тонких пленок / А. Н. Жерихин // Итоги науки и техники. Сер. «Проблемы лазерной физики». – М. : ВИНТИ, 1990. – 107 с.
2. J. Anal. At. Spectrom / Ph. Rohwetter [et al.]. – 2004. – Vol. 19. – P. 437–444.
3. Laser ablation for analytical sampling: what can we learn from modeling? / A. Bogaerts [et al.] // Spectrochimica Acta, Part B : Atomic Spectroscopy. – 2003. – Vol. 58, № 11. – P. 1867–1893.
4. Атомно-эмиссионный многоканальный спектральный анализ: научное и практическое применение / Е. С. Воропай [и др.] // Вестн. Бел. гос. ун-та. Сер. 1. – 2009. – № 1. – С. 14–20.

The possibility of layer-by-layer analysis of the deposition of the nanofilms on the surface of various materials under the action of high-power laser pulses in air is experimentally shown. The experiments were performed using laser double-pulse atomic emission spectrometer LSS-1. The obtained results have been summarized.

Малец Мария Александровна, студентка 3 курса факультета электросвязи Белорусской государственной академии связи, Минск, Республика Беларусь.

Соколовский Владислав Сергеевич, студент 2 курса факультета электросвязи Белорусской государственной академии связи, Минск, Республика Беларусь.

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

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

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

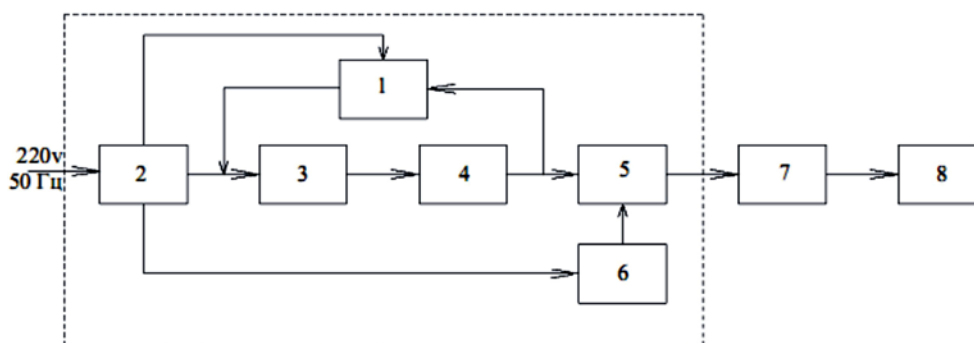
С. А. МАРТЫНОВИЧ

МИЛЛИСЕКУНДНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВЗРЫВ ТОНКИХ ПРОВОДНИКОВ ИЗ МЕДИ И ГРАФИТА В ВОДЕ

Практически реализован способ получения частиц нано- и субмикронного размерного уровня методом электрического взрыва в дистиллированной воде таких материалов, как медь и графит. Выявлено, что преимущественно образуются частицы с размером до 100 нм. Доля более крупных частиц относительно невелика. Установлена экспериментальная зависимость параметров распределения частиц по размерам от условий их синтеза.

Мировые тенденции развития новых способов получения наноматериалов показывают широкое развитие методов получения наноразмерных структур в плазме электроимпульсного разряда в жидкостях. Метод получения наночастиц, использующий импульсный электрический разряд в жидкостях, позволяет получать наноразмерные частицы сложного состава, а также имеется возможность управления параметрами наночастиц посредством изменения режимов разряда [1]. Достоинствами методов получения наноразмерных структур в плазме электроимпульсного разряда в жидкостях является возможность их применения для широкого спектра веществ: для проводящих, непроводящих, полупроводниковых, тугоплавких, композиционных и т. д. [2]. Эти методы характеризуются достаточно высокой производительностью, относительной дешевизной и простотой реализации. Выбор режима разряда, типа рабочей жидкости позволяет контролировать состав и параметры получаемых наноструктур [3].

Экспериментальные исследования проводили на установке, описанной в работе [13]. Данная установка позволяла формировать высоковольтные сильноточные импульсы миллисекундной длительности. Энергия в импульсе могла изменяться от 0,5 до 10 кДж. Установка собрана в виде единого блока с выведенным наружу высоковольтным кабелем и системой электродов для крепления образцов. Электропитание установки осуществлялось от однофазной сети 220 В, 50 Гц. Структурная схема установки представлена на рисунке 1.



1 – пульт управления; 2 – источник питания; 3 – балластный резистор; 4 – накопитель; коммутатор;
6 – устройство поджига; 7 – высоковольтный кабель; 8 – разрядная камера

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Емкость заполнялась дистиллированной водой. Разряд производился при энергии $E = 1,5$ кДж и большей. В качестве образцов для получения наночастиц в воде использовалась медная проволока марки М1 диаметром 0,15 мм и длиной 80 мм, а также графитовый стержень марки МГ-1 диаметром 0,7 мм и длиной 60 мм. Эксперименты проводили в одинаковых объемах жидкости, равных 500 мл. Исследования размерных характеристик полученных частиц проводили с использованием атомно-силового микроскопа NT-206.

На рисунке 2 представлены обработанные АСМ-изображения частиц, полученных вследствие взрыва в дистиллированной воде образцов меди и графита.

Данные изображения свидетельствуют о том, что в результате разрушения исходного материала в воде образуются частицы преимущественно сферической формы. При анализе сухого осадка коллоидного раствора меди на предметном стекле видно, что частицы расположены хаотично, а характерные скопления и конгломераты, образованные из наночастиц, не просматриваются на поле сканирования. Частицы меди (рисунок 2а) имеют четкий контур границ и явно малую высоту профиля. В сухом осадке коллоидного раствора графита на предметном стекле видно, что частицы также расположены хаотично, однако наблюдаются отдельные характерные скопления и конгломераты, образованные наночастицами в поле сканирования.

Процентное распределение размерных характеристик наночастиц, полученных в результате эксперимента (по оси z на АСМ-изображениях), представлено на рисунке 3.

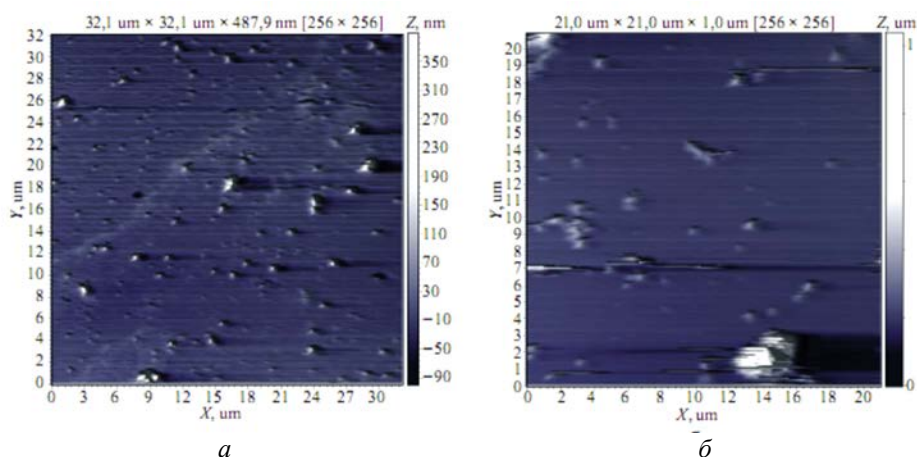


Рисунок 2 – Изображение частиц меди (а) и графита (б) в дистиллированной воде

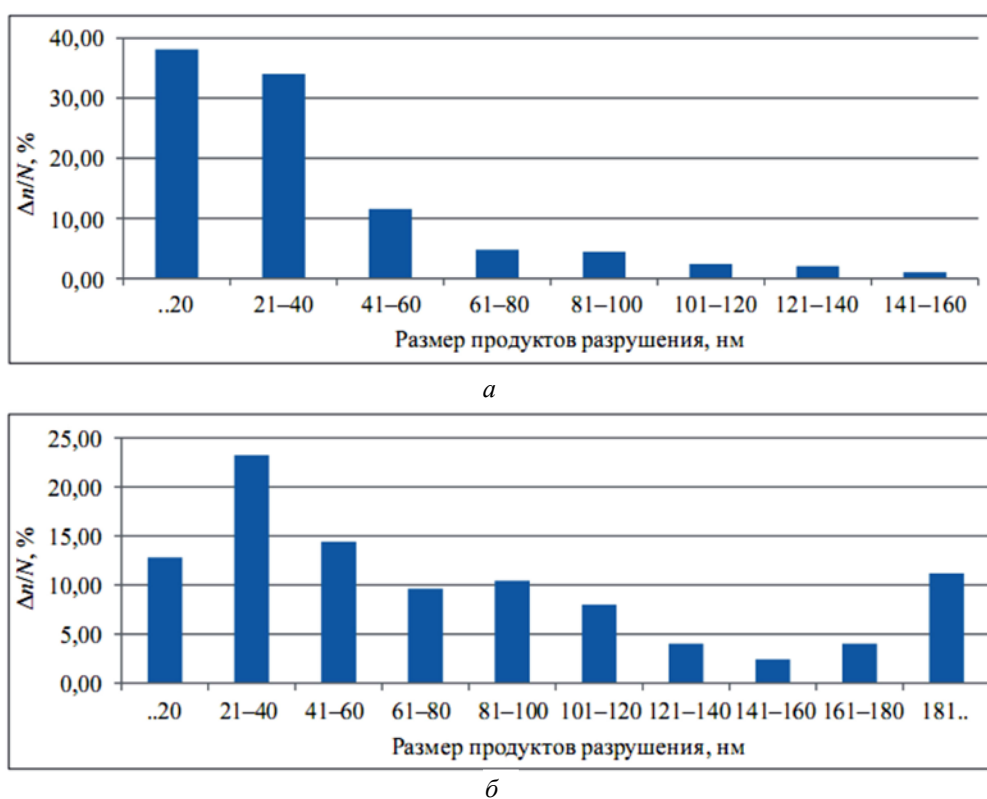


Рисунок 3 – Гистограмма распределения частиц, полученных при разрушении меди (а) и графита (б) электроразрядным методом в дистиллированной воде

Как видно из рисунка 3а, порядка 38 % полученных частиц имеют размер до 20 нм. Гистограмма распределения частиц меди в диапазоне 20–160 нм близка к экспоненциальному закону. Из гистограммы видно, что 72 % частиц, полученных в результате разрушения меди, представляют собой наночастицы размером до 40 нм. При этом доля продуктов размерностью свыше 100 нм незначительна.

Внешний вид гистограммы распределения частиц графита представлен на рисунке 3б. Максимум распределения приходится на диапазон 20–40 нм. На этот размерный диапазон приходится порядка 23 % частиц. Распределение размерных характеристик продуктов разрушения графита более пологое. Порядка 70 % всех частиц имеют размер до 100 нм, при этом всего лишь 36 % – до 40 нм. Наименьшее количество частиц приходится на размерный диапазон 140–160 нм и составляет около 3 %. В диапазоне 160–180 нм и выше наблюдается рост размеров наночастиц. Доля продуктов с размерностью свыше 180 нм для меди крайне мала, в то время как для графита она составила более 10 %. Это, по-видимому, обусловлено тем, что более «мелкие» наночастицы образуют конгломераты, которые просматриваются на АСМ-изображениях.

В результате проведенных исследований практически реализован способ получения частиц нано- и субмикронного размерного диапазона методом электроразрядного разрушения материала в жидкости. Получены гистограммы распределения размерных характеристик продуктов разрушения таких материалов, как медь и графит, в дистиллированной воде. Выявлено, что при разрушениях нескольких образцов в одном и том же объеме жидкости возрастает доля крупных частиц (свыше 100 нм) и уменьшается доля мелких. Исходя из полученных значений размерного распределения, определена концентрация частиц в получаемых коллоидных растворах. Полученные результаты исследований наночастиц и коллоидных растворов на их основе делают привлекательным данный метод для дальнейшего изучения и практического применения. В частности, интерес представляет реализация метода в других жидкостях.

Список литературы

1. Получение металлических наночастиц из водных растворов в плазме искрового разряда / А. М. Орлов [и др.] // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, вып. 9. – С. 24–30.
2. Tarasenko, A. Properties of Zinc Oxide Nanoparticles Synthesized by Electrical Discharge Technique in Liquids / N. Tarasenko, A. Nevar, M. Nedelko // Phys. Status Solidi A. – 2010. – Vol. 207, No. 10. – P. 2319–2322.
3. Synthesis of tungsten carbide nanopowder via submerged discharge method / V. S. Burakov [et al.] // J. Nanopart. Res. – 2008. – Vol. 10, No. 5. – P. 881–886.

A method for obtaining nano- and submicron-sized particles by the method of electric explosion in distilled water of materials such as copper and graphite has been practically implemented. It was found that particles with a size of up to 100 nm are predominantly formed. The proportion of larger particles is relatively small. An experimental dependence of the particle size distribution parameters on the conditions of their synthesis has been established.

Мартынович Сергей Александрович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, segg2000@mail.ru.

Научный руководитель – *Тарковский Викентий Викентьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, tarkovsky@grsu.by.

УДК 539.2

С. А. НУРЕТДИНОВ

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены основные методы получения наночастиц для модификации композитных материалов, а также особенности методов импульсной лазерной абляции и электрического взрыва проводников в жидкости. Приведены технологические параметры синтеза наночастиц. Проведены исследования по получению частиц методом химического синтеза из мономолекулярной пленки реагента на поверхности воды в виде частиц из оксида кремния с дальнейшим напылением на их поверхность металлического титана.

В последние годы интерес к нанотехнологиям значительно возрос. Наноматериалы нашли широкое применение науке, производстве, технологических процессах. Наблюдается повышенный интерес к методам получения наночастиц. Развитие методов синтеза наночастиц с требуемыми свойствами (нужным размером, формой, химическим составом и структурой) является актуальной и важной с точки зрения практики задачей.

Методы получения наноструктурированных материалов, условно можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы, в которых происходит синтез наночастиц из свободных атомов и молекул. Методы этой группы, как правило, базируются на химическом подходе. Ко второй относятся методы, в которых наночастицы получают с помощью диспергирования заготовок, крупных частиц или порошков. Методы второй группы базируются на физическом подходе. Используя эти две различные группы технологий, получают наноматериалы одного и того же химического состава, но с разными физико-химическими свойствами [1].

Одним из наиболее простых способов получения наночастиц является конденсация пара вещества в разреженной атмосфере инертного газа. Этот метод можно использовать для получения наночастиц как простых, так и сложных веществ [2]. Перешедшие в пар атомы вещества, столкнувшись с атомами инертного газа, образуют наночастицы, стремительно теряя при этом кинетическую энергию. Формирование частиц нужного размера регулируется подбором давления инертного газа.

Наиболее распространенным методом получения высокодисперсных порошков карбидов, боридов, нитридов и оксидов является плазмохимический синтез. Этот метод характеризуется использованием низкотемпературной (4000–10000 К) азотной, аммиачной, водородной, углеводородной либо аргоновой

плазмы, созданной с помощью дугowego, тлеющего, высоко- или сверхвысокочастотного разрядов. Частицы таких порошков чаще всего представляют собой монокристаллы размерами от 10 до 100 нм и более [3].

Метод химического осаждения из коллоидных растворов широко применяется для синтеза высокодисперсных порошков. Для получения наночастиц из коллоидных растворов химическую реакцию между компонентами раствора прерывают в определенный момент времени, после чего систему переводят из жидкого (коллоидного) в твердое (дисперсное) состояние. Осаждение из водных коллоидных растворов применяют для получения различных халькогенидов (сульфидов, селенидов, теллуридов) металлов, обладающих полупроводниковыми свойствами. Этим методом осуществляют легирование неорганических соединений различными элементами, а также органоимодифицирование частиц неорганической природы.

При получении нанокристаллических порошков металлов и их соединений с помощью пиролиза (термического разложения) исходными веществами обычно служат металлоорганические соединения, полимеры, гидроксиды, карбонилы, формиаты, нитраты, оксалаты, амиды, имидазы, азида металлов. Эти вещества содержат все или почти все химические элементы, которые должны присутствовать в получаемом продукте. При нагреве до определенной температуры исходные вещества разлагаются с образованием синтезируемого продукта и выделением газообразных соединений.

Существует еще один вид механического воздействия, при котором одновременно создаются условия, как для размельчения исходных веществ, так и для синтеза конечного продукта, – воздействие ударной волны. Детонацию взрывчатых веществ – энергию взрыва – широко используют для осуществления фазовых переходов и синтеза новых соединений. Детонационный синтез нанопорошков протекает в динамических условиях, при которых важную роль играют кинетические процессы.

Для получения наноструктурированных материалов также используется лазерная абляция твердых тел в жидкостях [4–5]. Для этой цели широко используют YAG:Nd³⁺-лазеры излучающие на 1,06 нм. Весьма эффективно происходит лазерная абляция с использованием эксимерных лазеров [6–7]. Это связано с высокой поглощательной способностью большинства веществ ультрафиолетового излучения, которое генерируется лазерами этого типа. При генерации наночастиц в жидкостях появляется возможность управлять их распределением по размеру за счет изменения параметров (длительности, энергии, мощности и длины волны) лазерного излучения в процессе абляции.

Физические процессы, связанные с образованием лазерной плазмы, разлетом ее и последующим синтезом и осаждением продуктов настолько многофакторны, что далеко не всегда удается получить простые закономерности, описывающие эти процессы. Температура лазерной плазмы определяет наличие в ней ионов, электронов, радикалов и нейтральных частиц, находящихся в возбужденном состоянии, что приводит к высоким скоростям взаимодействия и быстрому протеканию реакций. Высокая температура обеспечивает переход практически всех исходных веществ в газообразное состояние и последующую конденсацию продуктов.

Процесс лазерного наноструктурирования материалов можно разделить две стадии. Первая представляет собой испарение мишени под воздействием лазерного излучения – и создание лазерной плазмы содержащей пары диспергируемого материала. На второй стадии происходит синтез ультрадисперсного порошка из паровой фазы и активированного газа. Пары диспергируемого материала образуют соединения с ионизированными химическими элементами газов, составляющих плазму (нитриды, оксиды).

Поэтому, чтобы получать ультрадисперсные порошки и сверхтонкие пленки, необходимо варьировать условия испарения. Состав и размер наночастиц можно контролировать изменением давления и состава атмосферы, мощностью лазерного импульса, температурного градиента между испаряемой мишенью и поверхностью, на которую происходит конденсация. Природа абляционных процессов зависит как от типа материала, так и от состава окружающей среды. Однако в большей степени суть процессов определяется характеристиками лазерного излучения, такими, как интенсивность, длительность импульса, длина волны, частота повторения и число импульсов. Использование метода лазерной абляции со сдвоенными лазерными импульсами позволяет более целенаправленно влиять на компонентный и зарядовый состав потока лазерной плазмы и синтезируемых в ней наночастиц [8–9].

Относительно новым методом получения наночастиц является метод электровзрыва проводника при прохождении по нему мощного импульса тока плотностью 10^4 – 10^6 А × мм² и длительностью 10^{-5} – 10^{-7} с [10–12]. Для этой цели используют проволоку диаметром 0,1–1,0 мм. Электрический взрыв проводника сопровождается резким изменением агрегатного состояния металла в результате интенсивного выделения в нем энергии, а также генерацией ударных волн, при этом создаются условия для быстрого (со скоростью более 10^7 К/с) нагрева металлов до высоких температур ($T > 10^4$ К). На начальной стадии электровзрыва нагрев проводника сопровождается его линейным расширением с относительно небольшой скоростью (1–3 м/с). На стадии взрыва металл перегревается выше температуры плавления, расширение вещества происходит со скоростью до 5×10^3 м/с и перегретый металл взрывообразно диспергируется.

Электрический взрыв представляет собой последовательность процессов и явлений, происходящих при очень быстром тепловом нагреве проводников путем пропускания через них импульсных токов большой

величины. В этом случае температура в плазменном канале значительно превышает температуру испарения металла. В процессе электрического взрыва происходят следующие фазовые переходы: металл – жидкость – пары металла – металлическая плазма. Электрический взрыв проводников сопровождается ударными волнами, химическими реакциями, яркой вспышкой света.

В настоящее время электровзрывные методы получения металлических наноразмерных материалов, химических соединений и различных нанофазных материалов активно исследуются и развивается [10–12]. Образование частиц наноразмерного уровня происходит в процессе рекомбинации и остывающей электровзрывной плазмы. После прекращения импульсного тока прекращается энерговклад в плазму разрядного канала. Температура и давление в плазменном канале снижаются. Под действием давления окружающей его жидкости он сжимается. Столкновения атомов и ионов плазмы друг с другом и молекулами окружающей разрядный канал жидкости приводит к плазмо-химическим реакциям, образованию кластеров и наночастиц, т. е. к наноструктурной конденсации вещества электровзрывной плазмы.

Использование электрического взрыва проводников в жидкой среде дает возможность ускорить процесс охлаждения созданной плазмы и стабилизировать образовавшиеся наноструктуры. Варьируя технологические режимы электровзрывного разряда можно управлять составом, размерным распределением, морфологией, физическими, химическими и другими свойствами получаемых наноматериалов. Электровзрывные методы позволяют получать наноструктурированные оксиды, нитриды, карбиды и т. д.

Электрический взрыв проводников является неравновесным процессом. Под действием импульса электрического тока проводящий материал диспергируется, а образованные продукты на границе плазменный канал – окружающая жидкость перемешиваются между собой. По своей природе этот метод получения наноматериалов относится к диспергационно-конденсационным: на первой стадии происходит дробление (взрыв) проводника, а на второй стадии формирование (синтез) наноструктур.

Атомно-силовая микроскопия наночастиц, полученных электрическим взрывом проводников, показала наличие обособленных частиц близких по форме к сферической, овальной и пирамидальной. В поле сканирования атомно-силового микроскопа наблюдались поля, равномерно усеянные наночастицами. В размерном диапазоне 40–100 нм находилось порядка 60 % наночастиц. Боковые 3D атомно-силовые проекции также показывали наличие сплошного покрытия поля сканирования наночастицами, а также наличие вкраплений частиц субмикронного уровня. Скопления и конгломераты, образованные из наночастиц, в поле сканирования атомно-силового микроскопа расположены не системно.

Основным отличием плазменных методов синтеза от их газофазных аналогов является возможность достижения более узких распределений синтезируемых частиц по размерам. Также, получение частиц непосредственно в жидкости позволяет опустить этап смешивания, при котором, зачастую, образуются конгломераты микронного уровня. Метод получения наночастиц использующий импульсный электрический разряд в жидкостях позволяет получать наноразмерные частицы сложного состава, а также имеется возможность управления параметрами наночастиц посредством изменения режимов разряда.

Получение наночастиц хотя и является важной научной и технической задачей, однако их внедрение в термопластичные композиционные материалы на основе полиолефинов приводит к модификации физико-химических и механо-прочностных свойств последних. Термопластичные композиционные материалы в этом случае используются в качестве матрицы, внутри которой распределены наночастицы, которые могут иметь различную структуру и химический состав. В итоге повышаются ударопрочность и износостойкость изделий, изготовленных из модифицированных композиционных материалов, стойкость их к химическим воздействиям, что позволяет использовать их в агрессивных условиях функционирования, нагруженных узлах и агрегатах.

Таким образом, получают наноккомпозиты – объекты, где наночастицы упакованы вместе в макроскопический образец, в котором межчастичные и межфазные взаимодействия становятся сильными и маскируют свойства изолированных частиц. Для каждого вида взаимодействий важно знать, как изменяются свойства материала в связи с его размерами. Масштабы производства модифицированных композиционных материалов с каждым годом возрастают. Разрабатываются новые их виды, улучшаются их механические, физические и другие свойства. Использование композиционных материалов с улучшенными свойствами приводит к изменению самих технологий их применения [13].

Список литературы

1. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения : учеб. пособие / Б. М. Балоян [и др.]. – М., 2007. – 124 с.
2. Friedrichs, O. Synthesis of nanocrystalline MgH_2 powder by gas-phase condensation and in situ hydridation: TEM, XPS and XRD study / O. Friedrichs, L. Kolodziejczyk, J. C. Sanchez-Lopez, C. Lopez-Cartes // J. Alloys and Compounds. – 2007. – Vol. 434–435. – P. 721–724.
3. Получение ультрадисперсных частиц SiO_2 в реакторе ВЧИ разряда / В. Е. Катнов [и др.] // Вестн. Казан. технол. ун-та. – 2011. – № 14. – С. 220–223.
4. Получение наночастиц лазерной абляцией твердых тел в жидкости в режиме наносекундных импульсов / С. Д. Лещик [и др.] // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 84–87.

5. Зноско, К. Ф. Оптимизация двухимпульсного режима лазерной абляции цветных металлов / К. Ф. Зноско, С. Д. Лещик // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 6. – 2021. – Т. 11, № 1. – С. 45–58.
6. Ануфрик, С. С. Энергетические характеристики XeCl-лазера с возбуждением LC-инвертором / С. С. Ануфрик, А. П. Володенков, К. Ф. Зноско // Журнал прикладной спектроскопии. – 1999. – Т. 66, № 5. – С. 702–707.
7. Ануфрик, С. С. Влияние параметров LC-контура на энергию генерации XeCl-лазера / С. С. Ануфрик, К. Ф. Зноско, А. Д. Курганский // Квантовая электроника. – 1989. – Т. 16, № 11. – С. 2228–2231.
8. Зноско, К. Ф. Усиление интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы при ее формировании сдвоенными лазерными импульсами / К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 103–115.
9. Зноско, К. Ф. Рост эффективности взаимодействия сдвоенных импульсов YAG:Nd³⁺-лазера с Al мишенью при уменьшении межимпульсного интервала / К. Ф. Зноско // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2020. – Т. 10, № 3. – С. 100–113.
10. Сергиенко, И. Г. Получение наноразмерных частиц методом электроразрядного разрушения материалов в жидкости и исследование их свойств / И. Г. Сергиенко, К. Ф. Зноско, В. В. Тарковский // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка. – 2017. – Т. 7, № 1. – С. 56–65.
11. Сергиенко, И. Г. Получение наночастиц и суспензий на их основе методом электроразрядного разрушения в жидкости при микросекундном импульсе / И. Г. Сергиенко, К. Ф. Зноско, В. В. Тарковский // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 6, Тэхніка. – 2018. – Т. 8, № 1. – С. 50–61.
12. Сергиенко, И. Г. Влияние временного фактора на поведение наночастиц меди и суспензий на их основе, полученных методами импульсной лазерной абляции и электроразрядного разрушения / И. Г. Сергиенко, К. Ф. Зноско, С. Д. Лещик // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 6. – 2017. – Т. 7, № 2. – С. 47–57.
13. Материаловедение в машиностроении и промышленных технологиях : учеб.-справ. рук. / В. А. Струк [и др.]. – Долгопрудный : Изд. дом «Интеллект», 2010. – С. 84.

The main methods of obtaining nanoparticles for modification of composite materials are considered. The features of methods of pulsed laser ablation and electric explosion of conductors in a liquid are given. The technological parameters of the synthesis of nanoparticles are given. Studies have been carried out to obtain particles by chemical synthesis from a monomolecular reagent film on the surface of water in the form of silicon oxide particles with further deposition of metallic titanium on their surface.

Нуретдинов Сергей Александрович, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, sergey.admin@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, Республика Беларусь, Simple11@rambler.ru.

УДК 535.555:535.515:535.394.5

Е. П. ПАНТЕЛЕЕВА

ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫЕ ПЛАНАРНЫЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ С СИСТЕМОЙ ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ ВОЛНОВОДОВ

Сочетание уникальных свойств нематических жидких кристаллов (НЖК) открывает перспективу для создания новых относительно простых, надёжных и недорогих оптических устройств для приложений интегральной фотоники. В ходе выполнения работы была разработана новая геометрия текстурированного электрода, обеспечивающая формирование связанных поляризационно-чувствительных волноводных каналов в НЖК-слое. Изготовлен и исследован управляемый ЖК-элемент с электрически индуцированными волноводными каналами.

ЖК волноводный элемент (рис. 1) представляет собой стандартную ячейку сэндвич-типа [1]. Одна из стеклянных подложек содержит прозрачное проводящее покрытие – оксид Индия-Олова (Indium-Oxide – ИТО). Другая подложка содержит две непрозрачные системы электродов («кольца» и «стержни» (рис. 2)), сформированные методом лазерной литографии, с возможностью независимого включения. Толщина НЖК-слоя ($d = 20$ мкм) определялась величиной зазора между подложками и задавалась оптоволоконными спейсерами. Показатели преломления положительного НЖК-материала, использованного в работе, для лазерного излучения на длине волны $\lambda = 632,8$ нм составляли: $n_e = 1,7$ для необыкновенной световой волны и $n_o = 1,5$ для обыкновенной световой волны.

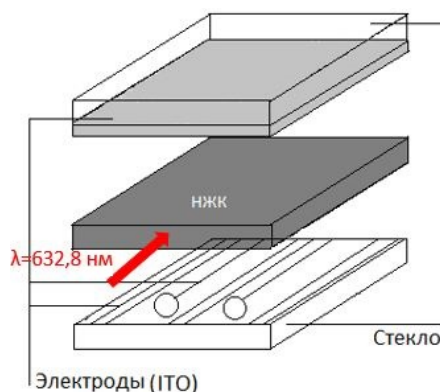


Рисунок 1 – Принципиальная схема одномерного волноводного массива в НЖК-слое с начальной планарной ориентацией директора

При отсутствии подачи управляющего напряжения на системы электродов «кольца» и «стержни» направление директора НЖК задавалось методом фотоориентации [2] и совпадало с направлением электродов типа «стержень». Волноводное распространение света в тонком слое НЖК происходило на основе эффекта полного внутреннего отражения (ПВО) [3]. Для реализации упомянутого эффекта прикладывалось внешнее управляющее напряжение, превышающее пороговое значение $U_t = 1,1$ В. При воздействии электрического поля происходит переориентация директора в областях слоя НЖК, которые находятся над включённой системой электродов (переход Фредерикса) (рис. 3) [4]. В результате происходит периодическое изменение показателя преломления в слое ЖК для поляризационной S-моды световой волны, начальная планарная ориентация директора сменяется на многодоменную структуру и реализуется волноводный режим (рис. 4). В областях, где на нижней подложке электропроводящий слой отсутствует, ориентация директора остается планарной. При 5-кратном превышении значения порогового напряжения ориентация директора переходит в гомеотропную ориентацию (директор ортогонален стеклянным подложкам).



Рисунок 2 – Поляризационная микрофотография нижней подложки с текстурированным электродом

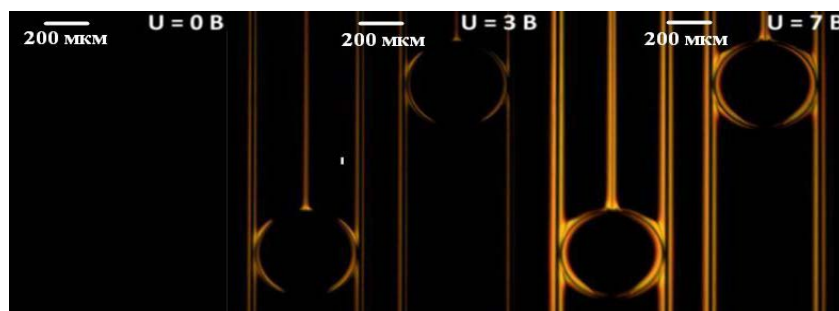


Рисунок 3 – Поляризационные микрофотографии ЖК-ячейки с текстурированными электродами «кольца» и «стержни» при различных значениях напряжения

На рисунке 4 экспериментально показано увеличение эффективной толщины волновода при увеличении значения управляющего напряжения, поданного на систему электродов «стержни», за счёт действия краевого электрического поля, что позволяет реализовать оптическую связь между двумя независимыми системами

волноводов «кольца» и «стержни» – захват излучения кольцевым резонатором (рис. 5). При отсутствии внешнего электрического поля расстояние между токопроводящими системами составляло порядка 10 мкм.

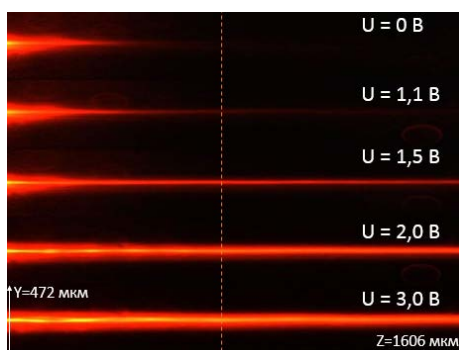


Рисунок 4 – Распространение S-моды лазерного излучения в электрически управляемой волноводной ЖК-структуре при различных значениях напряжения, поданного на систему электродов «стержни»

При одновременной подаче внешнего управляющего напряжения $U \gg U_t$ на системы электродов «кольца» и «стержни», реализуется пространственное разделение пучка лазерного излучения между волноводными каналами двух разных систем.

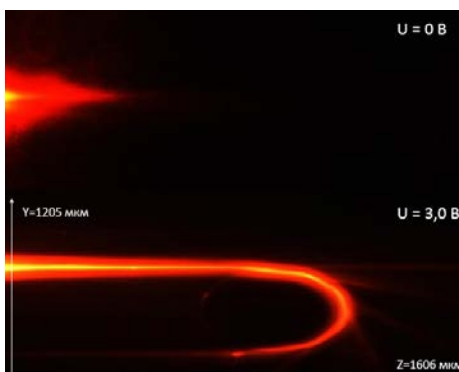


Рисунок 5 – Распространение S-моды лазерного излучения в электрически управляемой волноводной ЖК-структуре при различных значениях напряжения, поданного на системы электродов «стержни» и «кольца»

В работе предложен и экспериментально исследован электрически переключаемый волноводный НЖК-элемент, созданный с использованием двух независимых систем волноводных каналов. Продемонстрирована возможность управления траекторией лазерного излучения: захват излучения кольцевым резонатором. Полученные результаты имеют большое значение для решения актуальных задач интегральной фотоники.

Список литературы

1. Блинов, Л. М. Электрооптика и магнитооптика жидких кристаллов / Л. М. Блинов. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. – 384 с.
2. Patterned rubbing alignment technology / A. Muravsky [et al.] // SID Sympos. Dig. Tech. Pap. – 2010. – Vol. 41. – P. 1727–1730.
3. Пантелеева, Е. П. Электрически управляемые планарные кристаллические элементы / Е. П. Пантелеева // Физика конденсированного состояния : материалы XXVIII междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 17 апр. 2020 г. / ГрГУ им. Янки Купалы ; редкол.: А. Е. Герман (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2020. – С. 77–78.
4. Electrically controlled spatial-polarization switch based on patterned photoalignment of nematic liquid crystals / E. A. Melnikova [et al.] // Applied Optics. – 2016. – Vol. 55, № 23. – P. 6491–6495.

An electrically switchable waveguide nematic liquid crystal (NLC) element created using two independent waveguide channel systems has been proposed and experimentally investigated. The possibility of controlling the trajectory of laser radiation by capturing radiation with an annular resonator has been experimentally demonstrated.

Пантелеева Екатерина Петровна, студентка 5 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, fiz.pantelee@bsu.by.

Научный руководитель – *Мельникова Елена Александровна*, кандидат физико-математических наук, доцент, физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, Melnikova@bsu.by.

А. Б. ПЕТУХ

СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СПЛАВА ВТ6, ЛЕГИРОВАННОГО АТОМАМИ МЕДИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Представлены результаты исследования структурно-фазового состояния и микротвердости поверхностного слоя титанового сплава ВТ6, легированного атомами меди и подвергнутого воздействию компрессионных плазменных потоков (КПП) в атмосфере азота. Установлены механизмы наблюдаемых явлений.

Титановый сплав ВТ6 широко используется в медицине в качестве материала для изготовления конструкций различного функционального назначения (эндопротезах), имплантируемых на длительный срок. Однако в некоторых исследованиях было отмечено, что токсичные ванадий и алюминий, содержащиеся в составе сплава, могут со временем накапливаться в тканях органов человека и вызывать осложнения. Кроме того, операции по ревизионному эндопротезированию (замене эндопротеза) являются достаточно непредсказуемыми, и в некоторых случаях вышедший из строя искусственный сустав не может быть заменен. Наиболее частыми причинами для замены является изнашивание деталей, механическая поломка, либо инфицирование эндопротеза. Бактериальная инфекция – также одна из распространенных причин выхода из строя имплантатов на основе титана. Известно, что даже если операция проводится в строгих асептических условиях, средний уровень инфицирования ортопедических титановых имплантатов достигает 5 %. В связи с этим актуальным является создание новых сплавов на основе титана для использования в медицине или модификация существующих сплавов. Эффективным методом модификации свойств поверхностного слоя материалов является использование компрессионных плазменных потоков (КПП). Целью данной работы являлось легирование поверхностного слоя сплава ВТ6 атомами меди путем предварительного осаждения покрытия меди на поверхность сплава и последующего воздействия КПП и исследование его структурно-фазового состояния. Проведенные ранее исследования показали, что сплавы титана с медью обладают улучшенной стойкостью к бактериальному инфицированию.

На образцы сплава ВТ6 (86.45–90 ат. % Ti, 5.3–6.8 ат. % Al, 3.5–5.3 ат. % V) методом вакуумно-дугового осаждения наносилось покрытие меди толщиной 2 мкм. Обработка образцов осуществлялась в газоразрядном магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии в атмосфере азота на расстояниях 8–14 см. Длительность разряда составляла ~100 мкс. Напряжение на конденсаторной батарее составляло 4 кВ. Изменение расстояния до образца позволяло варьировать плотность энергии (Q), поглощенной поверхностью, в диапазоне 43–23 Дж/см². Структурно-фазовое состояние поверхностного слоя исследовалось методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV в излучении Cu K α в фокусировке параллельных пучков. Анализ морфологии поверхности и поперечного сечения был выполнен с использованием растрового электронного микроскопа LEO1455VP. Измерение микротвердости выполнялось на полуавтоматическом микротвердомере Виккерса Wolpert Wilson Instruments 402MVD при нагрузке 50 г и времени выдержки 10 с.

Анализ фазового состава показал, что на дифрактограмме образцов после обработки можно наблюдать исчезновение дифракционных линий меди, появление линий интерметаллидов системы Ti-Cu и линий нитрида титана TiN (рис. 1). Формирование нитрида титана при обработке КПП, генерируемых в атмосфере азота, обусловлено диффузионным насыщением поверхностных слоев азотом [1].

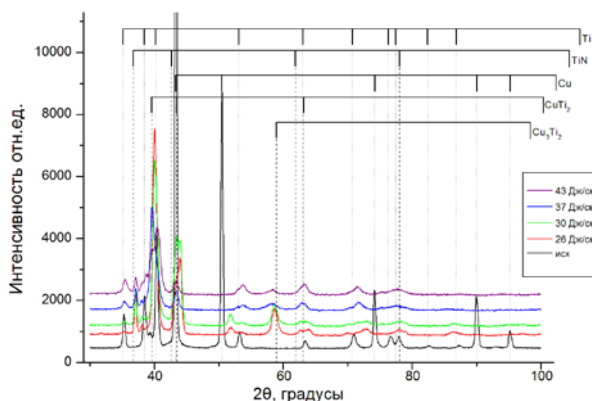


Рисунок 1 – Дифрактограммы исходного образца системы и образцов, обработанных тремя импульсами КПП при различной плотности поглощённой энергии

Согласно данным рентгеноструктурного анализа, с ростом Q от 26 до 43 Дж/см² происходит уменьшение интенсивности дифракционных линий интерметаллидов, что свидетельствует об уменьшении концентрации меди в поверхностном слое. Одной из причин уменьшения концентрации меди является увеличение интенсивности эрозии поверхностного слоя, что подтверждается данными измерения массы, удаленной с поверхности образца при плазменном воздействии (рис. 2). Как видно, количество массы, удаленной с единицы площади поверхности увеличивается с ростом поглощенной энергии [2].

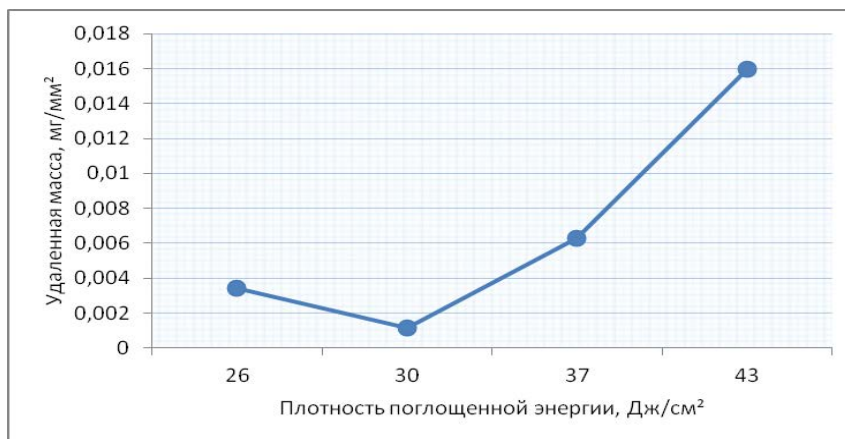


Рисунок 2 – Изменение массы образцов после обработки КПП при разных режимах

На фотографиях, полученных с помощью растровой электронной микроскопии, заметно изменение морфологии поверхности после воздействия КПП. Наблюдается формирование волнообразного рельефа, что свидетельствует о полном плавлении поверхностного слоя образцов. Можно сделать вывод о механизме эрозии, связанном с гидродинамическим течением расплава под давлением плазменного потока, растекающегося радиально вдоль поверхности, приводящим к выбросу части расплава за пределы образца.

Анализ поперечного сечения обработанного при $Q = 26$ Дж/см² образца показал, что толщина легированного слоя составляет 8 мкм (рис. 3). Кроме того, из рисунка видно, что в легированном слое наблюдается растворение выделений ванадия и уменьшение его концентрации.

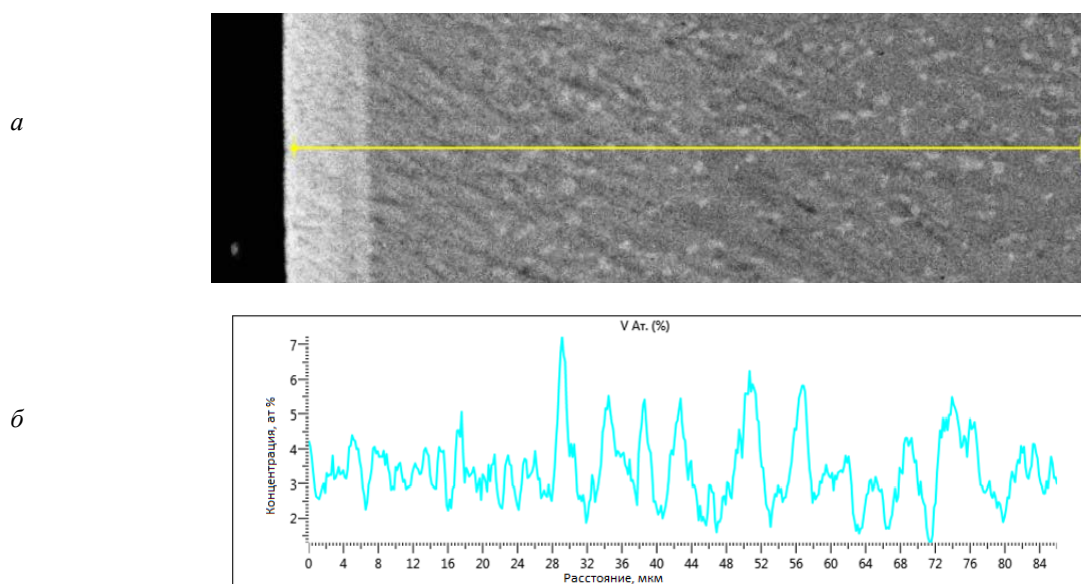


Рисунок 3 – Морфология поперечного сечения (а) и распределение ванадия по глубине поверхностного слоя (б) в образце, обработанном КПП при плотности поглощенной энергии 26 Дж/см²

Проведенные измерения микротвердости образцов (рис. 4) показали увеличение микротвердости от 170 Нv в исходном образце с покрытием до 438 Нv после обработки КПП с плотностью поглощенной энергии 43 Дж/см².

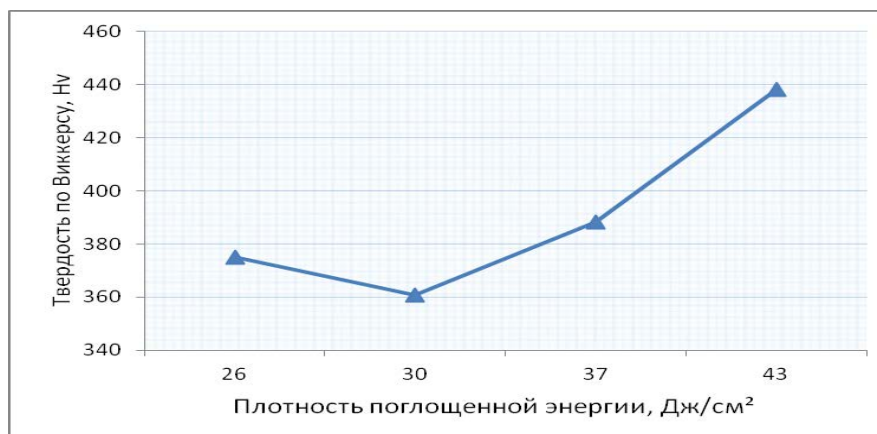


Рисунок 4 – Зависимость микротвёрдости образцов от плотности энергии, поглощённой поверхностным слоем

Таким образом, было показано, что легирование титанового сплава атомами меди под действием компрессионных плазменных потоков приводит к формированию в поверхностном слое интерметаллидов системы Ti-Cu, нитрида TiN, уменьшению концентрации токсичного ванадия и увеличению значения микротвёрдости в 2,5 раза.

Список литературы

1. Surface nitriding and alloying of steels with Ti and Nb atoms by compression plasma flows treatment / N. N. Cherenda [et al.] // Vacuum. – 2016. – Vol. 129. – P. 170–177.
2. Эрозия материалов при воздействии компрессионных плазменных потоков / Н. Н. Черенда [и др.] // Перспективные материалы. – 2014. – № 11. – С. 5–14.

Investigation of structure, phase composition and microhardness changes of titanium alloy Ti-6Al-4V surface layer alloyed by copper atoms under the action of compression plasma flows generated in nitrogen atmosphere was carried out in this work. The mechanisms of the observed phenomena were established.

Петух Александра Борисовна, студентка 4 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, alya.petukh.01@mail.ru.

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

УДК 577.346:577.352.333

Е. И. ПЛИГИН

ФЕРСТЕРОВСКИЙ ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ МЕЖДУ ТИОФЛАВИНОМ Т И ЕГО ПРОИЗВОДНОЙ ПРИ ДОБАВЛЕНИИ АМИЛОИДНЫХ ФИБРИЛЛ

Изучен перенос энергии электронного возбуждения между молекулами Тиофлавина Т (ThT), его бензтиазоловой производной (Th-C23) при их встраивании в амилоидные фибриллы. Экспериментально показан эффективный перенос энергии между ThT, являющимся донором и акцептором Th-C23. На основании измерения спектра поглощения акцептора и спектра флуоресценции донора рассчитан ферстеровский радиус переноса энергии, который для исследуемого комплекса может принимать значения от 46 до 68 Å.

Как известно, Тиофлавин Т (ThT) является флуоресцентным молекулярным ротором [1]. Молекулярные роторы характеризуются сильной зависимостью квантового выхода и длительности затухания флуоресценции от вязкости и жесткости микроокружения. Эта закономерность отлично себя проявляет при встраивании молекулярных роторов в биополимеры.

Перспективным применением молекулярных роторов, в особенности ThT, является их использование для детекции и изучения амилоидных фибрилл (АФ), образование которых в организме человека влекут за собой ряд нейродегенеративных заболеваний [2]. Тиофлавин Т считается одним из лучших флуоресцентных маркеров для исследования АФ. Однако он флуоресцирует в сине-зеленой области, где существенно поглощение биологических тканей. Вследствие чего перспективны исследования новых производных ThT, которые излучают в красной или ближней ИК области.

Таким соединением является бензтиазоловый краситель Th-C23. В предыдущих наших работах показано, что он излучает в красной области спектра. Также был исследован механизм встраивания Th-C23 в АФ. Установлено, что квантовый выход флуоресценции водного раствора Th-C23 является крайне малым, но при добавлении АФ имеет место возрастание интенсивности флуоресценции в ~135 раз [3, 4].

Для дальнейшего изучения геометрии встраивания красителя в белки, используется перенос энергии. В настоящей работе исследована донорно-акцепторная пара: Тиофлавин Т и его бензтиазоловая производная Th-C23 в комплексе с АФ. Ожидается эффективный перенос энергии, т. к. наблюдается большая область перекрытия спектра флуоресценции ThT и спектра поглощения Th-C23.

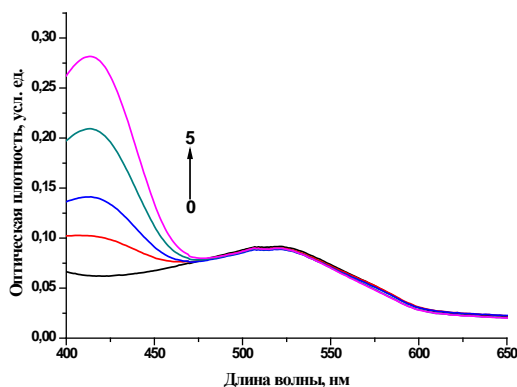


Рисунок 1 – Спектры поглощения Th-C23 (5 мкмоль/л) + АФ (0,05 мг/мл) с добавлением 0; 1; 2; 4; 6 мкмоль/л ThT

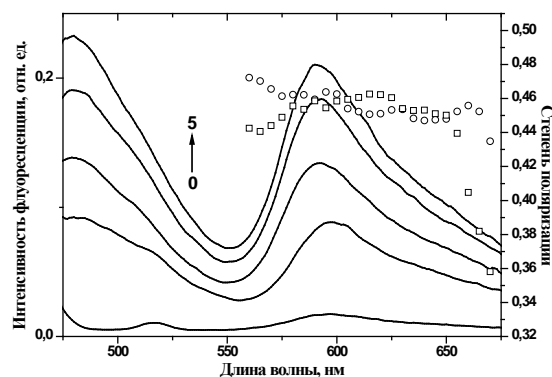


Рисунок 2 – Спектры флуоресценции Th-C23 (5 мкмоль/л) + АФ (0,05 мг/мл) с добавлением 0; 1; 2; 4; 6 мкмоль/л ThT. Длинна волны возбуждения 440 нм. Зависимость степени поляризации от длины волны при возбуждении на 440 (○) и 530 (□) нм

На рисунке 1 приведен спектр поглощения исследуемой системы Th-C23+ThT+АФ, на котором можно наблюдать, что при увеличении концентрации ThT, ожидаемо возрастает оптическая плотность полосы поглощения Тиофлавина Т, около 420 нм. Максимум поглощения красителя Th-C23, приходящийся на длину волны 520 нм, в свою очередь никак не изменяется.

На рисунке 2 изображен спектр флуоресценции исследуемой системы, на котором можно наблюдать, что при возбуждении исследуемого комплекса в полосу поглощения ThT (440 нм) при увеличении концентрации ThT имеет место увеличение интенсивности флуоресценции не только донора (около 480 нм), но и на длине волны испускания акцептора (Th-C23, ~590 нм). Из чего можно сделать вывод, что увеличение интенсивности флуоресценции Th-C23 в комплексе достигается благодаря индуктивно-резонансному переносу энергии от донора ThT к акцептору Th-C23.

Известно, что при переносе энергии в растворе флуоресценция акцептора деполаризуется [5]. Однако проведенные исследования степени поляризации комплекса говорят об обратном (рис. 2). Степень поляризации флуоресценции Th-C23 остается высокой (около 0,45), как при возбуждении в полосу поглощения донора (440 нм), так и в полосу поглощения акцептора (530 нм). Отсутствие деполаризации флуоресценции при переносе энергии возможно только в случае, если молекулы донора и акцептора находятся в жестких условиях и их моменты переходов либо параллельны, либо антипараллельны. Эти условия достигаются благодаря наличию в растворе амилоидных фибрилл. Как известно молекулы ThT фиксируются в «бороздках» АФ с ограничением изменения конформации этих молекул [1, 4]. Поэтому можно предположить, что молекулы Th-C-23 встраиваются так же, как и ThT, располагаясь длинной осью вдоль борозки фибрилл.

Для оценки эффективности переноса энергии был рассчитан ферстеровский радиус – радиус переноса, при котором константа скорости переноса равна константе скорости излучательного процесса. Этот параметр, выраженный в ангстремах, может быть определен из соотношения:

$$R_0 = 8,8 \cdot 10^{-25} k^2 q_D n^{-4} J$$

где k^2 – фактор, учитывающий взаимную ориентацию молекул донора и акцептора, q_D – квантовый выход донора в отсутствие акцептора, n – показатель преломления среды, J – интеграл перекрытия, учитывающий перекрытие спектра флуоресценции донора и спектра поглощения акцептора:

$$J = \int_0^\infty F_D(\lambda) \epsilon_A(\lambda) \lambda^4 d\lambda$$

где $F_D(\lambda)$ – нормированный к единице спектр флуоресценции донора, $\epsilon_A(\lambda)$ – коэффициент экстинкции акцептора, соответствующий длине волны λ .

Фактор k^2 , в зависимости от взаимной ориентации донора и акцептора, может изменяться от 0 до 4. Поскольку степень поляризации флуоресценции акцептора является высокой, то имеет место либо параллельная ориентация донора и акцептора ($k^2 = 4$), либо антипараллельная ($k^2 = 1$). Также нами учтено, что для ThT имеет две моды встраивания в амилоидные фибриллы с различным квантовым выходом: 0,83 и 0,30 [6]. Принимая это во внимание, было получено 4 значения ферстеровского радиуса R_0 (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты расчёта ферстеровского радиуса переноса в комплексе Th-C23+ThT+AF при длине волны возбуждения 440 нм

№ п/п	q	k^2	$R_0, \text{\AA}$
1	0,83	1	54,0
2	0,83	4	68,1
3	0,30	1	45,6
4	0,30	4	57,5

Как видно из таблицы, ферстеровский радиус переноса энергии для исследуемой системы принимает большие значения в пределах от 45,6 до 68,1 Å. Это обусловлено большой областью перекрытия спектра флуоресценции ThT и спектра поглощения Th-C23. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что ThT и Th-C23 образуют удобную донорно-акцепторную пару, позволяющую изучать структуру и механизм образования амилоидных фибрилл.

Список литературы

1. Thioflavin T as a Molecular Rotor: Fluorescent Properties of Thioflavin T in Solvents with Different Viscosity / V. I. Stsiapura [et al.] // Journal Physical Chemistry. B. – 2008. – Vol. 112, No. 49. – P. 15893–15902.
2. Koo, E. H. P. Amyloid disease abnormal protein aggregation in neurodegeneration / E. H. P. Koo, T. Jr. Lansbury, J. W. Kelly // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 1999. – Vol. 96, iss. 18. – P. 9989–9990.
3. Плигин, Е. И. Спектральные свойства нового бензтиазолового красителя / Е. И. Плигин // Физика конденсированного состояния [Электронный ресурс] : материалы XXVIII междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 17 апр. 2020 г.) / ГрГУ им. Янки Купалы, физ.-техн. фак. ; редкол.: А. Е. Герман (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2020. – С. 79–80.
4. Плигин, Е. И. Спектральные свойства бензтиазолового красителя Th-C23 / Е. И. Плигин // Физика конденсированного состояния [Электронный ресурс] : материалы XXIX междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 22–23 апр. 2021 г.) / ГрГУ им. Янки Купалы, физ.-техн. фак. ; редкол.: Г. А. Гачко (гл. ред.), Н. Г. Валько (зам. гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2021. – С. 89–91.
5. Levshin, L. V. Liuminestsentsiia i ee izmereniia: Molekuliarnaia liuminstsentsiia / L. V. Levshin, A. M. Saletskii. – M. : Izd-vo MGU, 1989. – P. 143–147.
6. Analyzing Thioflavin T Binding to Amyloid Fibrils by an Equilibrium Microdialysis-Based Technique / I. M. Kuznetsova [et al.] // PLoS ONE. – 2012. – Vol. 7, iss. 2. – e30724.

A system consisting of thioflavin T (ThT), its derivative Th-C23 and amyloid fibrils (AF) has been studied. Absorption and fluorescence spectra were obtained for this complex at various ThT concentrations. The effective energy transfer between Th and Th-C23 has been experimentally confirmed. The Ferster radius is calculated, which for the studied complex takes values from 45.6 to 68.1 Å.

Плигин Егор Игоревич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, epligin@tut.by.

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

УДК 548.537:539.25

В. В. ПРИГОДИЧ, Д. В. ЯКИМЧУК, С. Е. ДЕМЬЯНОВ, С. А. ХУБЕЖОВ, И. В. СИЛАЕВ

ПОЛУЧЕНИЕ ДИОКСИДА ТИТАНА С ЗАДАННОЙ МОРФОЛОГИЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ТЕРМОРЕЗИСТИВНОГО ОКИСЛЕНИЯ

Диоксид титана был получен с использованием метода терморезистивного окисления титановой фольги в диапазоне температур 700–900 °С. Полученные структуры исследованы методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской дифракции. Показано, что в зависимости от температуры получения на поверхности металлического титана формируются наноструктуры в виде кристаллитов, гранул и дендритов TiO₂-рутила. Предложенный метод перспективен для широкомасштабного создания развитых функционализированных TiO₂-поверхностей, применимых в катализе и сенсорике.

Металлооксидные структуры на основе диоксида титана привлекают пристальное внимание исследователей благодаря перспективности их применения для создания катализаторов, газовых сенсоров, плазмонных резонаторов, оптических элементов в солнечной энергетике и т. д. Разработка новых методов и подходов получения оксидов металлов с заданными параметрами и свойствами обусловлена возможностью создания на их основе уникальных структур, способных более эффективно преобразовывать энергию света, повысить эффективную реакционную площадь. Широта спектра применений обусловлена свойствами наноструктур TiO_2 , которые напрямую зависят от морфологии, структуры и стехиометрии. Так, каталитическая и фотоактивность для систем на основе TiO_2 зависит от фазового состава оксида титана анатаз/рутил. Для наноструктурированного оксида титана фаза со структурной модификацией рутил, как правило, происходит при температурах более 500 °C.

Наноструктурированные оксиды с экзотической морфологией (ядро-оболочка, нановискеры, нанопоры) обычно формируют с привлечением высокотехнологичных методик, например, как технология точечного эпитаксиального роста (формирование нановискеров) и ионно-трековая технология (создание нанопористых материалов). Такие методики, как правило, многостадийные, ресурсо- и времязатратные. В связи с этим остаётся актуальным поиск более простых подходов к созданию материалов на основе TiO_2 , среди которых можно выделить золь-гель метод, анодирование и реактивное испарение или нагрев титана в атмосфере кислорода. Преимуществом последнего может являться простота методики, возможность контроля морфологии и относительно высокая скорость процесса получения наноструктур на основе TiO_2 , что существенно расширит область его применения.

В настоящей работе впервые продемонстрирована возможность контролируемого получения наноструктур диоксида титана с использованием метода терморезистивного окисления титана в кислородсодержащей атмосфере и детально изучена морфология и структурные особенности полученных образцов.

Получение образцов микро- и наноструктур TiO_2 -рутила производилось методом терморезистивного окисления титановой фольги. Перед формированием образцов титановая фольга марки ВТ1-00 ГОСТ 22178-76 размерами 50×10×0,08 мм подвергалась ионно-плазменной очистке в условиях вакуума ($4,2 \cdot 10^{-5}$ мбар). Окисление титана осуществлялось методом терморезистивного нагрева в кислородной атмосфере с парциальным давлением $P_{\text{O}_2} = 100$ мбар в трех температурных режимах $T = 700$ °C, 800 °C, 900 °C при времени выдержки $t = 1,5$ мин. Нагрев титановой фольги осуществлялся посредством пропускания через образец электрического тока, при этом первые 500 °C были достигнуты за $t = 0,3$ мин. при номинальных значениях напряжения $U = 4$ В и силе тока $I = 25$ А. Далее, для достижения необходимых значений температур токи и напряжения регулировались по обратной связи через термopару динамически, что позволило осуществлять равномерную скорость нагрева $\nu = 0,5$ °C/с. После формирования оксидов титана пленки отжигались при температуре $T = 200$ °C в условиях глубокого вакуума ($4,2 \cdot 10^{-5}$ мбар) в течение $t = 20$ мин. для установления термодинамического равновесия и удаления гидроксильных групп, при этом общее время подготовки образцов не превышало 50 мин.

Морфология полученных структур исследована методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на установке Nova NanoLab 600 (FEI, Netherlands) в режиме вторичных электронов. Структурный анализ образцов произведен с применением рентгеновской дифракции (РД) на дифрактометре XRD-7000 Maxima фирмы Shimadzu с источником характеристического рентгеновского излучения Cu k- α $\lambda = 0,15406$ нм. Запись данных производилась в геометрии Брегга-Брентано θ -2 θ с угловой скоростью 2°/мин. и с шагом 0,01°.

На рисунке 1а,б,в представлены СЭМ-изображения поверхности образцов TiO_2 , полученных при $T = 700$ °C, 800 °C, 900 °C, соответственно. Выбор температурного диапазона, с одной стороны, обусловлен исключением образования диоксида титана со структурной модификацией анатаз, который обычно формируется при $T < 500$ °C, и исключением формирования нитридов титана ($T < 1000$ °C) – с другой. Видно, что во всех случаях в процессе терморезистивного окисления титановой фольги формируются трехмерные кристаллиты, которые отличаются как формой, так и размером нанокристаллитов.

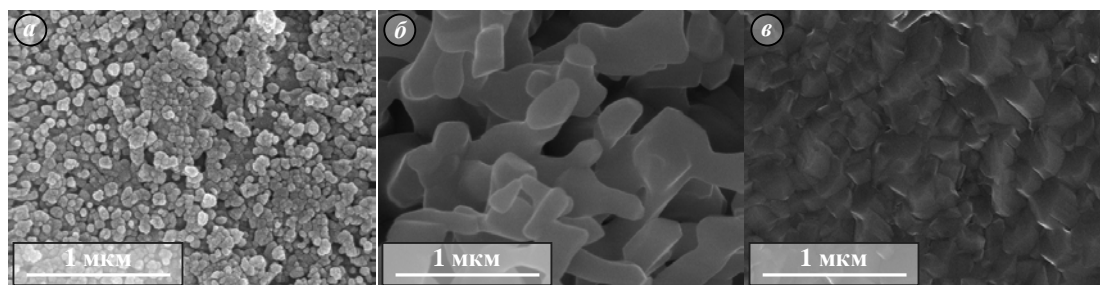


Рисунок 1 – СЭМ-изображения поверхности образцов TiO_2 , полученных при $T = 700$ °C (а), 800 °C (б) и 900 °C (в)

Для образца, полученного при 700 °С (рисунок 1а), форма кристаллитов представляет наноразмерные гранулы 15–30 нм, образующие разделенные агломераты размерами 70–150 нм. При 800 °С (рисунок 1б) на поверхности фольги формируются дендритные структуры, состоящие из отдельных кристаллитов с длиной 500–2000 нм и диаметром 100–200 нм, при этом отдельные наноразмерные гранулы, в отличие от образца, полученного при 700 °С, не видны. Этот факт позволяет выдвинуть гипотезу о том, что повышение температуры до 800 °С способствует текстурированию и слиянию наногранул TiO_2 в нанокластеры, что в свою очередь приводит к анизотропному росту нанокристаллитов и формированию дендритных структур. Как видно из рисунка 1в, дальнейшее повышение температуры приводит к формированию кристаллитов с размерами 100–300 нм.

Оценка размеров отдельных кристаллитов, а также определение структурных параметров кристаллической решетки образцов TiO_2 , полученных при различной температуре, проведена с привлечением РД (рисунок 2). Опираясь на литературные данные и баз данных JCPDS (75-1753), ICDD PDF-2 (№ 01-072-4819, 01-076-0317), можно заключить, что во всех случаях представленные дифрактограммы соответствуют диоксиду титана тетрагональной сингонии пространственной группы $P4_2/mnm$ со структурной модификацией рутил. Характерное отличие в дифрактограммах наблюдается как в количестве углов отражений, так и в интенсивности и ширине на полувысоте дифракционных рефлексов, что свидетельствует о разном объеме сформированных оксидов, размере и текстурировании кристаллитов. Дифрактограмма для образцов, полученных при температурах 700 °С и 900 °С (рисунок 2а,в), свидетельствует о поликристалличности оксида титана. В случае же образца, полученного при температуре 800 °С (рисунок 2б), наблюдаются лишь 2 интенсивных рефлекса, соответствующих параллельным кристаллографическим плоскостям (110) и (220). Данный факт, с одной стороны, свидетельствует о текстурировании оксида, а с другой стороны, указывает на преимущественный рост нанокристаллитов в определенных направлениях, в частности, перпендикулярно направлению [110].

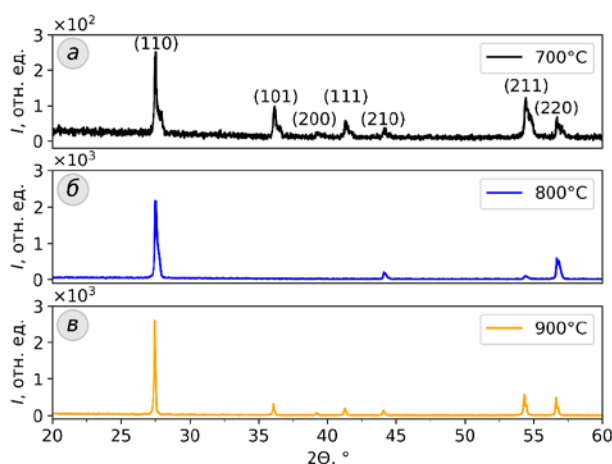


Рисунок 2 – Дифрактограммы образцов TiO_2 , полученных при $T = 700$ °С (а), 800 °С (б) и 900 °С (в)

Таким образом, в работе представлен простой и быстрый способ формирования наноструктур на основе TiO_2 с различной морфологией, что подтверждается взаимодополняющими исследованиями с применением СЭМ и РД. В результате терморезистивного окисления титановой фольги размерами $50 \times 10 \times 0,08$ мм в кислородсодержащей среде с парциальным давлением $P_{\text{O}_2} = 100$ мбар в трех температурных режимах $T = 700$ °С, 800 °С, 900 °С и временем выдержки $t = 1,5$ мин. происходит формирование диоксида титана со структурой рутил. Предполагается, что в зависимости от температурного режима механизм формирования наноструктур имеет различный характер, что приводит к получению наноструктур разной морфологии, размерности и объема. Так при 700 °С формируются поликристаллические наноразмерные агломераты 70–150 нм из нанозерен TiO_2 размером 15–30 нм, при 800 °С – дендритная поверхность с характеристическими размерами 500–2000 нм в длину и 100–200 нм в диаметре. В случае 900 °С формируются кристаллиты, состоящие из более крупных структурных элементов с размерами около 47 нм. Предложенный метод терморезистивного окисления титана в кислородсодержащей газовой среде и контроля морфологии получаемых наноструктур перспективен для быстрого и контролируемого получения оксидных наноматериалов на большой площади поверхности, что перспективно для развития задач сенсорики и катализа².

² Авторы благодарят руководство ЦКП «Физика и технологии наноструктур» за РСА исследования.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (договор № 20-52-04015), БРФФИ (договор № Ф21РМ-054), а также при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации; государственное задание в области научной деятельности № FENW-2022-0001.

Titanium dioxide was obtained using the method of thermoresistive oxidation of titanium foil in the temperature range of 700–900 °C. The resulting structures were studied by scanning electron microscopy and X-ray diffraction. It is shown that, depending on the production temperature, nanostructures in the form of crystallites, granules, and dendrites of TiO₂-rutile are formed on the surface of metallic titanium. The proposed method is promising for the large-scale creation of advanced functionalized TiO₂ surfaces applicable in catalysis and sensorics.

Пригодич Владислав Валентинович, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, prigodich96@gmail.com.

Якимчук Дмитрий Владимирович, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, dim2yakim@gmail.com.

Демьянов Сергей Евгеньевич, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, demyanov@physics.by.

Хубежов Сослан Арсенович, Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Таганрог, Российская Федерация; Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация; Северо-Осетинский государственный университет имени К. Л. Хетагурова, Владикавказ, Российская Федерация, soslan.khubezhov@gmail.com.

Силаев Иван Вадимович, Северо-Осетинский государственный университет имени К. Л. Хетагурова, Владикавказ, Российская Федерация, bigjonick@yandex.ru.

Научный руководитель – *Демьянов Сергей Евгеньевич*, доктор физико-математических наук, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Республика Беларусь, demyanov@physics.by.

УДК 616.83:616.15:546.41

Т. А. ПРОКОПЕНКО, А. П. ЗАЖОГИН, Н. И. НЕЧИПУРЕНКО

МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КАЛЬЦИЯ В ДЕГИДРАТИРУЮЩИХ КАПЛЯХ ПЛАЗМЫ У ПАЦИЕНТОВ С ЦЕРЕБРОВАСКУЛЯРНЫМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ

Показаны изменения морфологической структуры плазмы, распределения кальция в дегидратирующих каплях плазмы у пациентов с хронической ишемией головного мозга и транзиторной ишемической атакой при поступлении в стационар и после терапии лекарственными средствами.

Цереброваскулярные заболевания (ЦВЗ) ишемического генеза – серьезная социальная проблема общества. В Республике Беларусь растет распространенность сосудистых заболеваний головного мозга. Ишемический инсульт (ИИ) – одно из наиболее социально значимых заболеваний, которое оказывает существенное влияние на уровень здоровья и продолжительность жизни. В настоящее время увеличивается частота выявления ИИ среди лиц трудоспособного возраста, а также возрастает число пациентов с хронической ишемией головного мозга (ХИМ), что способствует быстрому увеличению доли пожилых людей в общей структуре населения.

Критериями классификации ишемических поражений являются скорость развития ишемии и неврологического дефицита. Острые нарушения мозгового кровообращения (ОНМК) – ИИ и транзиторная ишемическая атака (ТИА). Основные их причины: атеротромбоз, кардиогенные или артерио-артериальные эмболии, окклюзии мелких церебральных артерий, развитие микроангиопатии.

С точки зрения молекулярных механизмов повреждения нейронов грань между острыми и хроническими формами цереброваскулярных заболеваний достаточно условна. Основными этиологическими факторами ХИМ являются гипертоническая болезнь, атеросклероз, заболевания миокарда, сахарный диабет, приводящие к нарушению мозгового кровообращения с развитием гипоксии и каскада биохимических изменений, что обуславливает диффузные многоочаговые изменения в веществе головного мозга [1].

На данный момент в медицинской диагностике становятся более актуальными методы исследования структур, образующихся при кристаллизации солей в биожидкостях, одним из которых является метод клиновидной дегидратации биожидкостей, разработанный Шабалиным В. Н. и Шатохиной С. Н. [2]. Кристаллы солей выпадают в виде зерен, образуют дендриты, а биологическая компонента жидкости создает сложную лепестковую структуру. Этот метод обладает неоспоримыми достоинствами для диагностики различных заболеваний человека на доклинической стадии.

При различных вариантах нарушения мозгового кровообращения, в частности при ТИА и ХИМ, высохшая капля биожидкости может иметь отличную от здорового человека структуру в зависимости от кинетики испарения воды из капли: вода уходит, а в оставшейся субстанции образуется густой гель и кристаллизуются соли [3].

Материалы и методы исследования. В исследовании приняли участие 8 пациентов с ТИА в возрасте 59,0±17,6 лет и 5 пациентов с ХИМ в возрасте 76,2±7,2 лет. Морфологическая структура и распределение кальция в дегидратирующих каплях плазмы выполнялось в 1-е сутки после госпитализации в неврологические

отделения РНПЦ неврологии и нейрохирургии и после применения курса стандартной терапии (согласно клиническому протоколу «Диагностика и лечение пациентов с заболеваниями нервной системы (взрослое население)», утвержденному постановлением МЗ РБ от 18.01.2018 г. № 8).

Для морфоструктурного анализа дегидратирующих капель плазмы образцы готовили по следующей методике: каплю плазмы наносили на поверхность тщательно промытой подложки из полиметилметакрилата с помощью микропипетки. Объем капли составлял 10 мкл. Процесс сушки проходил при температуре 20–25 °С и относительной влажности воздуха 60–65 % в течение 90–120 минут. Для получения снимков использовали оптический микроскоп Биолам (Россия) со светодиодной подсветкой и веб-камерой (окуляр ×9, объектив ×15).

Для изучения распределения кальция по диаметру дегидратирующей капли плазмы использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1.

Результаты исследования. Изучена морфоструктура дегидратирующих капель плазмы у пациентов с ТИА и ХИМ до и после применения курса стандартной терапии. В качестве примера приводим результаты исследования центральной зоны фации капель плазмы крови пациентов до и после лечения (рисунок 1).

Пациент А.: женщина, 59 лет. Клинический диагноз: ТИА в вертебробазилярном бассейне артерий (ВББА). Сопутствующий диагноз: ИБС: стенокардия напряжения. Кардиосклероз. Атеросклероз аорты. АГ 2, ст. 4. Хроническая сердечная недостаточность. Н2А. Дислипидемия.

Пациент Б.: мужчина, 85 лет. Клинический диагноз: энцефалопатия сложного генеза (атеросклеротическая, гипертензивная) 1–2 степени с легкими координаторными нарушениями. Сопутствующий диагноз: ИБС. Атеросклероз аорты, коронарных артерий. АГ 2, риск 4.

На момент поступления в стационар вид дегидратирующей капли плазмы пациента с ТИА (А) имеет мелкаячеистую структуру с большим количеством трещин, в том числе широких, что может свидетельствовать о склеротических изменениях. После курса стандартной терапии количество растрескиваний уменьшается, вид капли пациента становится близким к дегидратирующей капле здорового человека. У пациента с ХИМ (Б) капли плазмы до и после лечения имеют мелкаячеистую, без крупных растрескиваний структуру, схожую с морфоструктурой капли плазмы здорового добровольца.

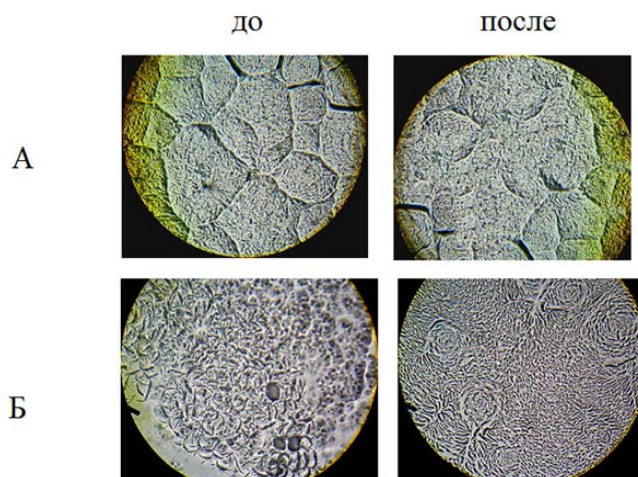


Рисунок 1 – Морфологическая структура фаций дегидратирующей капли плазмы пациентов с ТИА (А) и ХИМ (Б) до и после лечения

На рисунке 2 представлены результаты исследования распределения кальция в центральной и периферической зонах дегидратирующих капель плазмы двух пациентов с ТИА (А.) и пациента с ХИМ (Б.) на момент госпитализации и после курса стандартной терапии по горизонтальному диаметру образца.

На момент госпитализации в исследованных образцах дегидратирующих капель плазмы крови пациентов с ТИА и ХИМ показано наличие множественных пиков низких и высоких значений интенсивности спектральных линий кальция, находящихся в центре и на периферии, коррелирующих с его концентрацией в образцах и отражающих нарушения внутриклеточных кальцийзависимых процессов, обусловленных ишемией мозга. После лечения в спектральных линиях пациентов наблюдается появление пиков высоких значений интенсивности Ca^{2+} по периферии капли (точки 2, 3 и 10, 11), что можно рассматривать как позитивные изменения в протекании метаболических реакций внутри клеток после стандартной терапии.

Таким образом, показаны особенности морфологической структуры и несимметричное расположение пиков высокой интенсивности кальция в дегидратирующих каплях плазмы у пациентов с ТИА и ХИМ до лечения с последующим некоторым упорядочиванием распределения кальция в капле после применения стандартной терапии у данных пациентов.

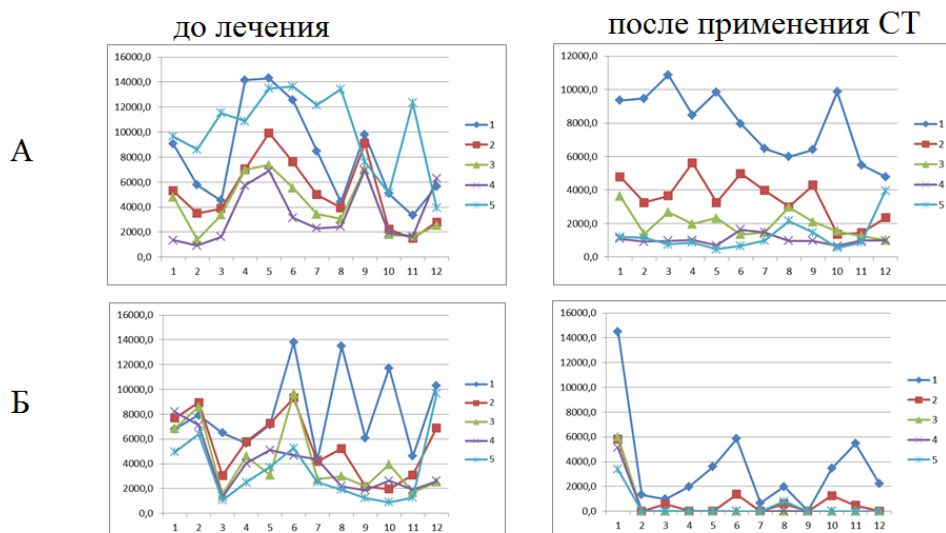


Рисунок 2 – Интенсивность линий Ca II (393,239 нм) в атомно-эмиссионных спектрах плазмы у пациентов с ТИА (А) и ХИМ (Б) до и после стандартной терапии – по вертикальной оси отображена интенсивность линий кальция в отн. ед., по горизонтальной – номера точек: точка 6 соответствует центру капли, точки 1 и 12 – её периферической зоне. Линии 1–5 представляют собой слои капли, через которые проходит лазерный пробой

Список литературы

1. Нечипуренко, Н. И. Роль кислородзависимых процессов в патогенезе хронической ишемии головного мозга / Н. И. Нечипуренко // Неврология и нейрохирургия. Восточная Европа. – 2012. – № 3. – С. 150–159.
2. Шабалин, В. Н. Морфология биологических жидкостей человека / В. Н. Шабалин, С. Н. Шатохина. – М. : Хризостом, 2001. – 302 с.
3. Морфологическое и спектрофотометрическое исследование плазмы крови пациентов с аневризмой сосудов головного мозга / Ж. И. Булойчик [и др.] // Журнал БГУ. Физика. – 2018. – № 1. – С. 9–17.

The study shows changes in the morphological structure of plasma, calcium distribution in dehydrating plasma drops in patients with chronic cerebral ischemia and transient ischemic attack upon admission to the hospital and after drug therapy.

Прокопенко Татьяна Анатольевна, аспирант кафедры экологической медицины и радиобиологии Международного государственного института имени А. Д. Сахарова БГУ, Минск, Республика Беларусь, tatiananovitskaya1108@mail.ru.

Зажогин Анатолий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь.

Нечипуренко Наталия Ивановна, доктор математических наук, профессор, зав. лабораторией клинической патофизиологии нервной системы РНПЦ неврологии и нейрохирургии, Минск, Республика Беларусь.

Научные руководители – *Зажогин Анатолий Павлович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь.

Нечипуренко Наталия Ивановна, доктор математических наук, профессор, зав. лабораторией клинической патофизиологии нервной системы РНПЦ неврологии и нейрохирургии, Минск, Республика Беларусь.

УДК 523.681,533.9.082.5

А. О. ПУХТЕЕВ, Р. А. ХАРИТОНЧИК, Н. А. ОРЕХОВА

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТЕОРИТОВ ТИПА БРАГИН МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Проведены исследования влияния параметров двоянных лазерных импульсов на формирование компонентного состава лазерной плазмы образцов железного, железо-каменного и эталонного образцов методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии (ЛАЭМС). Определены оптимальные параметры лазерных импульсов, а именно энергии, интервала и количества импульсов для практического поиска и анализа неизвестных метеоритов различной природы.

Метеориты были и, несмотря на интенсивное развитие космических исследований, остаются ключевым, а часто и единственным источником информации о протопланетной и ранней планетной истории Солнечной системы. Метеориты являются обломками распавшихся комет и астероидов, большая часть которых движется в

обширном поясе между орбитами Марса и Юпитера. Возраст метеоритов составляет 4,5–4,6 млрд лет и совпадает с возрастом Земли (4,56 млрд лет). Таким образом, метеориты представляют собой древнейшие космические породы Солнечной системы, образованные из вещества протосолнечной туманности, причем большинство исследователей рассматривают хондриты как прямые конденсаты вещества протосолнечной туманности в процессе ее охлаждения, а железные и железокаменные метеориты как продукты аккреционной дифференциации хондритов в недрах планет, в результате которой у планет образуются ядро, мантия и кора. Согласно современной статистике, среди упавших на Землю за последние 100–200 лет метеоритов [1] резко преобладают (92,5–93,3 % встречаемости) каменные – хондриты и ахондриты. На железные метеориты (сидериты) приходится 5,3–5,7 %, а на железокаменные всего 0,8–1,3 %. Очевидно, что относительная редкость железных метеоритов не может не сказываться на степени их изученности, хотя именно они и представляют собой наиболее ценный в научном отношении объект исследований. Последнее обусловлено, по крайней мере, двумя причинами. Во-первых, есть основания полагать, что железные метеориты как минимум не моложе Солнца, поскольку образовались за счет газопылевого облака, оставшегося после взрыва первоначальной сверхновой горячей массивной звезды [1], и поэтому являются непосредственным продуктом звездного нуклеосинтеза. Во-вторых, железные метеориты могут представлять собой обломки металлических ядер планет земного типа, в которых происходили недостаточно пока понятные нам обменные процессы, сильно повлиявшие на формирование каменной мантии [1]. Изучение любого метеорита расширяет наши знания в этом направлении. В литературе отмечается, что железо-каменный метеорит Брагин, несмотря на то, что он изучается более 200 лет, до сих пор остается плохо изученным [2]. Самыми распространенными минералами каменной части метеорита Брагин являются оливины. Исследования железных метеоритов приобретают все больший интерес в связи с запланированным полетом в 2025 году космического аппарата к самому крупному астероиду М-типа в главном поясе – астероиду 16 Psyche (Психея 16), поверхность которого содержит большое количество металла (Shepard et al., 2008).

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить оптимальные условия для получения методом абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов данных по химическому составу металлических частей образцов железных и железо-каменных метеоритов.

Снимки неизвестного образца и железо-каменного метеорита Брагин приведены на рис. 1.



а – неизвестный образец; б – метеорит Брагин

Рисунок 1 – Снимки поверхности

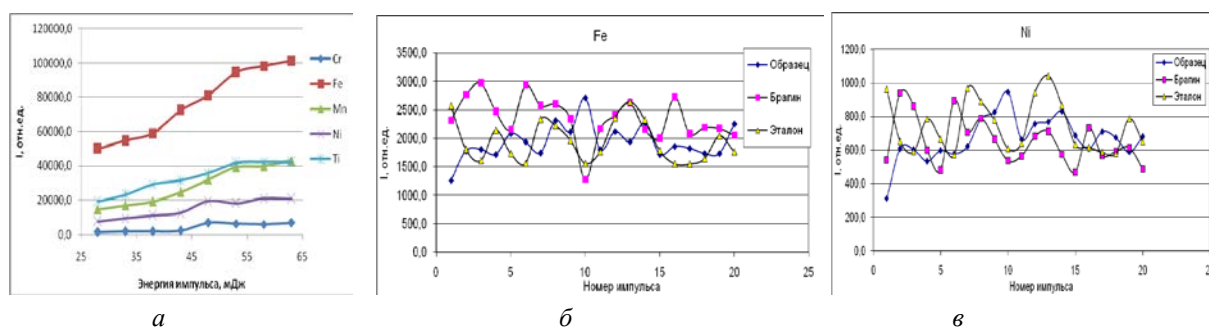
Анализ и целенаправленное повышение чувствительности спектрального анализа природных материалов методом лазерной искровой спектрометрии возможны на основе воздействия на первичную плазму дополнительного лазерного излучения. При двухимпульсном лазерном воздействии при различных углах падения луча на мишень и плазму возможно одновременное проведение высокочувствительного спектрального анализа, контроля концентрации возбужденных и заряженных частиц плазмы.

Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1 (изготовитель СП «ЛОТИС ТИИ»). Лазер может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Временной сдвиг между сдвоенными импульсами может меняться от 0 до 100 мкс с шагом 1 мкс. Размер сфокусированного пятна примерно 50 мкм, при фокусном расстоянии объектива 104 мм.

На рис. 2а представлена зависимость интенсивности линий Fe, Ni и ряда других элементов в спектрах эталонного образца (эталон) от энергии. На рис. 2б и 2в – распределение основных элементов Fe, Ni в зависимости от номера импульса (послойный анализ) в неизвестном образце (образец), металлической части метеорита Брагин и эталоне.

Как видно из полученных данных, при увеличении энергии импульсов интенсивность линий элементов возрастает до энергии примерно равной 50 мДж, а затем рост несколько замедляется. При использовании энергии импульсов 50 мДж и интервале между импульсами, равном 10 мкс, проведен анализ изменения содержания основных элементов железных метеоритов, а именно Fe и Ni, от номера импульса, т. е. изменения

распределения элементов по глубине образцов (рис. 2б и 2в). Как видно из полученных данных, содержание Fe и Ni в исследованном образце, эталонном и метеорите Брагине примерно равно.



а – зависимость от энергии импульсов, б и в – от номера импульса

Рисунок 2 – Зависимость интенсивности линий

Валовый химический состав железо-каменных метеоритов может быть представлен следующим образом (мас. %): Fe 85.64–89.08, Ni 8.79–9.26. В чисто железных метеоритах количество никеля может быть значительно больше. Отсюда можно сделать предварительный вывод, что неизвестный образец мог быть осколком железо-каменного метеорита, подобного метеориту Брагин.

Таким образом, выполненные спектроскопические исследования характеристик приповерхностной лазерной плазмы, образуемой при воздействии двоянных лазерных импульсов на металлические образцы, дали возможность определить оптимальные параметры лазерных импульсов (энергию, интервал между импульсами, количество импульсов), позволяющие вести практический поиск и химический анализ неизвестных метеоритов различной природы.

Список литературы

1. Железный метеорит Большой Долгучан: результаты минералого-геохимических исследований / В. И. Силаев [и др.] // Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2016. – № 7. – С. 10–18.
2. Особенности состава и генезиса метеорита Брагин / А. И. Бахтин [и др.] // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. «Естеств. науки». – 2018. – Т. 160, кн. 2. – С. 324–338.
3. Radar survey of M- and X-class asteroids / M. K. Shepard [et al.] // Icarus. – 2008. – № 195. – P. 184–205.

The influence of the parameters of dual laser pulses on the formation of the component composition of the laser plasma of iron, iron-stone and reference samples by laser atomic emission multichannel spectrometry (LAEMS) has been studied. The optimal parameters of laser pulses, namely the energy, interval and number of pulses for the practical search and analysis of unknown meteorites of various natures, have been determined.

Пухтеев Александр Олегович, ученик 8 класса ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», Минск, Республика Беларусь.

Харитончик Роман Александрович, ученик 8 класса ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», Минск, Республика Беларусь.

Орехова Наталия Андреевна, учитель астрономии, ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», Минск, Республика Беларусь, e-mail: sotis-nil@yandex.ru.

Научный руководитель – *Орехова Наталия Андреевна*, учитель астрономии «Средняя школа № 64 г. Минска», Минск, Республика Беларусь, sotis-nil@yandex.ru.

Научный консультант – *Зажогин Анатолий Павлович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

УДК 523.681,533.9.082.5

А. О. ПУХТЕЕВ, Р. А. ХАРИТОНЧИК, Н. А. ОРЕХОВА

ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ГРАНИТОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Проведены исследования влияния параметров двоянных лазерных импульсов на формирование компонентного состава лазерной плазмы методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии (ЛАЭМС) образцов гранита из карьера Микашевичи. Определены оптимальные параметры лазерных импульсов, а именно энергии и интервала между двоянными лазерными импульсами, обеспечивающими максимальную чувствительность химического анализа.

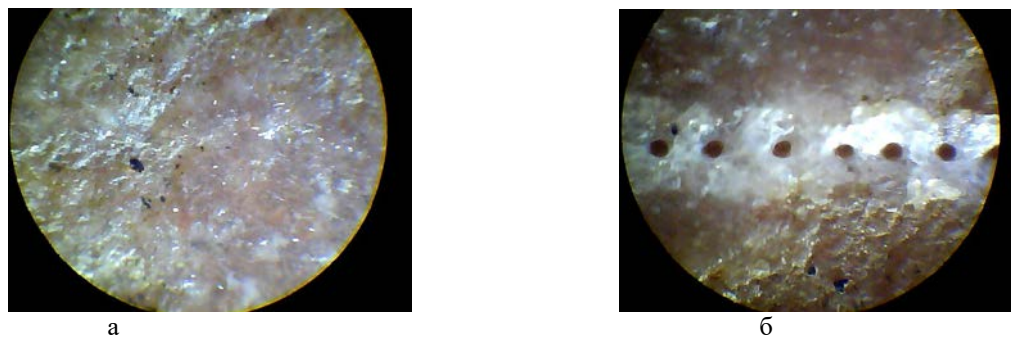
Летом 2020 года США отправили на Красную планету марсоход, оснащенный мощным лазером, который может выжигать участки породы для анализа образующейся плазмы при помощи камеры, а звуков испарения – при помощи микрофона. Мощности импульсов лазера Mars 2020 хватит, чтобы при температуре до 10 000 °С выжигать точечные отверстия в минералах/породах на расстоянии до семи метров. Использование лазера поможет операторам миссии определить состав пород, которые находятся вне досягаемости щупа ровера или там, куда ему будет сложно забраться. Лазер должен был позволить проанализировать цель, прежде чем ехать к ней. Предварительный анализ также отсеет породы, которые не подходят для керновых проб: их число ограничено. Особый интерес представляют также минералы, которые образуются в присутствии жидкой воды, такие как глины, карбонаты и сульфаты.

Команда марсохода «Персеверанс» опубликовала первые результаты годичной работы инструмента SuperCam, с помощью которого он дистанционно определяет состав грунта и камней на Марсе. SuperCam представляет собой 10-килограммовый инструмент для дистанционного (до 7–12 метров) исследования химического и минерального состава камней и грунта на Марсе, а также поиска органических соединений, могущих указывать на существование микробиологической жизни в прошлом планеты. В состав SuperCam входит лазерно-искровой эмиссионный спектрометр, оснащенный красным лазером, Рамановский спектрометр, оснащенный зеленым лазером, спектрометр ближнего инфракрасного диапазона, а также оптическая камера, позволяющая получать цветные снимки высокого разрешения, и микрофон. Все эти приборы находятся в «голове» марсохода «Персеверанс», установленной на мачте.

В начале марта 2021 года марсоход начал проверку и калибровку инструмента SuperCam. Для этого были выбраны две цели. Первая, получившая обозначение «Máaz» («Марс» на языке навахо), находилась на расстоянии 3,17 метра от ровера. Анализ данных показал, что это либо цельная вулканическая порода, либо она состоит из мелких зерен вулканического происхождения, которые слиплись в присутствии жидкой воды. Также возможно, что это осадочная порода, состоящая из магматических зерен, перенесенных вниз по течению в кратер Езеро перед тем, как быть зацементированными вместе. Вторая цель, получившая обозначение «Yeehgo» («прилежный» на языке навахо), находилась на расстоянии 3,32 метра от ровера и представляет собой валун, на котором заметны яркие вкрапления. Инструмент смог выяснить состав камня-мишени и записать щелчки лазера по камням при помощи микрофона, сообщается на сайте NASA [1].

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить оптимальные условия для получения методом абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов данных по химическому составу образцов гранитов карьера Микашевичи, аналогичных марсианским.

Для получения снимков образцов гранита использовали взб-камеру и цифровой оптический микроскоп WEBBERS со светодиодной подсветкой, совмещенный с цифровой камерой (отраженный свет). Полученные снимки приведены на рис. 1.



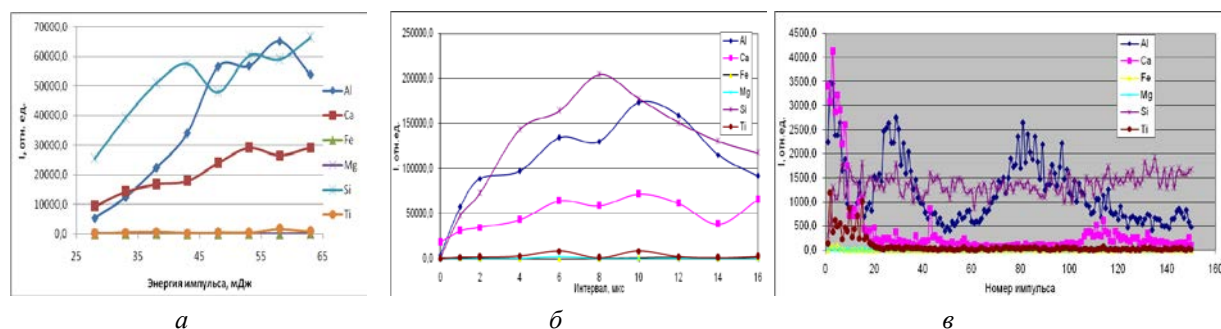
а – общий вид образца (взб-камера); б – увеличенный участок образца с пробитыми отверстиями (цифровой микроскоп WEBBERS F2n, увеличение $\times 50$)

Рисунок 1 – Снимки поверхности гранита

Анализ и целенаправленное повышение чувствительности спектрального анализа природных материалов методом лазерной искровой спектрометрии возможны на основе воздействия на первичную плазму дополнительного лазерного излучения. При двухимпульсном лазерном воздействии при различных углах падения луча на мишень и плазму возможно одновременное проведение высокочувствительного спектрального анализа, контроля концентрации возбужденных и заряженных частиц плазмы.

Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1 (изготовитель СП «ЛОТИС ТИИ»). Лазер может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Временной сдвиг между сдвоенными импульсами может меняться от 0 до 100 мкс с шагом 1 мкс. Размер сфокусированного пятна примерно 50 мкм, при фокусном расстоянии объектива 104 мм.

На рис. 2 представлена зависимость интенсивности линий кальция Ca II (396,847 нм), алюминия Al I (396,153 нм), железа Fe I (404,587 нм), магния Mg I (383,826 нм), кремния Si II (413,096 нм) и титана Ti II (376,132 нм) в спектрах от энергии, интервала между импульсами и глубины (номер импульса).



а – зависимость от энергии импульсов, б – от интервала между импульсами; в – от глубины (номер импульса)

Рисунок 2 – Зависимость интенсивности линий

Как видно из полученных данных, при увеличении энергии импульсов интенсивность линий элементов возрастает до энергии примерно равной 40–55 мДж, а затем рост замедляется. Из результатов, приведенных на рис. 2б, наглядно видно преимущество использования сдвоенных лазерных импульсов. При нулевом интервале между импульсами интенсивность практически всех линий очень мала, хотя энергия импульсов, действующих на образец, удвоенная. Исходя из полученных результатов, оптимальными параметрами для анализа являются следующие: энергия 45–55 мДж, интервал между импульсами – 6–10 мкс.

При использовании энергии импульсов 50 мДж и интервале между импульсами, равном 10 мкс, проведен анализ изменения содержания элементов от глубины (рис. 2в). Как видно из полученных данных, содержание кальция и алюминия в исследованном образце на глубине после 15–20 слоя существенно уменьшается. Это может быть связано с тем фактом, что образец находился на воздухе в течение нескольких лет, в результате чего при контакте с водой верхние слои образца накопили кальций. При этом видно, что содержание кремния в верхних слоях заметно меньше. По-видимому, при длительном взаимодействии с природной водой поверхность преобразуется, становится более рыхлой.

Полученные результаты можно кратко объяснить следующим образом. Воздействие лазерного излучения большой интенсивности на поверхность твёрдого тела в этом случае происходит посредством абляционного процесса, заключающегося в испарении и ионизации поверхностных слоёв мишени, образовании плотной плазмы высокого давления и, как следствие, возбуждении гидродинамического движения в неиспарившейся части мишени.

Таким образом, выполненные спектроскопические исследования характеристик приповерхностной лазерной плазмы, образуемой при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на образец гранита, дали возможность определить оптимальные параметры лазерных импульсов (энергию, интервал между импульсами), позволяющие определять дистанционно полуколичественное содержание основных химических элементов, входящих в состав гранита из карьера Микашевичи.

Список литературы

1. Seismic constraints from a Mars impact experiment using InSight and Perseverance / B. Fernando [et al.] // Nat Astron. – 2022. – № 6. – P. 59–64.

The influence of the parameters of twin laser pulses on the formation of the component composition of laser plasma by laser atomic emission multichannel spectrometry (LAEMS) of samples of the face from the Mikashevichi quarry has been studied. The optimal parameters of laser pulses, namely the energy and the interval between the twin laser pulses, providing maximum sensitivity of chemical analysis, have been determined.

Пухтеев Александр Олегович, ученик 8 класса ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», Минск, Республика Беларусь.

Харитончик Роман Александрович, ученик 8 класса ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», Минск, Республика Беларусь.

Орехова Наталия Андреевна, учитель астрономии, ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», Минск, Республика Беларусь, sotis-nil@yandex.ru.

Научный руководитель – *Орехова Наталия Андреевна*, учитель астрономии ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», Минск, Республика Беларусь, sotis-nil@yandex.ru.

Научный консультант – *Зажогин Анатолий Павлович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, zajogin_an@mail.ru.

Н. С. РАГОЖКИН

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ЭЛАСТОМЕРОВ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Представлены результаты исследования влияния ионизирующего излучения на коэффициент трения эластомеров общего назначения. Облучение резины осуществлялось ионизирующим излучением с длиной волны 0,07 нм. Показано, что при увеличении времени облучения коэффициент кинетического трения уменьшается, а коэффициент статического трения увеличивается.

Приоритетным направлением научно-технического прогресса является развитие и поиск новых технологий обработки композиционных материалов с целью придания им требуемых эксплуатационных характеристик. Активно развивающимся направлением в данной сфере является развитие радиационно-химических технологий. Радиационно-химические технологии основаны на взаимодействии ионизирующего излучения с эластомерами [1–3]. Поэтому работа, направленная на разработку способов модификации эластомеров общего назначения, является актуальной. Актуальность проводимых исследований обусловлена также тем, что эластомеры обладают комплексом достаточно высоких технических свойств, такими как прочность, эластичность. Кроме того, эластомеры способны к большим обратимым высокоэластическим деформациями.

Целью данной работы было исследование влияния длительности облучения рентгеновским излучением (0,07 нм) на коэффициент статического и динамического трения эластомеров общего назначения.

Длительность воздействия рентгеновским излучением составляла 30 и 45 мин. Коэффициент трения измерялся на приборе для определения коэффициента трения MXD-02, в соответствии со стандартом ISO 8295-1986 [4]. Коэффициент трения резины измеряли относительно стали. Результаты исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициент статического и динамического трения эластомеров общего назначения, облученных рентгеновским излучением в течение 30 и 45 мин.

Режим облучения	Коэффициент динамического трения	Коэффициент статического трения
Необлученные, контрольные образцы	1,222	0,068
Облучение рентгеновским излучением 30 мин.	0,847	0,190
Облучение рентгеновским излучением 45 мин.	0,614	0,214

Из таблицы 1 видно, что коэффициент динамического трения резины при облучении рентгеновским излучением уменьшается, а коэффициент статического трения увеличивается. Так в частности, для образцов, облучаемых рентгеновским излучением (0,07 нм) в течение 45 мин., коэффициент динамического трения равен 0,614, что на 50 % меньше, чем у контрольных образцов, значение которого равно 1,222. Коэффициент статического трения для облучаемых рентгеновским излучением образцов в течение 45 мин. равен 0,214, что на 32 % больше коэффициента статического трения контрольных образцов, равного 0,068. Обнаружено, что с увеличением длительности облучения рентгеновским излучением с длиной волны 0,07 нм коэффициент динамического трения снижается, а коэффициент статического трения увеличивается.

Таким образом, облучение эластомеров рентгеновским излучением приводит к уменьшению силы кинетического трения и увеличению силы статического трения, вследствие модификации структуры эластомеров под рентгеновским излучением. Полученная закономерность объясняется изменением числа межмолекулярных связей при облучении ионизирующим излучением, придающих эластомерным материалам большую эластичность.

Список литературы

1. Валько, Н. Г. Исследование влияния УФ-излучения на структуру эластомеров / Н. Г. Валько, В. А. Книга, А. В. Касперович // Технология органических веществ : материалы докл. 85-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 1–13 февр. 2021 г. / Белорус. гос. техн. ун-т ; редкол.: И. В. Войтов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 238–239.
2. Валько, Н. Г. Влияние УФ-излучения на структуру лакокрасочных покрытий с активными наполнителями / Н. Г. Валько, Д. Д. Юшкевич, А. И. Глоба // Технология органических веществ : материалы докл. 85-й науч.-техн. конф.

профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 1–13 февр. 2021 г. / Белорус. гос. техн. ун-т ; редкол.: И. В. Войтов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 236–237.

3. Богдевич, Д. И. Влияние ультрафиолетового и рентгеновского излучения на структуру и свойства акриловых полимеров / Д. И. Богдевич, Н. С. Рагожкин, Н. Г. Валько, А. В. Касперович // IV междунар. науч.-техн. форум по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 22–24 нояб. 2021 г. / Белорус. гос. техн. ун-т ; редкол.: И. В. Войтов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 116–117.

4. ISO 8295-1986. International standard. Plastics – film and sheeting – Determination of the coefficients of friction. – Swedish standards institution, 1996. – 6 p.

The results of the study of the effect of ionizing radiation on the friction coefficient of general-purpose elastomers are presented. Samples of rubber was irradiated with ionizing radiation with a wavelength of 0.07 nm. It is shown that with increasing of the irradiation time the coefficient of kinetic friction decreases, while the coefficient of static friction increases.

Рагожкин Николай Сергеевич, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, ragozhkin.99@mail.ru.

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

УДК 539.21

И. С. РОГОВАЯ

МНОГОКОМПОНЕНТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТИТАНА ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Представлены результаты исследования структуры, фазового состава и механических свойств системы «покрытие (Nb-Ti-Zr-Al-Cu)/N/подложка Ti», подвергнутой воздействию компрессионными плазменными потоками с различной плотностью энергии, поглощенной поверхностью.

В настоящее время широко проводятся исследования по синтезу и исследованию свойств многокомпонентных сплавов. Одной из групп таких сплавов являются высокоэнтропийные сплавы, состоящие из 5 и более элементов с примерно равными концентрациями около 5–35 ат. %. Такие сплавы обладают более высокими прочностными свойствами по сравнению со сталями и другими конструкционными сплавами [1]. Эти сплавы не имеют температурного порога хладноломкости, как стали и поэтому могут использоваться при любых отрицательных температурах. При пониженных температурах, вплоть до температуры жидкого гелия, 98 равной 4,2 °С, наблюдается повышение пределов прочности и текучести. Интерес исследователей привлекают также магнитные, электрические и термические свойства ВЭС [1]. Целью данной работы был синтез многокомпонентных поверхностных слоев в титане полученных путем осаждения покрытия Nb-Ti-Zr-Al-Cu на титан марки ВТ1-0 в атмосфере азота и последующего воздействия компрессионных плазменных потоков, генерируемых в атмосфере азота.

В данной работе для осаждения покрытия на установке QUINTA [2] были использованы катоды циркония, ниобия, меди, а также композитный катод состава (Ti-Al 50/50 ат. %). После установки образцов (подложки) на держатель подложки вакуумная камера откачивалась до давления $6,6 \cdot 10^{-3}$ Па. После ионно-плазменную очистки металла проводилось нанесение покрытия в атмосфере азота. Полученные образцы с покрытиями обрабатывались компрессионными плазменными потоками (КПП) на магнетоплазменном компрессоре компактной геометрии. Обработка образцов осуществлялась тремя импульсами на расстояниях от катода 8–12 см при давлении азота в камере 400 Па. Плотность энергии, поглощенной поверхностью образца, менялась в диапазоне 12–23 Дж/см². Напряжение на конденсаторной батарее составляло 4 кВ. Структурно-фазовое состояние поверхностного слоя исследовалось методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV в излучении Cu K α в фокусировке параллельных пучков. Для исследования морфологии поверхности образцов использовался растровый электронный микроскоп LEO1455VP фирмы KarlZeiss со следующими режимами работы: ускоряющее напряжение 20 кВ; ток зонда 5×10^{-7} А. Измерение микротвердости выполнялось на полуавтоматическом микротвердоме Виккерса 402MVD Instron Wolpert Wilson Instruments при нагрузке 100 г и времени выдержки 10 с. Коэффициент трения определялся с помощью трибометра TAU-1M при нагрузке на индентер, изготовленного из сплава ВК8, 50 г.

Анализ морфологии поверхности показал, что после нанесения покрытия (рис. 1а) наблюдается появление капельной фазы, характерной для метода вакуумно-дугового осаждения. После воздействия КПП на поверхности наблюдаются дендриты, появление которых можно связать с образованием TiN [3]. С увеличением плотности поглощенной энергии происходит уменьшение размера дендритов (рис. 1б, в), что обусловлено увеличением количества центров кристаллизации на поверхности.

Рентгеноструктурный анализ показал (рис. 2), что в исходном состоянии покрытие представляет собой твердый раствор Nb, Zr, Ti, Al, Cu на основе нитрида с ГЦК решеткой (MeN). В результате воздействия КПП происходит изменение фазового состава поверхностного слоя образцов (рис. 2). Наблюдается увеличение интенсивности дифракционных пиков титана и уменьшение интенсивности дифракционных линий MeN, что связано с перемешиванием материала покрытия и поверхностного слоя титана в расплаве и увеличением объемной доли титана в анализируемом слое. Кроме того, происходит формирование твердого раствора на основе α -Ti с участием элементов покрытия, о чем свидетельствует появление «плеча» слева на дифракционных пиках α -Ti. С увеличением плотности поглощенной энергии интенсивность линий твердого раствора уменьшается.

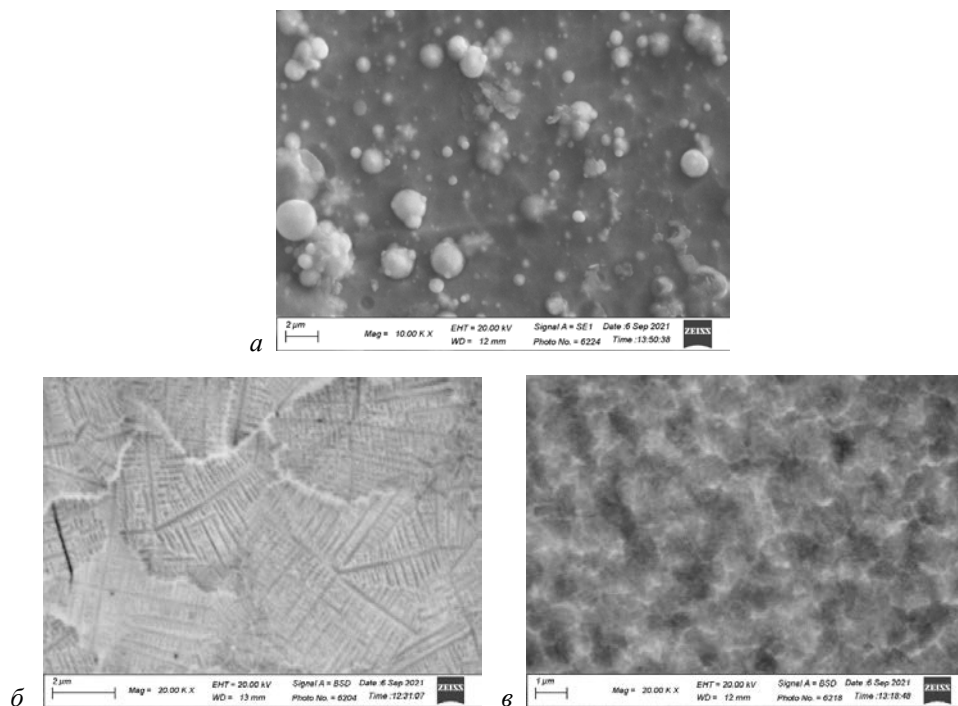


Рисунок 1 – Морфология поверхности исходного образца с покрытием (а) и образцов, обработанных в результате воздействия КПП с плотностью энергии 12 Дж/см² (б) и 23 Дж/см² (в)

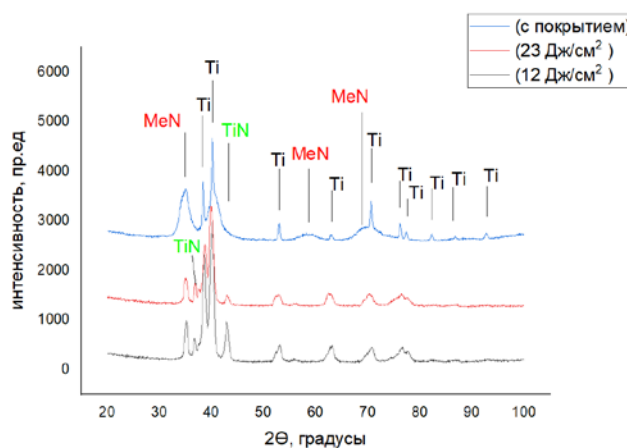


Рисунок 2 – Рентгеновские дифрактограммы образцов сплавов с покрытием до и после воздействия КПП с различной плотностью поглощённой энергии

Трибологические испытания показали (рис. 3), что при увеличении плотности поглощенной энергии наблюдается тенденция к увеличению коэффициента трения. Одной из основных причин, влияющих на поведение коэффициента трения материалов после плазменного воздействия, является изменение микротвердости поверхности. Проведенные измерения микротвердости показали уменьшение микротвердости от 332 Hv (исходный образец с покрытием) до 289 Hv после обработки КПП при 23 Дж/см².

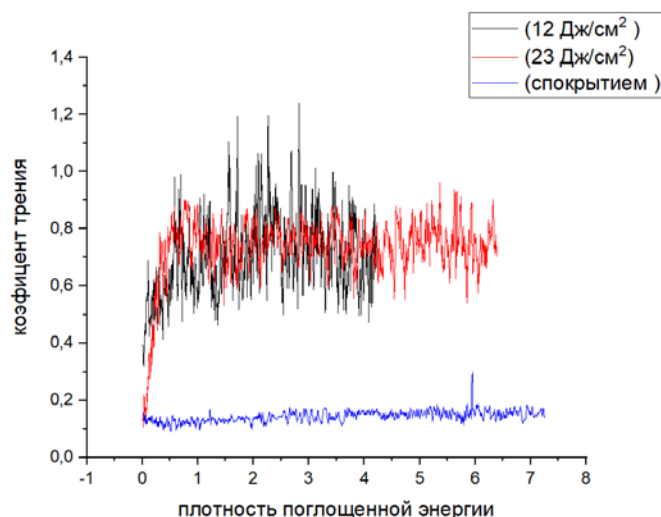


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента трения от длины пути, пройденного индентером исходного образца с покрытием, и образцов, обработанных КПП при различных режимах

Таким образом, установлено, что воздействие компрессионных плазменных потоков на систему «(Nb-Ti-Zr-Al-Cu)N/подложка Ti» приводит к формированию поверхностного слоя титана, содержащего нитрид титана и твердый раствор на основе α -Ti с участием элементов покрытия. Поверхностный слой после плазменного воздействия характеризуется уменьшенной микротвердостью и увеличенным коэффициентом трения по сравнению с исходным образцом с покрытием.

Список литературы

1. Stanislav V. Konstantinov, Alexander D. Pogrebnjak. Phase composition of nanostructured nitride coatings based on the high-entropy alloy TiHfZrVNb // 13th International Conference «Interaction of Radiation with Solids», September 30 – October 3, 2019, Minsk, Belarus. – P. 450–454.
2. Formation of high-entropy alloy by methods of ion-plasmatеchnologies / N. A. Prokopenko [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020.
3. Modification of chromium / titanium system phase composition and mechanical properties by compression plasma flows / N. N. Cherenda [et al.] // Journal of optoelectronics and Materials. – March 2010. – Vol. 12, No. 3. – P. 749–753.

Investigation of structure, phase composition and mechanical properties of «coating (Nb-Ti-Zr-Al-Cu)N / Ti substrate» system after compression plasma flows impact with different energy absorbed by the surface layer was carried out in this work.

Роговая Ирина Сергеевна, студентка 5 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, rogovalyaira.151299@gmail.com.

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

УДК 621.315.592

Н. Н. РУДЕНИК

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ НА ЭРОЗИЮ ПОВЕРХНОСТИ СИЛУМИНОВОГО СПЛАВА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Проведено облучение компрессионными плазменными потоками поверхности образцов алюминия и силуминовых сплавов, выявлены основные процессы эрозии поверхности данных материалов.

В настоящее время с развитием техники и научно-технического прогресса во многих отраслях промышленности актуальной является задача разработки новых материалов, обладающих высокими эксплуатационными свойствами и технологичностью в процессе производства, особое место среди которых занимают сплавы с низкими значениями температурного коэффициента линейного расширения в сочетании с необходимым уровнем механических свойств. Одними из таких материалов являются сплавы системы Al-Si, которые обладают малым удельным весом, низким значением коэффициента температурного расширения, высокой жаропрочностью, хорошей свариваемостью и склеиваемостью, также сохраняют прочность и пластичность при пониженных, вплоть до криогенных, температурах. Перспективность применения данного

типа сплава в производственной деятельности (к примеру, в машиностроении или приборостроении) требует тщательного изучения влияния на него ряда повреждающих факторов, таких как механическое и высокотемпературное воздействие, устойчивость к излучению и высоким энергиям и т. д. Одним из результатов этих воздействий являются протекающие в сплавах процессы эрозии, оказывающие значительное влияние на последующие эксплуатационные свойства материала [1]. Целью данной работы является установление протекания эрозии в поверхностных слоях сплава Al-Si с различным процентным соотношением кремния под импульсным воздействием компрессионных плазменных потоков, определение ее основных механизмов и оценка влияния содержания кремния на эрозию.

В качестве объекта исследования использовались образцы заэвтектического силуминового сплава с содержанием кремния 44 ат. % (Al – 44Si), представляющие собой небольшие треугольные призмы с площадью поверхности 0,94–1,05 см² и толщиной приблизительно 3 мм; образцы с содержанием кремния 20 ат. % (Al – 20Si), представляющие собой круглые пластинки площадью 0,754–1,178 см² и толщиной 3 мм, а также образцы эвтектического сплава (содержание кремния 12 ат. %) с площадью поверхности 1,32–1,33 см², толщиной 3 мм и образцы чистого алюминия с аналогичными параметрами. Модифицирование поверхности осуществлялось воздействием компрессионных плазменных потоков (КПП), генерируемых с помощью магнитоплазменного компрессора компактной геометрии в остаточной атмосфере азота (давление остаточной атмосферы 400 Па) с величиной напряжения на системе конденсаторов равной 4 кВ. Расстояния между поверхностью образца и срезом электрода разрядного устройства составляет 8 см. Обработка поверхности осуществлялась последовательным воздействием 1, 3, 5 и 7 импульсами КПП, которые следовали друг за другом с интервалом времени ~10 с, длительность одного импульса составляла 100 мкс. Анализ морфологии поверхности исследуемых образцов проводился на растровом электронном микроскопе (РЭМ) LEO 1455VP при ускоряющем напряжении 20 кВ, ток зонда 5×10^{-7} А.

Массу испытуемых образцов определяли с использованием аналитических весов Radwag с точностью $\pm 0,00005$ г. При сопоставлении масс силуминовых образцов до и после обработки было установлено, что воздействие компрессионных плазменных потоков приводит к эрозии их поверхности, проявляющейся в виде уменьшения массы образцов (рисунок 1).

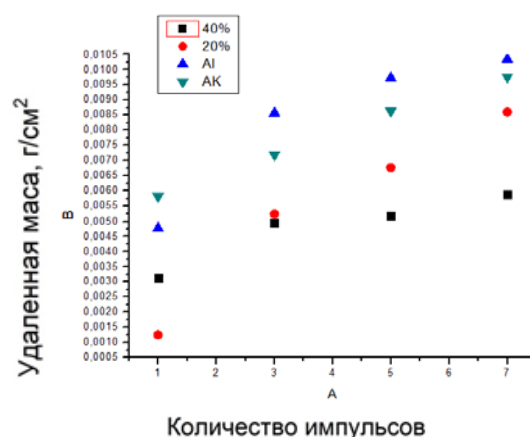


Рисунок 1 – Зависимость массы, удалённой с единицы поверхности исследуемого образца в результате его облучения разным количеством импульсов КПП

Как видно из полученного графика, количество уносимой массы для всех испытуемых образцов возрастает с ростом количества импульсов КПП. Анализируя представленный результат, можно заметить, что для заэвтектических сплавов, содержащих более высокую концентрацию кремниевой фазы, разность начальной и конечной массы будет возрастать с увеличением количества импульсов намного быстрее и заметнее, чем для чистого алюминия и эвтектики.

Одним из механизмов эрозии может быть испарение элементов, входящих в состав испытуемых образцов, с поверхности гладкого расплава. С этой целью решалось одномерное уравнение теплопроводности с соответствующими граничными условиями. Исходя из полученных результатов вычислений через 100 мкс на глубине 0,2 мкм максимальная температура для Al составила 2147 К, для Al – 12Si – 2265, для Al – 20Si – 2322 К, для Al – 40Si – 2490 К.

Согласно [2], скорость испарения материала J (кг/(м²·с)) в вакууме может быть оценена по формуле:

$$J = P_m \sqrt{\frac{m_{ar}}{4\pi kT}}$$

где P_m – давление насыщенных паров материала при температуре T , m_{aT} – масса атома испаряющегося материала. Давление насыщенных паров может быть рассчитано по формуле:

$$\lg P_m = A - \frac{B}{T},$$

где A и B – константы для данного материала, взятые согласно данным из [3].

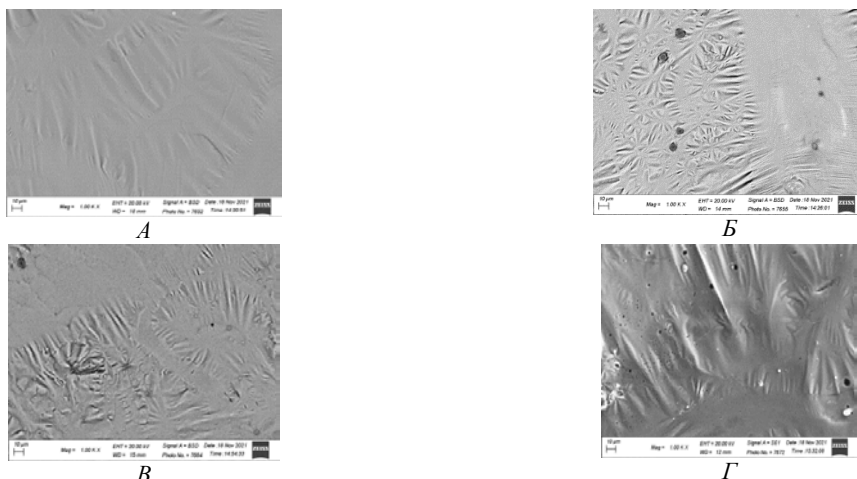
Согласно расчетам и полученным экспериментальным данным построим сравнительную таблицу скорости испарения материала и полного уноса массы, нормированную на единицу площади поверхности.

Таблица 1 – Значения скорости испарения и полного уноса массы исследуемых сплавов

Характеристики	Al	Al-12Si	Al-20Si	Al-40Si
$\Delta m_{\text{исп}}$, кг/(м ²)	$4,99 \cdot 10^{-7}$	$8,25 \cdot 10^{-5}$	$4,64 \cdot 10^{-4}$	$1,96 \cdot 10^{-4}$
ΔM , кг/(м ²)	$4,76 \cdot 10^{-2}$	$3,82 \cdot 10^{-2}$	$3,14 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что доля испаренной части сплава на несколько порядков меньше значения полной удаленной массы материала, что может свидетельствовать о незначительном влиянии фактора испарения как процесса эрозии при воздействии КПП на поверхность силуминов. Одним из подтверждений существенного преобладания гидродинамического течения при данном воздействии на алюминий-кремниевые сплавы является визуальное наблюдение поверхности образцов до и после облучения.

С целью выявления плавления поверхностных слоев изучаемых образцов были выполнены исследования с помощью РЭМ (рисунок 2):



А) Al; Б) Al-12Si; В) Al-20Si; Г) Al-40Si после воздействия 1 импульсом КПП

Рисунок 2 – Результаты РЭМ образцов:

Как можно заметить, воздействие КПП приводит к плавлению поверхностных слоев образцов. При этом отмечается возникновение округлых пор различных размеров, что может быть свидетельством образования газовых пузырей в жидкой фазе. На поверхности заметны следы движения расплава, свидетельствующие о том, что одним из возможных механизмов эрозии является гидродинамическое течение расплава и его последующее вытеснение за края образца давлением КПП. Подобный механизм был отмечен авторами [4].

Одним из подтверждений существенного преобладания гидродинамического течения при данном воздействии на алюминий-кремниевые сплавы является визуальное наблюдение поверхности образцов до и после облучения.



А) Al; Б) Al – 12Si; В) Al – 20Si; Г) Al – 40Si

Рисунок 3 – Поверхность алюминий-кремниевых сплавов до облучения



А) Al; Б) Al – 12Si; В) Al – 20Si; Г) Al – 40Si

Рисунок 4 – Поверхность алюминий-кремниевых сплавов после облучения

Таким образом, по итогам проведенного исследования можно заключить, что воздействие КПП вызывает эрозию поверхностных слоев алюминий-кремниевых сплавов с различным процентным содержанием кремния, возможными механизмами эрозии являются гидродинамическое течение расплава с последующим его вытеснением за края образцов давлением КПП, а также поверхностное испарение элементов сплава.

Список литературы

1. Бойко, В. И. Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц / В. И. Бойко, А. Н. Валяев, А. Д. Погребняк // Успехи физических наук. – 1999. – Т. 169, № 11. – С. 1243–1271.
2. Pliskovsky, V. Ya. Konstruktsionnye materialy i elementy vakuumnykh system / V. Ya. Pliskovsky // Structural materials and details of vacuum systems. – М. : Mashinostroyeniye Publ., 1976. – 64 p.
3. Жвавий, С. П. Численное моделирование динамики фазовых переходов в CaTe, инициируемых наносекундным излучателем эксимерного лазера / С. П. Жвавий, Г. Л. Зыков // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40, вып. 6. – С. 652–655.
4. Эрозия материалов при воздействии компрессионных плазменных потоков / Н. Н. Черенда [и др.] // Перспективные материалы. – 2014. – № 11. – С. 5–14.

The surface of samples of aluminum and silumin alloys was irradiated with compression plasma streams, the main processes of erosion of the surface of these materials were revealed.

Руденик Никита Николаевич, студент 4 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, marshalsultt@gmail.com.

Научный руководитель – *Крутилина Евгения Александровна*, ассистент Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, Soldatenko@tut.by.

УДК 05;06.3;12

А. С. САИДОВ, А. Ш. РАЗЗОКОВ, Д. В. САПАРОВ, Ш. Н. УСМОНОВ, Д. Э. КОШЧАНОВА

ПОЛУЧЕНИЕ ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ и $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ ИЗ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

Выращены эпитаксиальные слои твердого раствора $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ и $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ из ограниченного оловянного раствора-расплава на подложке GaAs(100) при температуре начала кристаллизации 750 °С на подложке GaAs(100). Состав раствора, используемого в работе, определялся опытным путем на основе диаграмм состояний. Показана модель кристаллической структуры $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ и $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ в твердом состоянии и молекулярные соединения компонентов системы в жидкой фазе.

Получение полупроводниковых твердых растворов, охватывающие большой спектр полосы чувствительности света и обладающие наилучшими фотоэлектрическими и электрофизическими параметрами, с наименьшими плотностями дислокаций и дефектов является всегда актуальной задачей. Твердые растворы на основе системы Ge-GaAs-ZnSe, GaAs-ZnSe позволяют варьировать основные электрофизические и оптические параметры полупроводникового материала в широких пределах в зависимости от химического состава. Постоянные кристаллические решетки Ge, GaAs, ZnSe очень близки ($a_{\text{Ge}} = 5.658 \text{ \AA}$, $a_{\text{GaAs}} = 5.654 \text{ \AA}$, $a_{\text{ZnSe}} = 5.668 \text{ \AA}$) и отличаются лишь на 0.25 %. Это дает возможность получить кристаллически совершенные сложные многокомпонентные твердые растворы и структуры на их основе, которые являются очень важным фактором при создании конкретных полупроводниковых приборов с оптимальными характеристиками.

Нами было выращены эпитаксиальные слои твердого раствора $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ и $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ из ограниченного оловянного раствора-расплава на подложке GaAs(100) при температуре начала кристаллизации 750 °С с принудительным охлаждением 1 град./мин. Детальное описание использованной

методики представлено в [1], состав раствора, используемого в работе, определялся опытным путем на основе диаграмм состояний [2].

Полученные эпитаксиальные слои являлись монокристаллом и имели сфалеритные структуры. Это показывает рентгенодифрактометрические исследования структур полученных образцов, которые можно объяснить упорядоченностями элементарных ячеек.

Взаимное молекулярное замещение этих компонентов не сильно деформирует кристаллическую решетку. При замещении молекул GaAs молекулами ZnSe или Ge-Ge, энергия упругих искажений кристаллической решетки будет минимальной, следовательно, они образуют непрерывный твердый раствор замещения в виде $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ и $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$. Тетраэдрические связи этого твердого раствора показаны на рис. 1а, б.

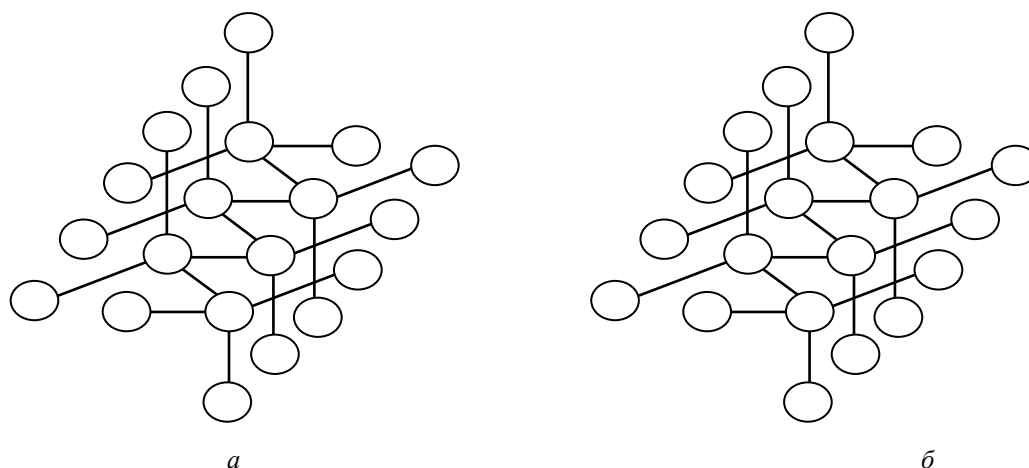


Рисунок 1 – Тетраэдрические связи твёрдого раствора замещения
а – $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ и б – $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$

Близость параметров решетки, коэффициентов термического расширения и плавный переход от арсенида галлиевой подложки к эпитаксиальному слою $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ и $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ предотвращает механическое напряжение, возникающие в переходной области подложки-пленки.

При росте твердого раствора из оловянного или свинцового раствора-расплава, в металлическом растворе компоненты GaAs, ZnSe и Ge-Ge будет в виде молекул. Это способствует росту эпитаксиальных слоев на подложку (рис. 2а, б).

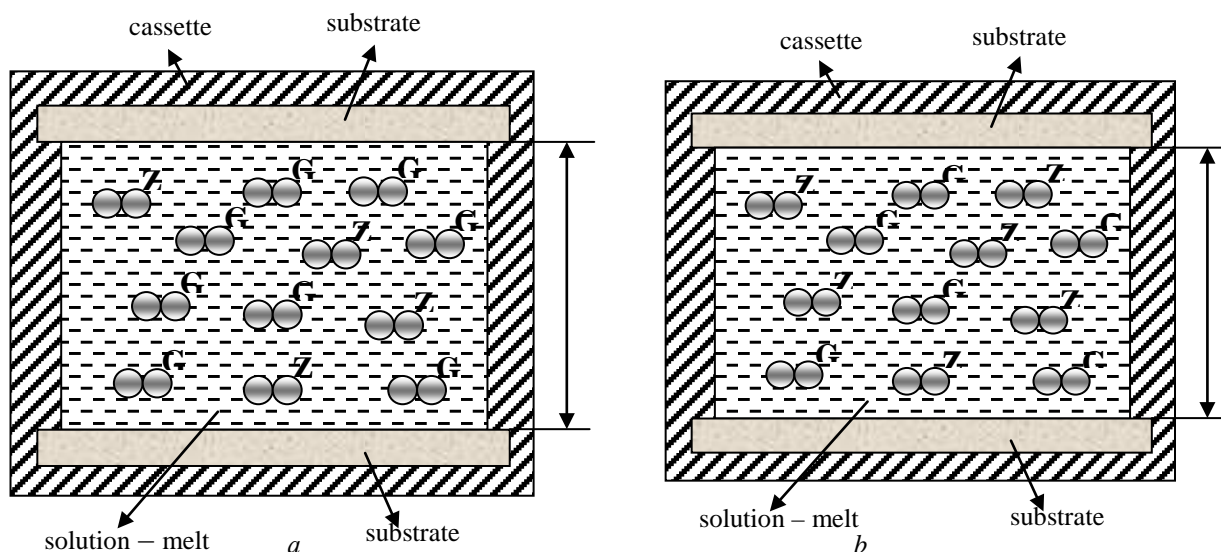


Рисунок 2 – Диаграмма графитовой кассеты с горизонтально расположенными подложками и раствором-расплавом (а – раствор-расплав Sn-Ge-GaAs-ZnSe, б – раствор-расплав Sn-GaAs-ZnSe), толщина зазора между подложками составляет $\delta = 1,2$ мм

Содержание химического состава поверхности твердого раствора $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ изучено с помощью рентгеновского микроанализатора «Jeol» JSMLV-1059, приведено в таблице 1.

Таблица 1

Образец (атом. %)	Ge	Ga	As	Zn	Se
1	1,91	49,13	45,32	1,54	1,41
2	2,07	48,76	46,04	1,47	1,53
3	1,98	47,96	47,24	1,39	1,51

Полученные эпитаксиальные слои $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ имели дырочного типа проводимости с концентрацией $2 \cdot 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью 20–25 В·с/см² при 300 К. Фоточувствительность структуры наблюдается в спектральном диапазоне 0,7–1,45 эВ.

Список литературы

1. Saidov, A. S. Obtaining and morphological studies of epitaxial layers of the $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ solid solution / A. S. Saidov, A. Sh. Razzokov // Siberian Physical Journal. – 2020. – Vol. 15, No. 2. – P. 84–91.
2. Andreev, V. M. Liquid epitaxy in technology semiconductor devices / V. M. Andreev, L. M. Dolginov, D. N. Tretyakov. – M.: Mod. radio, 1975.

The solid solutions of $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$, $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ are shown and the conditions of technological growth from the liquid phase are determined. The chemical composition of solid solution surface $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ has been studied by X-ray microanalysis. Some electrophysical and photoelectric properties of the film have been studied.

Саидов Амин Сафарбоевич, Физико-технический институт НПО «Физика – Солнце» АН РУз, Ташкент, Узбекистан, amin@uzsci.net.

Раззоков Алижон Шоназарович, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, razzokov.a@bk.ru.

Сапаров Дадажон Валиевич, Физико-технический институт НПО «Физика – Солнце» АН РУз, Ташкент, Узбекистан, dada@uzsci.net.

Усмонов Шукурullo Нигматович, Физико-технический институт НПО «Физика – Солнце» АН РУз, Ташкент, Узбекистан, sh_usmonov@rambler.ru.

Кошчанова Дурдона Эрматовна, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, dona2525@mail.ru, dona23042014@gmail.com.

Научный руководитель – Саидов Амин Сафарбоевич, доктор физико-математических наук, Физико-технический институт НПО «Физика – Солнце» АН РУз, Ташкент, Узбекистан, amin@uzsci.net.

УДК 539.231

М. А. САМАРИНА

СИНТЕЗ И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПЛЁНОК ОКСИДОВ ОЛОВА С ВКЛЮЧЕНИЯМИ Ni, Co и Fe

Для получения пленок оксидов олова, содержащих ферромагнитные металлы (железо, никель и кобальт) использован метод магнетронного распыления в плазме аргона и реактивного магнетронного распыления в аргон-кислородной плазме оловянной мишени со вставками из кобальта с последующим отжигом на воздухе. Кристаллическая структура пленок исследовалась методом комбинационного рассеяния света. Установлено, что синтезированные пленки представляют смесь фаз SnO , SnO_2 , Sn_2O_3 и Sn_3O_4 .

Диоксид олова является перспективным металлооксидным полупроводниковым материалом в силу сочетания в нем высоких значений электропроводности и коэффициента пропускания в видимом и ультрафиолетовом диапазоне спектра электромагнитного излучения. Поэтому пленки диоксида олова широко используются в качестве прозрачных электродов в светодиодах, жидкокристаллических дисплеях, солнечных элементах [1] и т. д. В последние годы проводятся исследования по синтезу пленок металлооксидных полупроводников, в том числе диоксида олова, проявляющих ферромагнитные свойства. Были получены пленки SnO_2 , обладающие ферромагнетизмом при комнатной температуре посредством их легирования переходными металлами (Co, Mn, Fe и др.) [2]. Это дает возможность новых потенциальных применений диоксида олова в спинтронике.

Для получения пленок диоксида олова с включениями ферромагнитных металлов нами использовался метод магнетронного распыления в плазме аргона и реактивного магнетронного распыления в аргон-кислородной плазме оловянной мишени (чистотой 99,99 %) со вставками из кобальта (сплава, состоящего из 29 %

никеля, 17 % кобальта и 54 % железа) шириной 2 или 4 мм с последующим двухстадийным отжигом на воздухе (при температуре 200 °С в течение 2 часов на первой стадии и при 375 °С в течение 1 часа на второй стадии). Диаметр мишени составлял ~ 10 см. При напылении ток мишени составлял ~ 100–150 мА, напряжение мишени ~ 250 В. Расстояние мишень-подложка составляло 4 см. Содержание кислорода в аргон-кислородной плазме при реактивном магнетронном напылении варьировалось в диапазоне 0–8 об. %.

Кристаллическая структура синтезированных пленок исследовалась методом комбинационного рассеяния света (КРС). Измерения спектров КРС образцов проводились с использованием спектрально-аналитического комплекса *Nanofinder HE* при возбуждении лазером с длиной волны 532 нм. Установлено, что лучшей кристаллической структурой, для которой на спектрах КРС наблюдаются интенсивные пики, соответствующие фазам оксидов олова, характеризуются пленки, синтезированные магнетронным распылением в атмосфере аргона, а также реактивным магнетронным распылением в аргон-кислородной плазме с невысоким содержанием кислорода в атмосфере (до 4 об. %). На рис. 1 показаны спектры КРС пленок оксидов олова с включениями ферромагнитных металлов, синтезированных в плазме аргона распылением мишени Sn со вставкой кобальта шириной 4 мм и подвергнутых двухстадийному отжигу на воздухе при температуре 200 °С в течение 2 часов на первой стадии и при 375 °С в течение 1 часа на второй стадии. В спектрах КРС наблюдаются линии, характерные для различных фаз оксидов олова. В частности, зарегистрированная вблизи 109 см⁻¹ линия соответствует моде B_{1g} (113 см⁻¹) монооксида олова SnO [3], а линии вблизи 76 см⁻¹ и 144 см⁻¹ наблюдаются в спектрах Sn₂O₃ и Sn₃O₄ соответственно [4]. Линия вблизи 532 см⁻¹ может быть вызвана дефектами кристаллической структуры или кислородными вакансиями в диоксиде олова [5]. Линия вблизи 660 см⁻¹ может свидетельствовать о наличии различных нестехиометрических фаз SnO_x (1 < x < 2) [6]. Линия вблизи 695 см⁻¹ соответствует ИК-активной моде колебаний A_{2u}(LO) диоксида олова [5].

Обнаружено, что добавление в аргонную плазму кислорода приводит к формированию более разупорядоченных пленок, характеризующихся отсутствием ярко выраженных пиков на спектрах КРС. Пленки с аморфной структурой синтезируются в процессе реактивного магнетронного распыления мишени олова со вставками из кобальта и последующего отжига на воздухе уже при содержании кислорода в плазме аргон/кислород, равном 4 об. %. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию технологических параметров синтеза пленок оксидов олова, легированных ферромагнитными металлами, а также на изучение их электрических и магнитных свойств.

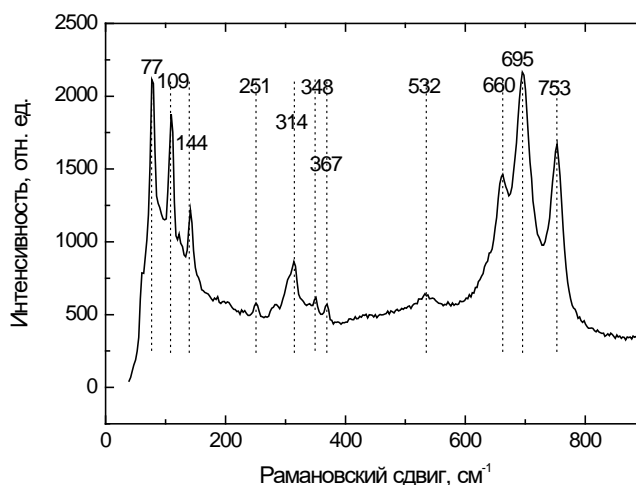


Рисунок 1 – Спектры КРС плёнок оксидов олова с включениями Ni, Co и Fe

Таким образом, нами синтезированы пленки оксидов олова с включениями атомов ферромагнитных металлов (Co, Ni, Fe), а также исследованы спектры КРС полученных образцов. Установлено, что при использовании для синтеза пленок магнетронного распыления в плазме аргона и реактивного магнетронного распыления в аргон-кислородной плазме (с содержанием кислорода до 4 об. %) мишени Sn со вставками из кобальта с последующим отжигом на воздухе при температуре 375 °С формируется нанокристаллическая структура пленок с наличием фаз оксидов олова SnO, SnO₂, а также нестехиометрических фаз Sn₂O₃ и Sn₃O₄. При увеличении содержания кислорода при реактивном распылении до 4 об. % и выше формируются аморфные пленки.

Список литературы

1. Chopra, K. L. Transparent Conductors – a Status Review / K. L. Chopra, S. Major and D. K. Pandya // Thin Solid Films. – 1983. – Vol. 102. – P. 1–46.

2. High Temperature Ferromagnetism with a Giant Magnetic Moment in Transparent Co-doped $\text{SnO}_{2-\delta}$ / S. B. Ogale [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2003. – Vol. 91. – P. 077205.
3. Shape-controlled growth and single-crystal XRD study of submillimeter-sized single crystals of SnO / Y. Guo [et al.] // CrystEngComm. – 2011. – Vol. 13. – P. 5677–5680.
4. Identification of oxygen vacancy types from Raman spectra of SnO_2 nanocrystals / L. Z. Liu [et al.] // J. Raman Spectrosc. – 2012. – Vol. 43, № 10. – P. 1423–1426.
5. Wang, B. Growth mechanisms of SnO_2/Sn nanocables / B. Wang, Y. H. Yang, G. W. Yang // Nanotechnology. – 2006. – Vol. 17, № 18. – P. 4682–4688.
6. Fabrication and ultraviolet photoresponse characteristics of ordered SnO_x ($x \approx 0.87, 1.45, 2$) nanopore films / C. Li [et al.] // Nanoscale Res Lett. – 2011. – Vol. 6, № 1. – P. 615 (1–7).

Tin oxides films containing ferromagnetic metals (iron, nickel, and cobalt) were fabricated by magnetron sputtering in argon plasma and reactive magnetron sputtering in argon-oxygen plasma of a tin target with kovar inserts followed by annealing in air. The crystalline structure of the films was studied by means of Raman scattering method. It was found that the synthesized films consist of mixture of different phases of tin oxides: SnO , SnO_2 , Sn_2O_3 , and Sn_3O_4 .

Самарина Мария Анатольевна, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, samarinama@bsu.by.

Научный руководитель – *Ксеневиц Виталий Казимирович*, кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь, Ksenevich@bsu.by.

УДК 535.34+541.13

А. А. СМОЛЯКОВ

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИКАТИОН-РАДИКАЛОВ ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВОГО КРАСИТЕЛЯ

Исследовано образование дикатион-радикалов в процессе электроокисления индотрикарбоцианинового красителя, перспективного для фотодинамической терапии. В ацетонитриле дикатион-радикалы характеризуются полосой поглощения, гипсохромно смещенной относительно спектра исходного красителя, временем жизни 16 мин. и g-фактором 2.002.

Фотодинамическая терапия (ФДТ) – метод лечения онкологических заболеваний, в котором для разрушения злокачественных клеток используется фотосенсибилизатор (ФС). ФС приобретает цитотоксичность при облучении светом определенной длины волны. Основной механизм противоопухолевой активности большинства ФС является их способность к генерации синглетного кислорода.

Полиметиновые красители (ПК) являются перспективными фотосенсибилизаторами для ФДТ, так как они обладают интенсивным поглощением в области прозрачности биологических тканей и рядом других преимуществ [1]. Противоопухолевая активность ФС на основе ПК сохраняется даже в гипоксических условиях [5].

Целью данной работы является исследование дикатион-радикалов индотрикарбоцианинового красителя, являющегося гидрофобным аналогом эффективного ФС для ФДТ [3]. Генерация радикалов осуществляется методом хроноамперометрического электролиза. Свойства радикалов изучаются при помощи спектроскопии электронного поглощения и ЭПР спектроскопии.

Материалы и методы. Исследованный индотрикарбоцианиновый краситель (структурная формула показана на рисунке 1) был синтезирован в НИИ ПФП им. А. Н. Севченко БГУ согласно ранее описанной методике [3].

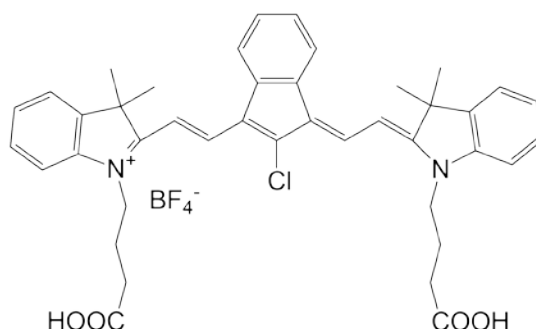


Рисунок 1 – Структурная формула исследуемого красителя

Хроноамперометрический электролиз производили при потенциале +1,1 В относительно насыщенного каломельного электрода (НКЭ) при помощи потенциостата-гальваностата Autolab PGSTAT 302N в стандартной трехэлектродной ячейке. В качестве рабочего и противоиэлектрода использовались платиновая пластина (площадь 10 см²) и платиновая проволока соответственно. Электрод Ag/Ag⁺ (0,01 М AgBF₄) с потенциалом +0,32 В относительно НКЭ служил электродом сравнения. В качестве фоновой электролита использовался раствор тетрафторобората тетрабутиламмония (0,1 М) в ацетонитриле. Концентрация красителя составляла 0,1 мМ.

Спектры ЭПР регистрировали при помощи спектрометра JEOL JES FA-200. Спектры электронного поглощения были получены при помощи спектрофотометра SOLAR PV1251 с использованием кварцевых кювет 1×1 см.

Результаты и их обсуждение. Как было показано ранее [2], электроокисление красителя наблюдается при +0,9 В (относительно НКЭ), в результате чего формируются дикатион-радикалы красителя.

В данной работе генерация дикатион-радикалов в процессе электроокисления была подтверждена методом ЭПР-спектроскопии. ЭПР-спектр раствора красителя, зарегистрированный во время электролиза, содержал широкую бесструктурную полосу с g-фактором 2.002. Данное значение g-фактора свидетельствует о высокой степени делокализации электрона на радикале.

Далее было исследовано изменение спектра электронного поглощения красителя в процессе электролиза (рисунок 2а). Полоса при 714 нм соответствует исходному красителю. В процессе электролиза эта полоса становится менее интенсивной, значит, исходный краситель расходуется. Одновременно с этим образуется новая полоса при 561 нм. Сопоставление данных ЭПР-спектроскопии и спектроскопии электронного поглощения позволяет утверждать, что полоса поглощения при 561 нм соответствует дикатион-радикалам красителя [4].

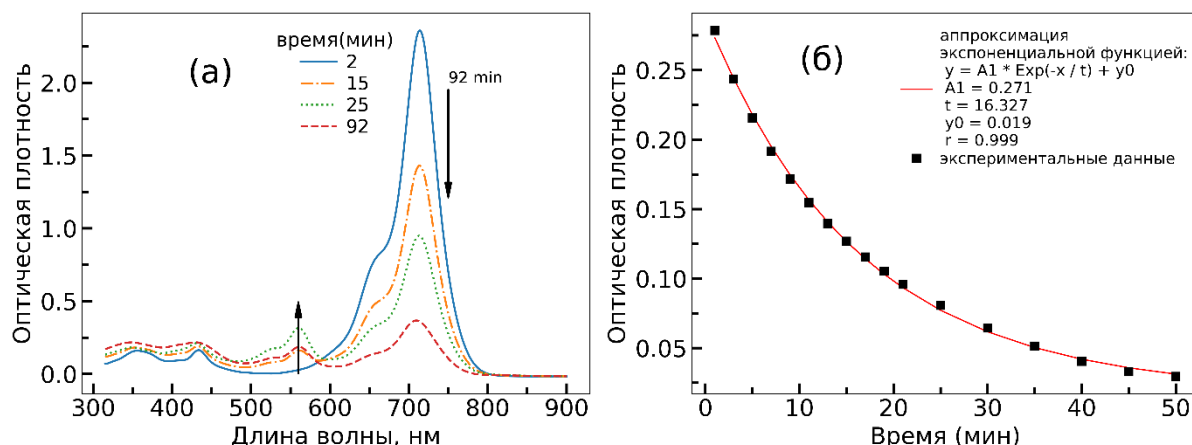


Рисунок 2 – Изменение спектра поглощения в процессе электролиза при +1,1 В (а) и кривая изменения оптической плотности при 561 нм после окончания электролиза (б) для красителя в фоновом электролите

На рисунке 2б показана кинетика изменения оптической плотности в полосе поглощения дикатион-радикала после прекращения электролиза. Данные хорошо аппроксимируются экспоненциальной функцией ($r^2 > 0,99$), что позволяет определить время жизни радикалов – 16 мин. Таким образом, электроокисление красителя является обратимым процессом.

Исследованы дикатион-радикалы индотрикарбоцианинового красителя, образующиеся в процессе электроокисления. Радикалы характеризуются полосой электронного поглощения при 561 нм, временем жизни 16 мин. и g-фактором 2,002. Генерация радикалов электрохимическим методом является обратимым процессом.

Список литературы

1. Shi, C. Review on near-infrared heptamethine cyanine dyes as theranostic agents for tumor imaging, targeting, and photodynamic therapy / C. Shi, J. B. Wu, D. Pan // J. Biomed. Opt. – 2016. – Vol. 21. – P. 050901.1–050901.11.
2. Optical and electrochemical properties of indotricarbocyanine dyes promising dyes for photodynamic therapy / H. M. Maltanava [et al.] // J. Appl. Spectr. – 2021. – Vol. 88. – P. 489–495.
3. Novel indotricarbocyanine dyes covalently bonded to polyethylene glycol for theranostics / A. A. Lugovski [et al.] // J. Photochem. Photobiol. A: Chem. – 2016. – Vol. 316. – P. 31–36.
4. Lenhard, J. R. Electrochemistry and Electronic Spectra of Cyanine Dye Radicals in Acetonitrile / J. R. Lenhard, A. D. Cameron // J. Phys. Chem. – 1993. – Vol. 97. – P. 4916–4925.
5. The effect of hypoxia on photocytotoxicity of tris(4-ethylphenyl)silole cyanine dye in vitro / Y. P. Istomin [et al.] // Exp. Oncol. – 2016. – Vol. 28. – P. 1–3.

The formation of radical dications in the process of electrooxidation of indotricarbocyanine dyes promising for photodynamic therapy has been investigated. In acetonitrile, radical dications are characterized by an absorption band hypsochromically shifted relative to the spectrum of the parent dye, a lifetime of 16 min and a g-factor of 2.002.

Смоляков Адам Алексеевич, студент физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, smoluakovadam@gmail.com.

Научные руководители – Мальтанова Анна Михайловна, кандидат химических наук, НИИ физико-химических проблем БГУ, Минск, Республика Беларусь, annamaltanova@gmail.com.

Белько Никита Викторович, кандидат физико-математических наук, Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ, Минск, Республика Беларусь, nikita.belko@gmail.com.

УДК 538.911

Н. А. СТЕПАНЮК

МЕТОД ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ

Произведено теоретическое вычисление величины дисторсий в решетках высокоэнтропийных сплавов CoCrFeNi, CoCrFeMnNi и NbTaTiV и оценено влияние облучения их ионами гелия (40 кэВ) и криптона (280 кэВ). Сделаны выводы о возможности оценки радиационной стойкости высокоэнтропийных сплавов различного состава с помощью теоретического расчета величины дисторсии решетки на основе данных об их стехиометрии.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) являются перспективным новым классом материалом, обладающим высокой радиационной стойкостью при многообещающих физических и механических свойствах [1]. Самыми распространенными и самыми подходящими с точки зрения свойств и экономики являются ВЭС на основе переходных 3d-металлов и ВЭС на основе тугоплавких металлов. Пионерскими в области высокоэнтропийных сплавов признаны работы Сенькова и Кантора [2–3].

Эффект дисторсии – один из ключевых твердорастворных эффектов, присущих высокоэнтропийным сплавам. Он заключается в возникновении искажений кристаллической решетки (дисторсии решетки) в связи с различием атомных радиусов и длин связей между атомами твердого раствора. Современные исследователи активно изучают дисторсию решетки высокоэнтропийных сплавов и объясняют на ее языке такие эффекты, как снижение подвижности междоузельных атомов, увеличение вероятности рекомбинации точечных дефектов, подавление диффузии крупных комплексов вакансий [4]. Существует теория о положительном влиянии дисторсии решетки на радиационную стойкость материала, потому оценка величины дисторсии решетки в сплаве может служить и оценкой его радиационной стойкости.

В работе рассматривались сплавы CoCrFeNi, CoCrFeMnNi и NbTaTiV, полученные в Пекинском технологическом институте методом дуговой плавки и отливки в медную кювету расплава технически чистых (до 99,7 %) металлов. Полученные слитки подвергались отжигу при температуре 1150 °С на протяжении 1 ч, холодной прокатке до снижения толщины на 85 % и последующим повторным отжигом при температуре 1150 °С на протяжении 2 ч с целью стимулирования релаксации внесенных прокаткой напряжений. Полученные образцы имели вид прямоугольных параллелепипедов линейными размерами 5×5×1,5 мм (CoCrFeNi, CoCrFeMnNi) и 6×6×1 мм (NbTaTiV). Облучение производилось в Астанинском филиале Института ядерной физики в Казахстане на установке ДЦ-60 при комнатной температуре: ионами He²⁺, 40 кэВ, 2·10¹⁷ см⁻² и ионами Kr¹⁴⁺, 280 кэВ, 5·10¹⁵ см⁻².

Фазовый анализ исследуемых образцов проводился с помощью метода рентгеновской дифрактометрии. Дифрактограммы получались с помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV с использованием излучения меди длиной волны $\lambda = 0,1542$ нм в параллельной геометрии пучка лучей.

С помощью метода энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС), выполненной на сканирующем электронном микроскопе ZEISS LEO 1455 VP был выявлен элементный состав всех образцов, результаты которого говорят о создании с помощью указанной выше технологии образцов с близким к эквивалентному элементному составом.

Рентгеноструктурный анализ (РСА) исходных и облученных образцов систем Co-Cr-Fe-Mn-Ni и Nb-Ta-Ti-V (рис. 1) показывает наличие твердого раствора замещения с ГЦК-решеткой и параметром решетки (0,359±0,004) нм в CoCrFeNi и (0,357±0,003) нм для CoCrFeMnNi, а для NbTaTiV твердый раствор замещения характеризуется ОЦК-решеткой и параметром (0,324±0,001) нм.

Исходя из данных, полученных с помощью РСА, фазовый состав изучаемых сплавов при облучении ионами гелия и криптона остается устойчивым, при прецизионной съемке при малых углах падения ($\alpha = 1^\circ$) заметна асимметрия пиков для образцов, облученных ионами гелия. Параметр решетки всех изучаемых сплавов увеличивается при облучении: ионами гелия на (0,22±0,01) % для CoCrFeNi, (0,11±0,01) % для CoCrFeMnNi,

(0,36±0,01) % для NbTaTiV; а ионами криптона на (0,11±0,01) % для CoCrFeNi, (0,11±0,01) % для CoCrFeMnNi, (0,04±0,01) % для NbTaTiV.

Методом Холла произведено разделение инструментально-физического уширения дифракционных рефлексов, уширения рефлексов, обусловленного размером областей когерентного рассеяния (ОКР) и уширения рефлексов, обусловленного механическими напряжениями (микродеформациями) решетки (рис. 2). Заметно, что облучение гелием приводит к уменьшению размеров ОКР для всех материалов: на 86 % для CoCrFeNi, на 61 % для CoCrFeMnNi и на 69 % для NbTaTiV. Облучение ионами криптона приводит только для сплава CoCrFeNi к уменьшению размера ОКР на величину в 19 %, при этом увеличение размеров ОКР составляет для сплава CoCrFeMnNi на 58 % и для NbTaTiV на 143 %.

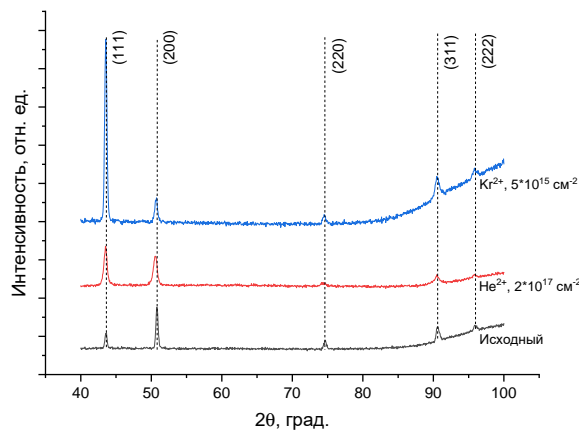


Рисунок 1 – Рентгеновские дифрактограммы необлученного и облученных образцов ВЭС CoCrFeMnNi

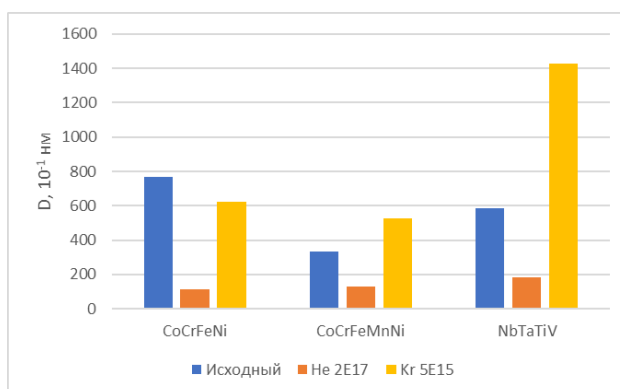


Рисунок 2 – Диаграмма размеров ОКР необлученных и облученных образцов CoCrFeNi, CoCrFeMnNi и NbTaTiV

В [5] предложен следующий вариант оценки величины дисторсии решетки вычислением показателя дисторсии (среднеквадратичного отклонения длины межатомных связей от ее среднего значения) u^d :

$$u^d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_i^{\text{эфф}} - \bar{d})^2}.$$

Величины $d_i^{\text{эфф}}$ и \bar{d} определяются как

$$d_i^{\text{эфф}} = c_i \sum_{j \neq i} d_{ij},$$

где c_i – атомная концентрация i -го элемента в сплаве, d_{ij} – расстояние между атомами i -го и j -го элементов в твердом растворе;

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^{\text{эфф}},$$

где n – количество элементов в твердом растворе.

Для корректной оценки величины дисторсии в условиях отсутствия данных о межатомных расстояниях в сложных многокомпонентных твердых растворах предложена нормировка показателя дисторсии u^d , рассчитываемого исходя из данных об элементном составе, полученным методом ЭДС:

$$\frac{u^a}{\langle a \rangle} = \frac{u^a}{\sum_{i=1}^n c_i a_i},$$

где a_i – параметр решетки i -го элемента в сингонии, совпадающей с типом решетки рассматриваемого твердого раствора. При расчете u^a по приведенным выше формулам вместо межатомных расстояний d используется параметр решетки a .

Нормированный показатель дисторсий $u^a/\langle a \rangle$ имеет значение 0,034 для CoCrFeNi, 0,036 для CoCrFeMnNi и 0,042 для NbTaTiV.

Уменьшение размеров ОКР для всех сплавов (рис. 2) при облучении гелием связано с ростом суммарной площади малоугловых границ за счет увеличения плотности радиационно-индуцированных дислокаций. Наличие гелий-вакансионных комплексов позволяет препятствовать движению данных дислокаций и способствует их накоплению.

При облучении ионами криптона (рис. 2) наблюдается рост размеров ОКР для сплавов CoCrFeMnNi и NbTaTiV и не наблюдается для сплава CoCrFeNi. Вероятно, дислокации в CoCrFeMnNi и NbTaTiV более подвижны, чем в CoCrFeNi, а концентрация препятствий для их перемещения в виде криптон-вакансионных комплексов мала, что приводит к стимуляции скольжения дислокаций на стоки в лице межзеренных границ и уменьшению суммарной площади малоугловых субзеренных границ. Увеличенный рост ОКР в NbTaTiV при облучении криптоном, вероятно, можно связать с повышенной подвижностью свободных вакансий в ОЦК-сплавах, обусловленной различием электронных структур атомов в ОЦК и ГЦК-ВЭС.

Таким образом, величины изменений параметров решетки, размеров ОКР и плотности дислокаций при облучении указывают на то, что при разработке перспективных ВЭС с однотипными решетками нормированный показатель дисторсии служит индикатором их радиационной стойкости: чем больше показатель дисторсии, тем выше радиационная стойкость (подавление накопления точечных радиационно-индуцированных дефектов), на что указывает превосходство устойчивости ВЭС CoCrFeMnNi над CoCrFeNi. В то же время ОЦК-ВЭС по сравнению с ГЦК-ВЭС обладают лучшей радиационной стойкостью в условиях, когда внедренные примеси играют весомую роль в эволюции дефектной структуры и общей реакции материала на облучение.

Список литературы

1. Ye, Y. F. Entropy Alloy: Challenges and Prospects / Y. F. Ye, Q. Wang, J. Lu, C. T. Liu, Y. Yang High // Progress in Materials Science, Materials Today. – 2015. – P. 1–14.
2. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys / B. Cantor [et al.] // Mater. Sci. Eng. – 2004. – Vol. 375. – P. 213–218.
3. Microstructure and room temperature properties of a high-entropy TaNbHfZrTi alloy / O. N. Senkov [et al.] // J. Alloys Compd. – 2011. – Vol. 509. – P. 6043–6048.
4. Mechanism of Radiation Damage Reduction in Equiatomic Multicomponent Single Phase Alloys / F. Granberg [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2016. – Vol. 116. – P. 135504-8.
5. C. Lee, Y. Chou, G. Kim, G. Song, M. C. Gao, C. Zhang, W. Chen, J. Poplawsky, Y. C. Chou, H. Choo and P. K. Liaw «Lattice-Distortion-Enhanced Yield Strength in a Refractory High-Entropy Alloy», Advanced Materials, (2020), 2004029.

A theoretical calculation of the magnitude of distortions in the lattices of CoCrFeNi, CoCrFeMnNi, and NbTaTiV high-entropy alloys is provided, and the influence of helium (40 keV) and krypton (280 keV) ion irradiation on them is estimated. Conclusions are made about the possibility of a preliminary assessment of radiation resistance of high-entropy alloys using a calculation of their lattice distortion parameters based on information about their stoichiometry.

Степанюк Никита Александрович, магистрант Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, nik.stepanjuk.99@mail.ru.

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

УДК 669.717:539.21:621.785.6

И. А. СТОЛЯР

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГАХ СПЛАВА Al–Mg–Zr ПРИ ОТЖИГЕ

С помощью растровой электронной микроскопии с использованием рентгеноструктурного микроанализа исследовано изменение структурно-фазового состояния на примере поведения циркония в фольгах экспериментального сплава Al–Mg–

Zr при изотермическом отжиге в интервале температур 250 °C – 300 °C. Установлено, что после отжига образуются частицы фазы Al_3Zr вытянутой морфологии, в которых содержание циркония варьируется от 15 мас. % до 19 мас. %.

В условиях активного развития отраслей авиакосмической промышленности важен высокий уровень механических свойств алюминиевых сплавов, в особенности сплавов системы Al–Mg, который можно достигнуть с помощью легирования алюминия переходными металлами и применения энерго- и ресурсосберегающих методов высокоскоростной кристаллизации [1, 2]. В настоящее время цирконий считается одной из самых перспективных добавок для сплавов алюминия. Он образует интерметаллическую фазу Al_3Zr , тетрагональная структура DO_{23} которой имеет малый параметр несоответствия с алюминиевой матрицей [3]. Также, как известно, цирконий обладает сравнительно низкой скоростью диффузии, благодаря чему при высокоскоростной кристаллизации обеспечивается формирование аномально пересыщенных твёрдых растворов. Цель данной работы – выполнить анализ структурно-фазового состояния быстрозатвердевшего (БЗ) сплава Al–Mg, легированного цирконием, после термообработки.

Фольги сплава Al–1,37 % Mg–0,21 % Zr (мас. %) были получены сверхбыстрой закалкой из жидкой фазы методом одностороннего охлаждения. Скорость охлаждения расплава составляла 10^6 К/с. Поперечное сечение свежезакаленных и отожженных при 250 °C – 300 °C в течение 1 часа фольг исследовалось методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием рентгеноструктурного микроанализа (РСМА).

При исследовании образцов методом РЭМ получено, что БЗ сплав является пересыщенным α -твёрдым раствором. В объеме свежезакаленных фольг сплава Al–Mg–Zr отсутствуют первичные включения вторых фаз, содержащих цирконий или магний. При последующем отжиге при температурах 250 °C – 300 °C происходит ускоренный распад пересыщенного твёрдого раствора с образованием частиц вторичных фаз. Обнаружено, что в структуре фольг сплава встречается незначительное количество вытянутых частиц с коэффициентом формы 0,5. Светлый контраст частиц на РЭМ изображениях, полученных в режиме детектирования обратно отраженных электронов, указывает на то, что в их состав входит цирконий, атомы которого имеют более высокую атомную массу, чем алюминий. С повышением температуры отжига размер частиц уменьшается в 2 раза и составляет в среднем 1,5 мкм.

Для изучения элементного состава обнаруженных выделений было проведено картирование по основным элементам поперечного сечения фольг, отожженных при температуре 250 °C (рис. 1). Размер обнаруженных цирконий-содержащих выделений меньше области генерации рентгеновского излучения при РСМА, что затрудняет определение их локального химического состава. Для уточнения состава выделений было дополнительно выполнено сканирование распределения элементов в отожженных БЗ фольгах вдоль линии (рис. 2 и 3).

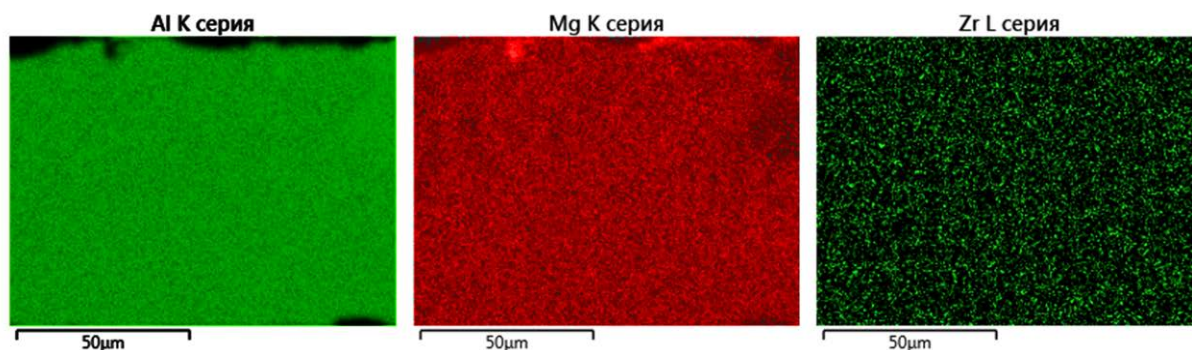


Рисунок 1 – Картирование поперечного сечения по основным химическим элементам фольг сплава Al–Mg–Zr после отжига при температуре 250 °C

Результаты на рис. 2 и 3 указывают на то, что в результате распада пересыщенного α -твёрдого раствора при отжиге образуются частицы вторичной Al_3Zr фазы. В интервале температур отжига 250 °C – 300 °C содержание циркония в крупных светлых выделениях варьируется от 15 мас. % до 19 мас. %. Различными авторами сообщается о выделении частиц фазы Al_3Zr в сплавах системы Al–Mg–Zr при высокотемпературном отжиге. Например, в работе [4] в литых образцах после отжига при температуре свыше 360 °C обнаружены метастабильные когерентные выделения вторичной фазы Al_3Zr двух типов в зависимости от параметров термообработки: крупные стержнеобразные частицы и компактные дисперсоиды. Однако данных для объяснения процессов формирования частиц Al_3Zr в зависимости от состава сплава и условия отжига недостаточно.

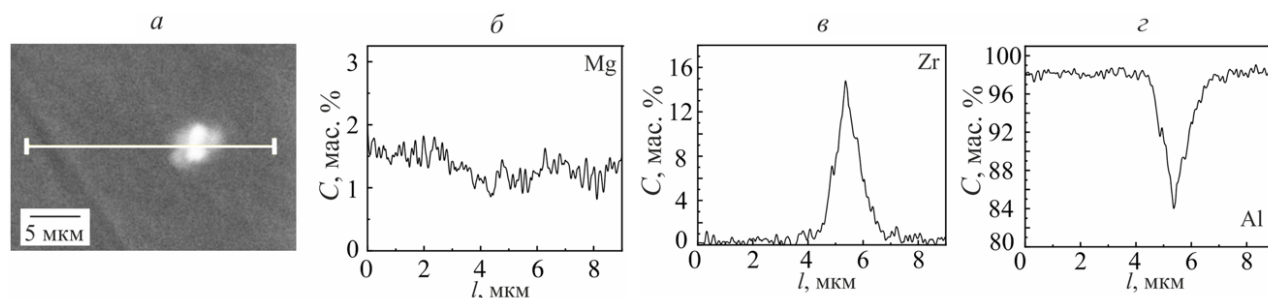


Рисунок 2 – РЭМ-изображение поперечного сечения фольги сплава Al–Mg–Zr, отожжённой при 250 °С (а), и данные РСМА вдоль заданной линии сканирования для магния (б), циркония (в) и алюминия (г)

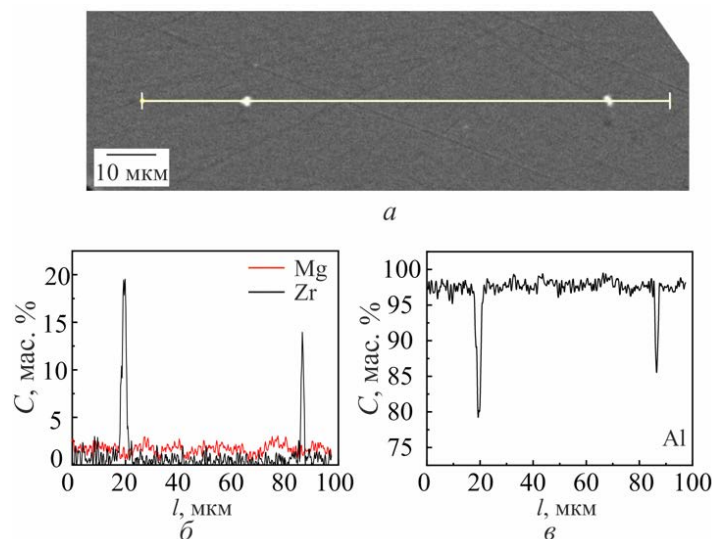


Рисунок 3 – РЭМ-изображение поперечного сечения фольги сплава Al–Mg–Zr, отожжённой при 300 °С (а), и данные РСМА вдоль заданной линии сканирования для магния и циркония (б), а также алюминия (в)

Представленные в данной работе результаты показывают, что в случае сверхбыстрой закалки сплава Al–Mg–Zr формируется пересыщенный твердый раствор, который является метастабильным и при нагреве претерпевает ускоренный распад. В результате отжига при температурах 250 °С и 300 °С в фольгах сплава обнаружены выделения фазы Al_3Zr . Частицы фазы Al_3Zr имеют вытянутую морфологию.

Список литературы

1. Бенариеб, И. Тенденции развития деформируемых сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu). Ч. 1 (обзор) / И. Бенариеб, Л. Б. Бер, К. В. Антипов, С. В. Сбитнева // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – Т. 56, № 3. – С. 14–22.
2. Dorin, T. Fundamentals of aluminium metallurgy / T. Dorin, A. Vahid, J. Lamb ; ed. R. N. Lumley. – Cambridge : Woodhead publishing series, 2018. – 387 p.
3. Srinivasan, S. Metastable phases in the Al_3X (X = Ti, Zr, and Hf) intermetallic system / S. Srinivasan, P. B. Desch, R. B. Schwartz // Scripta Metallurgica et Materialia. – 1991. – Vol. 23, iss. 11. – P. 2513–2516.
4. Precipitation behavior of L12 Al_3Zr phase in Al–Mg–Zr alloy / A. V. Mikhaylovskaya [et al.] // Materials Characterization. – 2018. – Vol. 139. – P. 30–37.

Changes of structural-phase state by the case of zirconium behavior in rapidly solidified foils of Al–Mg–Zr alloy have been studied using scanning electron microscopy and X-ray microanalysis after isothermal annealing in the temperature range of 250 °С – 300 °С. As a result of annealing, the decomposition of supersaturated α -solid solution along with the formation of Al_3Zr phase secondary particles was found. It was established that Al_3Zr phase particles have elongated morphology. In large precipitates, zirconium content ranges from 15 to 19 wt. %.

Столяр Иулиана Алексеевна, аспирант физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, uyluana@gmail.com.

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

Е. В. ТЕТЕРУКОВ

СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЁНОК InSb, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ НА ПОДЛОЖКЕ GaAs (100)

Рассматриваются результаты анализа данных высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии пленок InSb на подложке GaAs (100), полученных методом взрывного термического испарения. Эпитаксиальная пленка InSb толщиной $(2,00 \pm 0,05)$ мкм на подложке GaAs (100) осаждалась при температуре подложки $(375 \pm 2,5)$ °C. Установлено, что выращенные пленки InSb имеют плотность дислокаций $\delta = 4,38 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и значение микронапряжений $\varepsilon = 4,8 \times 10^7$ Па. Сравнение данных высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии демонстрирует, что эпитаксиальные пленки InSb отличаются более совершенной кристаллической структурой, чем в современных исследованиях о росте пленок InSb на подложке GaAs вакуумными методами осаждения.

Среди бинарных полупроводников группы A3B5 антимонид индия является важным полупроводниковым материалом для изготовления различных приборов. Это прямозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны 0,17 эВ при 300 К. В полупроводнике антимонида индия *n*-типа электрон обладает высокой электронной подвижностью $(80\,000 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1})$. За счет своих свойств антимонид индия широко используются в области микроэлектроники для производства датчиков Холла и магниторезисторов, чувствительных к скорости датчиков и магнитных датчиков [1]. На данный момент существует множество способов напыления пленок InSb, такие как молекулярно-лучевая эпитаксия [2], термическое испарение [3], электронно-лучевое испарение [4] и др. Наибольшее распространение для получения эпитаксиальных пленок InSb высокого качества получил метод молекулярно-лучевой эпитаксии. Однако, из всех методов, используемых для получения эпитаксиальных пленок InSb, метод взрывного термического испарения является наиболее простым, не требует дорогостоящего вакуумного оборудования, а высокие скорости роста значительно сокращают себестоимость получаемых структур.

Цель данной работы состоит в исследовании структурных свойств и деформации кристаллической решетки пленок InSb на подложке GaAs (100), полученных методом взрывного термического испарения, а также сравнение полученных результатов с данными о росте пленок InSb современными методами вакуумного осаждения.

В работе рассматриваются пленка InSb на подложке GaAs (100) толщиной $(2,00 \pm 0,05)$ мкм, выращенная при температуре подложки $(375,0 \pm 2,5)$ °C методом взрывного термического испарения [5], и пленка InSb на подложке GaAs (100), полученная методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Структура пленок исследовалась с помощью метода высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии. Метод основан на сравнительном анализе кривых качания и может быть использован в качестве интегральной методики для оценки кристаллического совершенства структуры пленок InSb. Сравнивая значения полной ширины кривых качания можно качественно оценить влияние методики получения пленок на их структурное совершенство [6].

В общем случае полная ширина пика на полувысоте (β) определяется микроструктурой исследуемого материала и конфигурацией прибора для рентгеноструктурного анализа. При аппроксимации дифракционного пика функцией Гаусса суммирование вкладов в уширение пика определяется по следующему закону [7]:

$$\beta^2 = \beta_{\text{inst}}^2 + \beta_{\text{ms}}^2, \# \quad (1)$$

где β_{inst} – инструментальное уширение, β_{ms} – уширение, связанное с особенностями микроструктуры образца.

Минимальный вклад несовершенства структуры в уширение позволяет использовать ширину дифракционного пика от монокристалла InSb в качестве β_{inst} .

Величина остаточных напряжений σ в решетке определялась по смещению дифракционного пика относительно стандартного положения пика, указанного в базе данных ICSD PDF-2 [6]:

$$\sigma = -\frac{E}{\nu} \frac{d - d_0}{d_0}, \# \quad (2)$$

где d – межплоскостное расстояние, d_0 – межплоскостное расстояние из базы ICSD, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Для оценки размера кристаллитов использовалась формула Дебая-Шеррера [8]:

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta_{\text{ms}} \cos \theta}, \# \quad (3)$$

где D – размер кристаллитов, λ – длина волны рентгеновского излучения, θ – дифракционный угол.

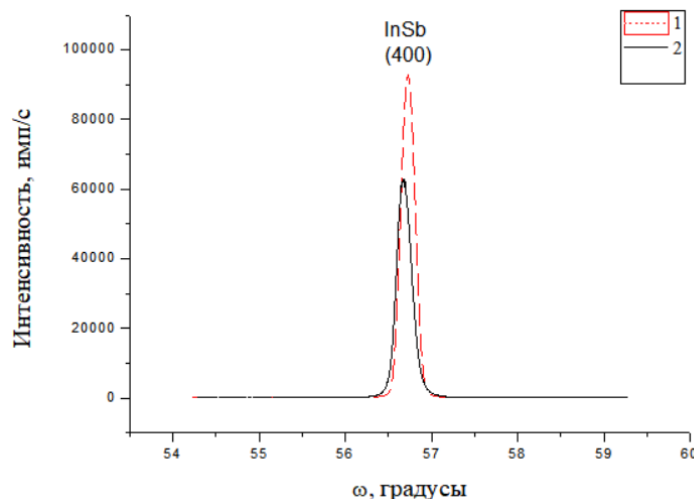
Величина микронапряжений ε в решетке определялась по следующей формуле [8]:

$$\varepsilon = \frac{E}{v} \left(\frac{\lambda}{D \sin \theta} - \beta_{ms} \operatorname{ctg} \theta \right) \cdot \# \quad (4)$$

Плотность дислокаций δ оценивалась с помощью следующего выражения [8]:

$$\delta = \frac{1}{D^2} \cdot \# \quad (5)$$

На рисунке 1 представлены кривые качания исследуемых пленок InSb на подложке GaAs (100), выращенных методами взрывного термического испарения и молекулярно-лучевой эпитаксии.



1 – молекулярно-лучевой эпитаксии; 2 – взрывного термического испарения

Рисунок 1 – Кривые качания плёнок InSb, полученных методами

В таблице 1 представлены результаты расчетов межплоскостного расстояния, постоянной решетки, величины напряжений в кристаллической решетке и плотности дислокаций для исследуемых пленок InSb на подложке GaAs (100). В том числе в таблице приведены результаты современных исследований по осаждению пленок InSb методами вакуумного осаждения на подложке GaAs различной кристаллической ориентации.

Таблица 1 – Положение пика ω , β , значения межплоскостного расстояния d , постоянной решётки a , размера зёрен D , остаточных напряжений в решётке σ , микронапряжений ε и плотности дислокаций δ при разных методах получения плёнок

Метод получения	ω , град.	β , град.	d , Å	a , Å	D , нм	σ , Па	ε , Па	δ , см ⁻²
Взрывное термическое испарение	28,343	0,18080	1,6224	6,4897	47,769	$-1,7 \times 10^8$	$4,8 \times 10^7$	$4,38 \times 10^{10}$
Молекулярно-лучевая эпитаксия	28,363	0,16479	1,6213	6,4854	52,017	$-9,6 \times 10^7$	$4,4 \times 10^7$	$3,70 \times 10^{10}$
Термическое испарение*	–	–	3,74	6,48	33,35	–	$1,5 \times 10^{11}$	$0,89 \times 10^{11}$
Электронно-лучевое испарение**	23,613	0,48	3,74	6,51	25,56	–	$2,1 \times 10^{11}$	$1,53 \times 10^{11}$
Электронно-лучевое испарение***	–	–	3,77	6,53	84,40	–	$2,0 \times 10^{11}$	$1,40 \times 10^{10}$

* – Результаты исследования из работы [3].

** – Результаты исследования из работы [4].

*** – Результаты исследования из работы [9].

Из данных таблицы 1 следует, что пленка, получаемая методом взрывного термического испарения в данном исследовании, обладает лучшими структурными свойствами по сравнению с пленками, выращенными авторами в исследованиях [3–4, 9]. Получаемые пленки в данном исследовании имеют меньшие значения микронапряжений и плотности дислокаций.

Стоит отметить, что исследуемые пленки InSb на подложке GaAs (100), выращенные методом взрывного термического испарения, не уступают по своим структурным свойствам пленке InSb на подложке GaAs (100), полученной методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Однако по литературным данным методом

молекулярно-лучевой эпитаксии были получены и пленки InSb с более высоким кристаллическим совершенством. Так, авторами исследований [10–11] были получены пленки InSb с $\beta = 0,0456^\circ$ и $\beta = 0,083^\circ$.

Таким образом, метод взрывного термического испарения является перспективным для осаждения эпитаксиальных пленок InSb на подложке GaAs (100) высокого качества. Установлено, что выращенные в данной работе методом взрывного термического испарения эпитаксиальные пленки InSb отличаются более совершенной кристаллической структурой, чем в современных исследованиях о росте пленок InSb на подложке GaAs вакуумными методами осаждения.

Список литературы

1. Болванович, Э. И. Полупроводниковые пленки и миниатюрные измерительные преобразователи / Э. И. Болванович. – Минск : Наука и техника, 1981. – 214 с.
2. High-mobility thin InSb films grown by molecular beam epitaxy / T. Zhang [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2004. – Vol. 84 (22). – P. 4463–4465.
3. Taher, Md. Abu. Effect of substrate temperature on the properties of vacuum evaporated thin InSb films / Md. Abu Taher // DIU Journal of science and technology. – 2018. – Vol. 13 (1). – P. 39–43.
4. Vishwakarma, S. R. Structural Characterization of Electron Beam Evaporated Indium Antimonide Thin Films / S. R. Vishwakarma, Ravishankar Nath Tripathi, Aneet Kumar Verma // The African Review of Physics. – 2011. – Vol. 6. – P. 103–110.
5. Effect of explosive thermal evaporation conditions on the phase composition, crystallite orientation, electrical and magnetic properties of heteroepitaxial InSb films on semi-insulating GaAs (100) / V. V. Uglov [et al.] // High Temperature Material Processes. — 2021. – Vol. 25, iss. 1. – С. 71–80.
6. Боуэн, Д. К. Высокорастворяющая рентгеновская дифрактометрия и топография : моногр. / Д. К. Боуэн, Б. К. Тан-нер. – М. : Наука, 2002. – 256 с.
7. Приборы и методы рентгеновской и электронной дифракции / П. Чижов [и др.]. – М. : МФТИ, 2011. – 152 с.
8. Influence of substrate temperature on the properties of vacuum evaporated InSb films / V. Senthilkumar [et al.] // Crystal Research and Technology. – 2005. – Vol. 40, iss. 6. – P. 573–578.
9. Fabrication and characterization of n-InSb thin film of different thickness / S. R. Vishwakarma [et al.] // Indian Journal of Pure & Applied Physics. – 2013. – Vol. 51. – P. 260–266.
10. High-mobility InSb thin films on GaAs (0 0 1) substrate grown by the two-step growth process / M. C. Debnath [et al.] // Journal of Crystal Growth. – 2004. – Vol. 267. – P. 17–21.
11. Use of atomic layer epitaxy buffer for the growth of InSb on GaAs by molecular beam epitaxy / P. E. Thompson [et al.] // Journal of Applied Physics. – 1991. – Vol. 69. – P. 7167–7172.

In the present work the results of High-resolution X-ray diffraction analysis of InSb films on GaAs (100) substrates obtained by explosive thermal evaporation was investigated. The epitaxial InSb film was deposited on a GaAs (100) substrate at a deposition temperature of $(375.0 \pm 2.5)^\circ\text{C}$. The film thickness was $(2.00 \pm 0.05) \mu\text{m}$. It has been established that the grown InSb films have a dislocation density $\delta = 4.38 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ and a microstress value $\epsilon = 4.8 \times 10^7 \text{ Pa}$. Comparison of High-resolution X-ray diffraction data shows that the epitaxial InSb films have a more perfect crystal structure than in modern investigation on the growth of InSb films on a GaAs substrate by vacuum deposition methods.

Тетеруков Евгений Валерьевич, студент 4 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, teterukov67@mail.ru.

Научный руководитель – *Углов Владимир Васильевич*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры твердого тела физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, uglov@bsu.by.

УДК 539.21

С. А. ТОЛКАЧЁВ

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ (Ti,Cu)N/ЭВТЕКТИЧЕСКИЙ СИЛУМИН, ПОДВЕРГНУТОЙ ВОЗДЕЙСТВИЮ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Представлены результаты исследований фазового, элементного состава и механических свойств поверхностного слоя системы (Ti,Cu)N/эвтектический силумин, подвергнутой воздействию компрессионных плазменных потоков. Определены зависимости фазового состава, параметра решётки алюминия, толщины легированного слоя, микротвёрдости и коэффициента трения от плотности энергии, поглощённой поверхностным слоем образца.

Сплавы алюминия с кремнием, называемые силуминами, находят широкое применение в различных областях промышленности. Эвтектический силумин, содержащий 10–13 % кремния, обладает хорошими литейными свойствами, малой удельной массой и низким коэффициентом линейного расширения, что,

учитывая доступность компонент данного сплава, делает его весьма перспективным. Вместе с тем, силумины обладают неудовлетворительными прочностными и трибологическими свойствами. Одним из путей решения этой проблемы является модификация свойств поверхностного слоя электронно-ионно-плазменным воздействием [1]. Целью данной работы являлось исследование структурно-фазового состояния, элементного состава и механических свойств системы (Ti,Cu)N/эвтектический силумин, подвергнутого воздействию компрессионных плазменных потоков (КПП).

Нанесение покрытия (Ti,Cu)N на подложку сплава АК12 (10–13 % Si, 0.7 % Fe, 0.5 % Mn, 0.6 % Cu, 0.3 % Zn, ост. Al, масс. %) производилось вакуумно-дуговым методом. Обработка образцов осуществлялась тремя импульсами КПП длительностью 100 мкс при расстоянии между образцом и электродами 8–14 см, что вело к изменению плотности энергии, поглощенной поверхностным слоем образца в диапазоне 26–40 Дж/см². В качестве рабочего вещества использовался азот под давлением 3 тор при разности потенциалов между катодом и анодом 4 кВ.

Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре Rigaku Ultima IV с использованием монохроматизированного медного излучения ($\lambda = 0,154178$ нм, K α 1). Анализ морфологии поверхности был выполнен с использованием растрового электронного микроскопа KarlZeiss LEO1455VP с ускоряющим напряжением 20 кВ. Микротвёрдость измерялась на твердометре WilsonInstruments 402MVD при нагрузке 0,1 Н методом Виккерса.

В результате воздействия КПП на образцы происходит изменение фазового состава образцов. На рис. 1 изображены дифрактограммы подложки, исходного образца и образцов, обработанных с различной плотностью поглощённой энергии (на дифрактограммах вертикальными линиями указано угловое положение эталонов).

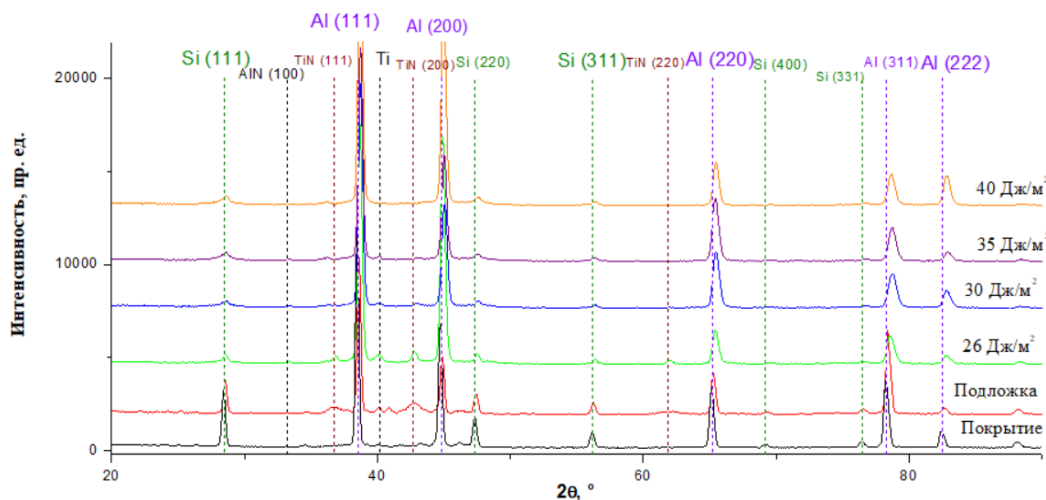


Рисунок 1 – Дифрактограммы образцов подложки, исходного образца и образцов, обработанных с различной плотностью поглощённой энергии

В исходном образце угловые положения дифракционных линий алюминия и кремния в подложке совпадают с угловым положением эталонов соответствующих фаз. На дифрактограмме исходного образца также наблюдаются дифракционные пики от покрытия (нитрид титана).

После воздействия КПП на дифрактограммах наблюдается уменьшение и дальнейшее исчезновение дифракционных пиков TiN с увеличением поглощённой образцом энергии. Происходит уширение дифракционных линий кремния и уменьшение их интенсивности с ростом поглощённой энергии. Дифракционные пики алюминия смещаются в сторону больших углов, что может свидетельствовать об образовании твёрдого раствора кремния в алюминии.

По сдвигу дифракционной линии алюминия (311) были определены межплоскостные расстояния и соответственно параметры решётки для образцов, обработанных с различной плотностью поглощённой энергии (рис. 2). Уменьшение параметра решётки в диапазоне плотности поглощенной энергии 26–30 Дж/см² связано с внедрением в кристаллическую решётку алюминия атомов кремния с меньшим атомным радиусом, вследствие чего возникают растягивающие напряжения I рода. Дальнейшее увеличение параметра решётки свидетельствует о частичном снятии напряжений и может быть вызвано легированием алюминия элементами с большими атомными радиусами, например титаном и магнием.

На дифрактограммах обработанных образцов появляется пик нитрида алюминия, который формируется при взаимодействии азота из остаточной атмосферы вакуумной камеры с атомами поверхности [2].

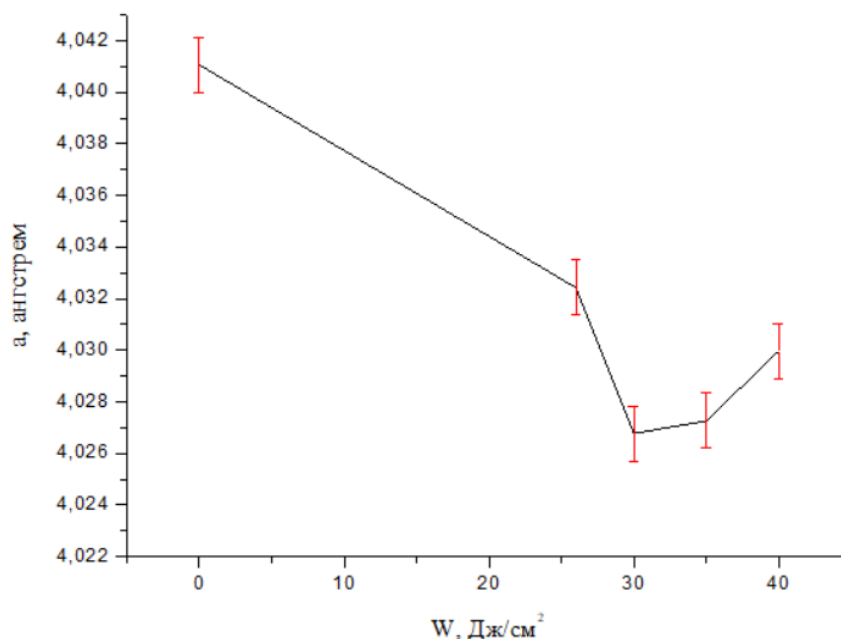


Рисунок 2 – Зависимость параметра решётки алюминия от плотности энергии, поглощённой поверхностью образца

Анализ морфологии поверхности образцов показал, что при увеличении плотности поглощенной энергии происходит сначала частичное (рис. 3а), а затем и практически полное растворение покрытия в материале подложки (рис. 3б). Также при облучении образуются трещины и поры. Поверхность обработанных образцов покрыта несплошной нитридной плёнкой AlN, что подтверждается также результатами рентгеноструктурного анализа.

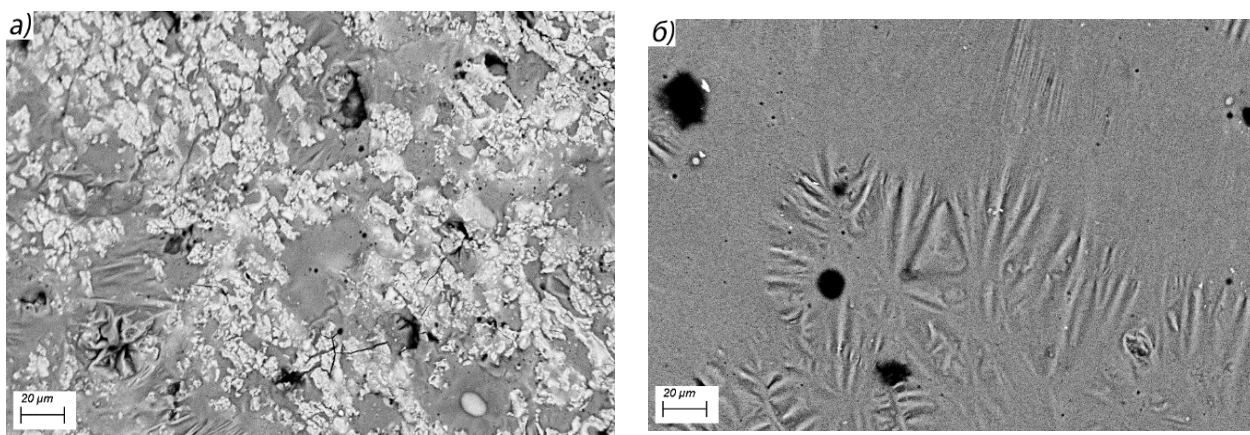
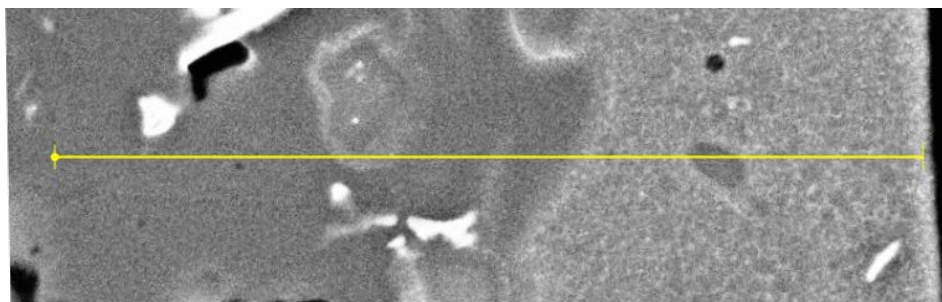


Рисунок 3 – Поверхность образцов после воздействия КПП с плотностью поглощённой энергии 26 Дж/см² (а) и 30 Дж/см² (б)

При исследовании поперечного сечения образцов была определена глубина проплавленного слоя, составляющая 19 и 45 мкм для плотностей энергий 26 и 40 Дж/см² соответственно. Как видно из рисунка 4, в результате воздействия КПП на систему (Ti,Cu)N/AK12 происходит легирование поверхностного слоя алюминиевого сплава атомами покрытия.

Изменения структурно-фазового состояния ведут к изменению механических свойств поверхностного слоя. Так, микротвёрдость образцов по Виккерсу возрастает с 116 МПа (в исходном образце сплава), до 128 МПа при плотности энергии 25 Дж/см² и до 152 МПа при плотности энергии 40 Дж/см². Данное изменение связано с образованием твердого раствора алюминия, формированием нитрида алюминия на поверхности и увеличением дисперсности структуры легированного слоя. В результате измерений коэффициента трения было установлено, что наименьшее значение данного параметра достигается при плотности энергии 30 Дж/см².

а



б

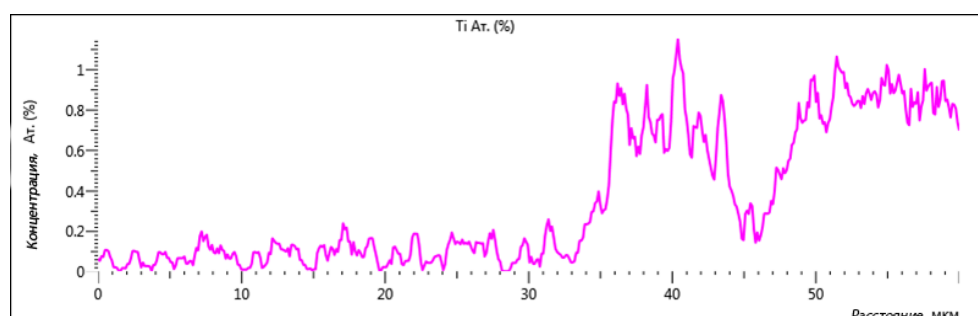


Рисунок 4 – Морфология поперечного сечения (а) и распределение титана по глубине поверхностного слоя (б) в образце, обработанном КПП при плотности поглощённой энергии 35 Дж/см²

Таким образом, установлено, что воздействие КПП на систему (Ti,Cu)N/эвтектический силумин приводит к легированию поверхностного слоя сплава атомами покрытия и изменению структурно-фазового состояния, увеличению микротвёрдости и уменьшению коэффициента трения поверхности.

Список литературы

1. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А. П. Ласковнев [и др.] ; под ред. А. П. Ласковнева. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 287 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.

Experimental results of structure, phase composition, microhardness and friction coefficient of the system (Ti,Cu)N/silumin subjected to compression plasma flows treatment in a nitrogen atmosphere are presented. Dependences of the aluminum lattice parameters, surface morphology, microhardness and friction coefficient are established.

Толкачѳв Степан Андреевич, студент 4 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, steptolk2000@gmail.com.

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

УДК 621.793.18

В. А. ТОЧЕНЫЙ, Е. В. ШЕВЧИК

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОПЛѢНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Проведено исследование влияния состава рабочей газовой среды, ускоряющего напряжения на аноде, и температуры подложек на оптические характеристики тонкопленочных покрытий из политетрафторэтилена, полученных ионно-лучевым распылением мишени из фторопласта.

В настоящее время приобрел достаточно большую популярность не только в техническом применении, но и в повседневной жизни такой вид покрытий из фторорганических соединений, как пленки политетрафторэтилена (фторопласт-4). Фторопласт, диэлектрическая проницаемость которого составляет около 2,0...2,4, является одним из перспективных материалов для межслойных диэлектриков [1]. Такие тонкопленочные покрытия могут также использоваться в качестве оптических, гидрофобных, антифрикционных, защитных, химически стойких покрытий. Из всех видов методов формирования покрытий

наиболее перспективными являются плазменное распыление и электронно-лучевое испарение полимера, поскольку они имеют высокую управляемость технологического процесса [2]. Весьма перспективным методом является ионно-лучевое распыление мишени из фторопласта [3]. Задачей настоящих исследований являлось изучение влияния различных технологических факторов на оптические характеристики покрытий из политетрафторэтилена.

Нанесение плёнок осуществляли путём ионно-лучевого распыления ионами аргона мишени из политетрафторэтилена, которая представляла собой диск диаметром 70 мм и толщиной 8 мм. Нанесение покрытий осуществляли на подложки из стекла К8. В процессе нанесения варьировались состав рабочей газовой среды, ускоряющее напряжение на аноде U_a и температура подложек. Ток термоэлектронного катода-компенсатора составлял 14–15 А. Исследование оптических характеристик (коэффициенты пропускания и отражения) покрытий осуществлялось в диапазоне 300–850 нм с помощью спектрофотометра PROSCAN.

На рисунке 1 приведены типичные спектральные зависимости пропускания и поглощения фторуглеродных покрытий. Синтезированные покрытия обладали высокой прозрачностью (свыше 90 %) в видимом и ближнем ИК диапазоне длин волн.

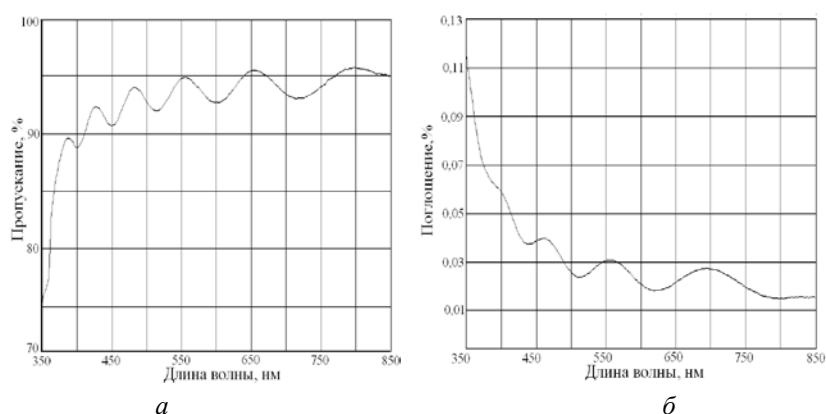
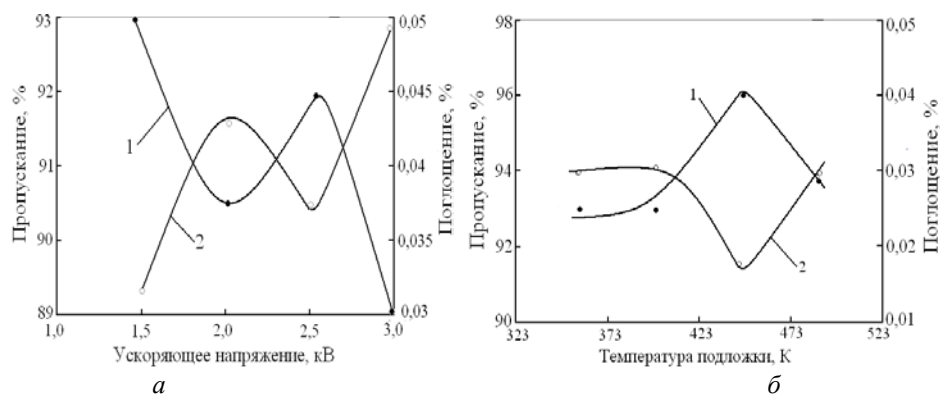


Рисунок 1 – Спектральные зависимости пропускания (а) и поглощения (б) фторуглеродных покрытий

На рисунке 2а приведена зависимость пропускания и поглощения фторуглеродных слоев от начального ускоряющего напряжения на аноде ионного источника на $\lambda = 555$ нм. Повышение U_a вызывало снижение оптического пропускания и рост поглощения покрытий.

Нагрев подложки способствовал улучшению оптических характеристик, что можно объяснить более плотной и упорядоченной структурой покрытия (рис. 2б). Оптимальная температура подложки составила ~ 450 К, при которой пропускание составило 96,5 %. Дальнейший нагрев привел к ухудшению параметров.

В таблице 1 приведены результаты по влиянию состава газовой среды и режимов распыления на оптические пропускание T и поглощение α на длине волны $\lambda = 555$ нм. Установлено, что при распылении в парах политетрафторэтилена наблюдается небольшое улучшение параметров покрытий по пропусканию и поглощению. Добавка к рабочему газу хладона-218 также привела к росту пропускания до 93,5 % при температуре подложки не выше 340 К. Также было установлено, что при величине парциального давления метана CH_4 от $1,8 \cdot 10^{-2}$ до $5,3 \cdot 10^{-2}$ Па оптические характеристики практически не изменились.



1 – пропускание; 2 – поглощение

Рисунок 2 – Зависимости пропускания и поглощения фторуглеродных покрытий от ускоряющего напряжения (а) и температуры подложки (б)

Таблица 1 – Исследования влияния газовой среды и режимов синтеза на оптические параметры тонкоплёночных слоев из политетрафторэтилена

№ п/п	Газовая среда	Парциальное давление хладона, CH ₄ , Па	Рабочее давление, Па	U _a , кВ	T, %	α, %
1.	Ar + пары CF ₄	–	2,3·10 ⁻¹	1,3	91,0	0,040
2.	Пары CF ₄	–	2,4·10 ⁻¹	2,5	92,5	0,035
3.	Ar + хладон	2,0·10 ⁻²	2,4·10 ⁻¹	1,0	93,0	0,028
4.	Ar + хладон	4,0·10 ⁻²	2,4·10 ⁻¹	1,2	93,5	0,027
5.	Ar + CH ₄	1,8·10 ⁻²	1,7·10 ⁻¹	2,0	91,7	0,039
6.	Ar + CH ₄	3,0·10 ⁻²	1,6·10 ⁻¹	1,9	92,7	0,031
7.	Ar + CH ₄	5,3·10 ⁻²	1,4·10 ⁻¹	2,0	92,0	0,034

Ширина запрещенной зоны E_g рассчитывалась путем анализа спектров пропускания. Она составила 3,32...3,38 эВ и практически не зависела от режимов формирования покрытий. Низкое значение E_g объясняется использованием подложек из обычного, а не кварцевого стекла.

Список литературы

1. Murarka, S. P. Low dielectric constant materials for interlayer dielectric application / S. P. Murarka // Solid State Technology. – 1996. – № 3. – P. 83–89.
2. He, J. L. Deposition of PTFE thin films by ion beam sputtering and a study of ion bombardment effect / J. L. He, W. Z. Li, L. D. Wang, H. D. Li // Nuclear Instrum. and Methods in Phys. Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1998. – Vol. 135, iss. 1–4. – P. 512–516.
3. Телеш, Е. В. Ионно-лучевое распыление мишени из политетрафторэтилена / Е. В. Телеш, В. А. Точеный // Приборостроение – 2021 : материалы XIV междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 18–20 нояб. 2021 г.) / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2021. – С. 355–356.

A study was made of the influence of the composition of the working gaseous medium, accelerating voltage at the anode, and the temperature of the substrates on the optical characteristics of thin-film coatings of polytetrafluoroethylene obtained by ion-beam sputtering of a fluoroplast target.

Точеный Василий Александрович, студент 4 курса Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, vasyatochyony@gmail.com.

Шевчик Елизавета Витальевна, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, elizaveta17oldego@gmail.com.

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

УДК 541-15

Д. С. УТЕПОВА, А. И. КУПЧИШИН

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА

Представлены результаты исследования влияния длительности облучения УФ-излучением на механические свойства (твёрдость, коэффициент статического и динамического трения) полиметилметакрилата. Полиметилметакрилат подвергался воздействию УФ-излучения от 15 до 90 мин. Обнаружено, что действие УФ-излучения на полиметилметакрилат приводит к изначальному увеличению твёрдости. Показано, что с увеличением длительности облучения твёрдость и коэффициент динамического и статического трения снижаются.

Полиметилметакрилат (ПММА), или органическое стекло, представляет собой жесткий и высокопрозрачный термопластичный полимер. Помимо своей низкой плотности, обладает хорошей технологичностью, что позволяет использовать его в различных областях. Например, промышленных деталях вместо стекла (для большей устойчивости к ударам), а также в областях медицины (лицевые трансплантаты, зубные протезы и т. д.), в автомобильной промышленности (покрытие фар автомобилей) и другие [1].

Известно, что при воздействии света на полиметилметакрилат происходят реакции фотодегradации, заключающиеся в поглощении полимером излучения, что в свою очередь может приводить к химическим реакциям, вызывающим модификации физических и механических свойств материала [2–3], и соответствующему возможному старению. В связи с этим интерес представляло исследование воздействия УФ-излучения на механические свойства полиметилметакрилата.

В качестве объекта исследования использовался ПММА, который являлся коммерческим продуктом общего назначения. Образцы имели толщину 1 мм и форму квадрата со стороной 10 мм.

Для облучения ультрафиолетовым излучением была использована эксилампа на основе K₂Cr₂O₇, которая генерировала УФ-излучение с длиной волны 207 нм. Плотность мощности излучения эксилампы составляла не менее 5 мВт/см². Облучение проводилось с одной стороны образцов в течение 15, 30, 45, 60, 90 минут. Микротвердость образцов измерялась на цифровом твердомере KASON 59-HV, согласно ГОСТ 2999 [4]. Экспериментальные исследования коэффициента трения в контакте образцов со стальной плоскостью производились на приборе для определения коэффициента трения MXD-02, в соответствии со стандартом ISO 8295-1986 при комнатной температуре, скорость скольжения 100 мм/мин., относительной влажности 60 % [5].

Исследование твердости ПММА, облучаемых УФ-излучением, показало, что твердость, измеренная сразу после третьего этапа облучения, заметно снижается.

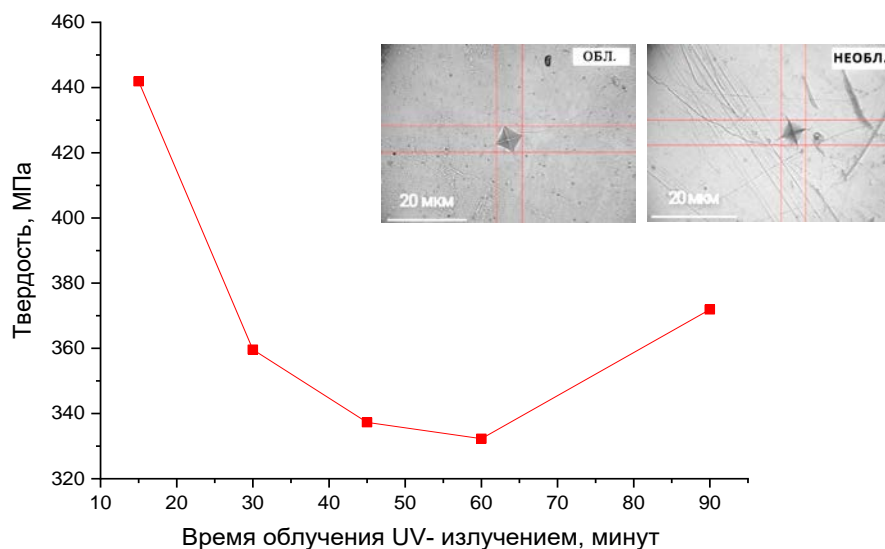


Рисунок 1 – Зависимость твёрдости от времени облучения ультрафиолетовым излучением

На рисунке 1 показаны зависимости твердости образцов полиметилметакрилата от времени облучения УФ-излучением. Минимальное значение твердости достигает 332,3 МПа при 60 минут облучения. После можно увидеть увеличение твердости в 90 минут облучения до 371,9 МПа, что показывает постепенное восстановление твердости. Твердость необлученного образца составила 411,7 МПа.

Проведены экспериментальные исследования статистического и динамического коэффициента трения в контакте образцов со стальной плоскостью.

Таблица 1 – Статистические и динамические коэффициенты трения при облучении УФ-излучением

Параметры облучения	Статистический коэффициент трения	Динамический коэффициент трения
Необлученный образец	0,072	0,083
УФ-излучение 15 мин.	0,061	0,053
УФ-излучение 30 мин.	0,079	0,069
УФ-излучение 45 мин.	0,091	0,100
УФ-излучение 60 мин.	0,093	0,082
УФ-излучение 90 мин.	0,076	0,069

В таблице 1 показано, что с увеличением длительности времени УФ-излучения коэффициент трения стал уменьшаться, это, в свою очередь, доказывает влияние УФ-излучения на молекулярные взаимодействия между поверхностью полимера и находящимся в контакте с ней объектом.

Как видно из полученных данных, облучение УФ-излучением органического стекла влияет на механические свойства, точнее на твердость, коэффициент статического и динамического трения. При воздействии УФ-излучения по длительности времени от 15 минут твердость достигало 441,9 МПа, а при воздействии облучения в течение 90 минут – 371,9 МПа, соответственно, что привело к уменьшению твердости. С увеличением длительности облучения происходит понижение динамического и статического коэффициента трения.

Список литературы

1. Influence of ultraviolet radiation on polymethylmethacrylate (PMMA) / Karolyne Gomes de Castro Monsorres [et al.]. – Journal of Materials Research and Technology. – 2019. – № 8 (5). – P. 3713–3718.
2. Valko, N. Structure and properties of paint coatings irradiated by ultraviolet rays / N. Valko, A. Hloba, A. Kasperovich // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, Tomsk, 14–26 sept. 2020 / Tomsk Polytechnic University ; ed.: G. Mesyats [et al.]. – Tomsk, 2020. – P. 1024–1027.
3. Валько, Н. Г. Структура и свойства лакокрасочных покрытий, модифицированных полыми стеклянными микросферами / Н. Г. Валько, А. И. Глоба, А. В. Касперович // Вестн. Гродн. гос. ун-та им. Янки Купалы. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 95–102.
4. ГОСТ 2999-75. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. – М.: Белорус. гос. комитет по стандартизации Респ. Беларусь, 1992. – 31 с.
5. ISO 8295-1986. International standard. Plastics – film and sheeting – Determination of the coefficients of friction. – Swedish standards institution, 1996. – 6 p.

The article provides results of a study of the effect of UV irradiation duration on the mechanical properties (hardness, coefficient of static and dynamic friction) of polymethylmethacrylate. Polymethylmethacrylate was exposed to UV radiation from 15 to 90 minutes. It has been found that the action of UV radiation on polymethylmethacrylate leads to an initial increase in hardness. It is shown that with an increase in the duration of irradiation, the hardness and the coefficient of dynamic and static friction decrease.

Утепова Дания Сабырбековна, докторант 3-курса Института математики, физики и информатики КазНПУ им. Абая, Алматы, Казахстан, utepova_daniya@mail.ru.

Купчишин Анатолий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, академик МАН ВШК, директор Учебно-научного физико-технологического центра КазНПУ им. Абая, Алматы, Казахстан, ankuchishin@mail.ru.

Научный руководитель – *Купчишин Анатолий Иванович*, доктор физико-математических наук, профессор, академик МАН ВШК, директор Учебно-научного физико-технологического центра КазНПУ им. Абая, Алматы, Казахстан, ankuchishin@mail.ru.

УДК 523.681,533.9.082.5

Р. А. ХАРИТОНЧИК, А. О. ПУХТЕЕВ, Н. А. ОРЕХОВА

АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДИОРИТОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Проведены исследования влияния параметров сдвоенных лазерных импульсов на формирование компонентного состава в лазерной плазме методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии (ЛАЭМС) образцов диорита. Определены оптимальные параметры лазерных импульсов, а именно энергии и интервала между сдвоенными лазерными импульсами, обеспечивающими максимальную чувствительность анализа химического состава диорита.

Летом 2020 года США отправили на Красную планету марсоход, оснащенный мощным лазером, который может выжигать участки породы для анализа образующейся плазмы при помощи камеры, а звуков испарения – при помощи микрофона. Мощности импульсов лазера Mars 2020 хватит, чтобы при температуре до 10 000 °C выжигать точечные отверстия в минералах/породах на расстоянии до семи метров. Использование лазера поможет операторам миссии определить состав пород, которые находятся вне досягаемости шупа ровера или там, куда ему будет сложно забраться. Лазер должен был позволить проанализировать цель, прежде чем ехать к ней. Предварительный анализ также отсеет породы, которые не подходят для керновых проб: их число ограничено. Особый интерес представляют также минералы, которые образуются в присутствии жидкой воды, такие как глины, карбонаты и сульфаты.

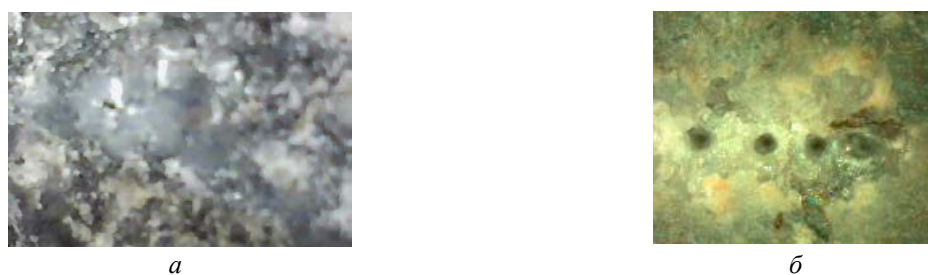
Команда марсохода «Персеверанс» опубликовала первые результаты годичной работы инструмента SuperCam, с помощью которого он дистанционно определяет состав грунта и камней на Марсе. SuperCam представляет собой 10-килограммовый инструмент для дистанционного (до 7–12 метров) исследования химического и минерального состава камней и грунта на Марсе, а также поиска органических соединений, могущих указывать на существование микробиологической жизни в прошлом планеты. В состав SuperCam входит лазерно-искровой эмиссионный спектрометр, оснащенный красным лазером, Рамановский спектрометр, оснащенный зеленым лазером, спектрометр ближнего инфракрасного диапазона, а также оптическая камера, позволяющая получать цветные снимки высокого разрешения, и микрофон. Все эти приборы находятся в «голове» марсохода «Персеверанс», установленной на мачте.

В начале марта 2021 года марсоход начал проверку и калибровку инструмента SuperCam. Для этого были выбраны две цели. Первая, получившая обозначение «Máaz» («Марс» на языке навахо), находилась на расстоянии 3,17 метра от ровера. Анализ данных показал, что это либо цельная вулканическая порода, либо она состоит из мелких зерен вулканического происхождения, которые слиплись в присутствии жидкой воды. Также возможно, что это осадочная порода, состоящая из магматических зерен, перенесенных вниз по течению в

кратер Езеро перед тем, как быть зацементированными вместе. Вторая цель, получившая обозначение «Yeehgo» («прилежный» на языке навахо), находилась на расстоянии 3,32 метра от ровера и представляет собой валун, на котором заметны яркие вкрапления. Инструмент смог выяснить состав камня-мишени и записать щелчки лазера по камням при помощи микрофона, сообщается на сайте NASA [1].

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить оптимальные условия для получения методом абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов данных по химическому составу образцов диоритов карьера Микашевичи, аналогичных марсианским. Главными минералами являются средний плагиоклаз (андезин или олигоклаз), роговая обманка, реже авгит и биотит, кварц, иногда присутствует калиевый полевой шпат. Аксессуарные минералы представлены титанитом, апатитом, магнетитом, ильменитом, цирконом.

Для получения снимков образцов диорита использовали взб-камеру и цифровой оптический микроскоп WEBBERS со светодиодной подсветкой, совмещенный с цифровой камерой (отраженный свет). Полученные снимки приведены на рис. 1.



а – общий вид образца (взб-камера);

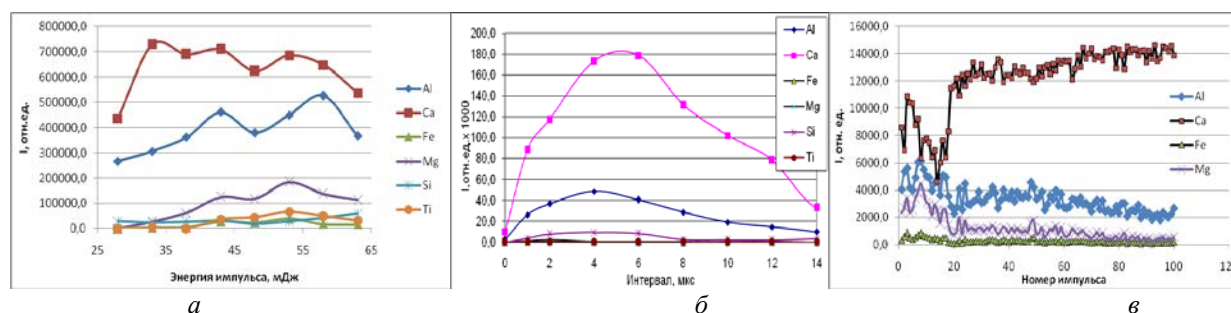
б – увеличенный участок образца, с пробитыми отверстиями (цифровой микроскоп WEBBERS F2n, увеличение $\times 50$)

Рисунок 1 – Снимки поверхности диорита

Анализ и целенаправленное повышение чувствительности спектрального анализа природных материалов методом лазерной искровой спектрометрии возможны на основе воздействия на первичную плазму дополнительного лазерного излучения. При двухимпульсном лазерном воздействии при различных углах падения луча на мишень и плазму возможно одновременное проведение высокочувствительного спектрального анализа, контроля концентрации возбужденных и заряженных частиц плазмы.

Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1 (изготовитель СП «ЛОТИС ТИИ»). Лазер может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Временной сдвиг между сдвоенными импульсами может меняться от 0 до 100 мкс с шагом 1 мкс. Размер сфокусированного пятна примерно 50 мкм, при фокусном расстоянии объектива 104 мм.

На рис. 2 представлена зависимость интенсивности линий кальция Ca II (396,847 нм), алюминия Al I (396,153 нм), железа Fe I (404,587 нм), магния Mg I (383,826 нм), кремния Si II (413,096 нм) и титана Ti II (376,132 нм) в спектрах от энергии, интервала между импульсами и глубины (номер импульса).



а – зависимость от энергии импульсов, б – от интервала между импульсами; в – от глубины (номер импульса)

Рисунок 2 – Зависимость интенсивности линий

Как видно из полученных данных, при увеличении энергии импульсов интенсивность линий элементов возрастает до энергии примерно равной 45–55 мДж, а затем рост замедляется. Из результатов, приведенных на рис. 2б, наглядно видно преимущество использования сдвоенных лазерных импульсов. При нулевом интервале между импульсами интенсивность практически всех линий очень мала, хотя энергия импульсов, действующих

на образец, удвоенная. Исходя из полученных результатов, оптимальными параметрами для анализа являются следующие: энергия 40–45 мДж, интервал между импульсами – 4–6 мкс.

При использовании энергии импульсов 45 мДж и интервале между импульсами равном 6 мкс проведен анализ изменения содержания элементов от глубины (рис. 26). Для моделирования процессов, аналогичных марсианским (влияние на поверхность камня многочисленных пыльных бурь), поверхность образца шлифовалась мелкой шкуркой, становясь при этом более рыхлой. Как видно из полученных данных, содержание кальция и алюминия в исследованном образце на глубине до ≈ 20 слоя существенно уменьшается.

Полученные результаты можно кратко объяснить следующим образом. Воздействие лазерного излучения большой интенсивности на поверхность твёрдого тела в этом случае происходит посредством абляционного процесса, заключающегося в испарении и ионизации поверхностных слоёв мишени, образовании плотной плазмы высокого давления и, как следствие, возбуждении гидродинамического движения в неиспарившейся части мишени.

Таким образом, выполненные спектроскопические исследования характеристик приповерхностной лазерной плазмы, образуемой при воздействии удвоенных лазерных импульсов на образец диорита, дали возможность определить оптимальные параметры лазерных импульсов (энергию, интервал между импульсами), позволяющие определять полуколичественное содержание основных химических элементов, входящих в состав диорита из карьера Микашевичи.

Список литературы

1. Ingenuity Mars Helicopter Landing Press Kit [Электронный ресурс] // NASA (January 2021). – Режим доступа: https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/mars_2020/download/ingenuity_landing_press_kit.pdf. – Дата доступа: 10.03.2022.

The influence of the parameters of twin laser pulses on the formation of the component composition in laser plasma by laser atomic emission multichannel spectrometry (LAEMS) of diorite samples has been studied. The optimal parameters of the laser pulses, namely the energy and the interval between the twin laser pulses, providing maximum sensitivity of the analysis of the chemical composition of diorite, have been determined.

Харитончик Роман Александрович, ученик 8 класса ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», Минск, Республика Беларусь.

Пухтеев Александр Олегович, ученик 8 класса ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», Минск, Республика Беларусь.

Орехова Наталья Андреевна, учитель астрономии ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», Минск, Республика Беларусь, sotis-nil@yandex.ru.

Научный руководитель – *Орехова Наталья Андреевна*, учитель астрономии ГУО «Средняя школа № 64 г. Минска», Минск, Республика Беларусь, sotis-nil@yandex.ru.

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

УДК 621.315.592

В. М. ХОЛОД

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ, ОБЛУЧЁННОГО НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ КРИПТОНА

Проведено исследование по влиянию облучения ионами Kr^+ (энергия 280 кэВ и дозы $1 \times 10^{13} - 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$) на структурно-фазовое состояние керамики на основе карбида кремния.

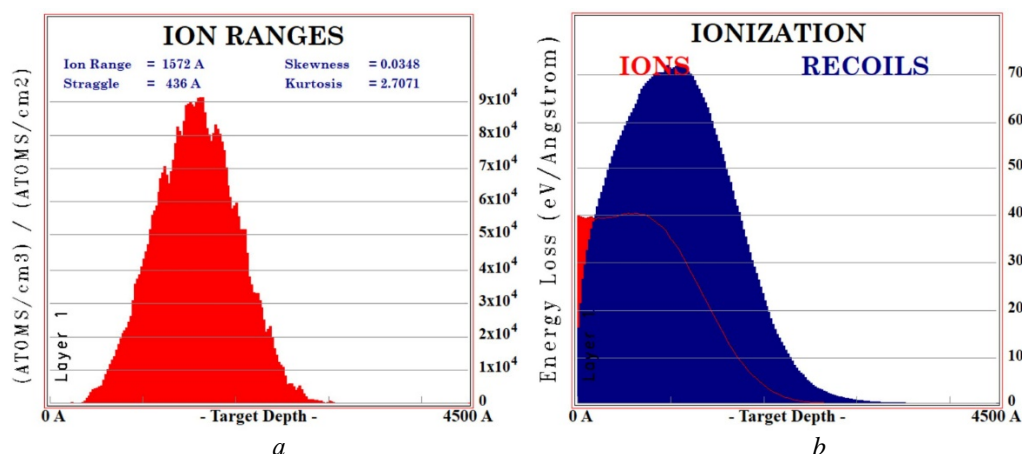
Ввиду своей широкой запрещенной зоны, высокой теплопроводности, хорошей стабильности, высокой прочности и радиационной стойкости карбид кремния является перспективным материалом для использования в качестве конструктивных элементов в термоядерных реакторах, реакторах деления и газоохлаждаемых реакторах деления, а также в захоронениях радиоактивных ядерных отходов [1]. Таким образом, исследование радиационной стойкости структурно-фазового состояния и характера эволюции дефектов в карбиде кремния после имитационного облучения осколков деления является актуальной задачей.

Керамические образцы SiC были получены в ИТМО НАН РБ путём связывания двух фракций порошков SiC M5 и M50 (размер зёрен 5 мкм и 50 мкм соответственно) с помощью термопластичного связующего на основе парафина Р-2 и последующим силицированием при температуре 1800 °С и давлении 0,13 Па. В результате конечная Si/SiC керамика содержит порядка 78 % карбида кремния и менее 2 % единичных остаточных пор с характерным размером до нескольких мкм [2].

Перед облучением образцы карбида кремния были механически отполированы. Облучение образцов ионами Kr^+ с энергией 280 кэВ проводилось на линейном ускорителе тяжёлых ионов ДЦ-60 (Институт ядерной физики, Нур-Султан, Казахстан). Облучения ионами криптона проводились при флюенсах 1×10^{13} , 1×10^{14} , $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Исследование структурно-фазового состояния исходных и облучённых образцов карбида кремния проводилось методом рентгеноструктурного анализа (PCA) на дифрактометре Ultima IV (Rigaku) с использованием геометрии параллельного пучка в медном ($Cu_{K\alpha}$) излучении с длиной волны 0,154179 нм, а также методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Расчет концентрации и проективного пробега ионов криптона проведен в программе SRIM 2013. На рисунке 1 показаны результаты моделирования имплантированных ионов криптона в образцах SiC. Средний проективный пробег ионов (R_p) составил 157 нм, с максимумом повреждений на глубине 165–175 нм. Наибольшее значение смещений составляет: 0,03 сна для дозы 1×10^{13} , 0,3 сна для дозы 1×10^{14} и 15 сна для дозы $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Концентрация имплантированных ионов Kr^+ не превышает 1 %.



а – пробег ионов, б – ионизационные потери

Рисунок 1 – Результаты моделирования облучения образцов SiC в SRIM

На рисунке 2 представлена рентгенограмма исходного образца. Исходные образцы представляют собой композит: SiC-6H – гексагональная (P63mc), Si – кубическая (Fd-3m), SiC-15R – тригональная (R3m) сингонии. Основной фазой является SiC-6H (~80 %), содержание фазы SiC-15R – около 20 %, Si – менее 5 %. Съемка проводилась в геометрии θ -2 θ .

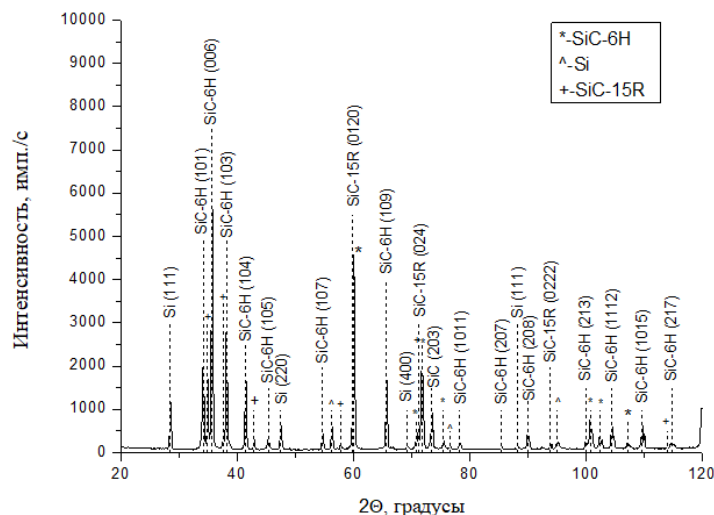


Рисунок 2 – Рентгенограмма исходного образца

На рентгенограмме облученных образцов (рис. 3) видно, что, начиная с дозы $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$, дифракционные пики, принадлежащие фазе 15R-SiC, отсутствуют, что, по-видимому, обусловлено аморфизацией этой фазы. Данный эффект подтверждается и другими методами. Учитывая малую глубину залегания имплантированной

примеси (рис. 1а) и радиационные повреждения (рис. 1б), последующая съемка проводилась под углом 0,3 градуса и глубина проникновения оставляла порядка 1 мкм.

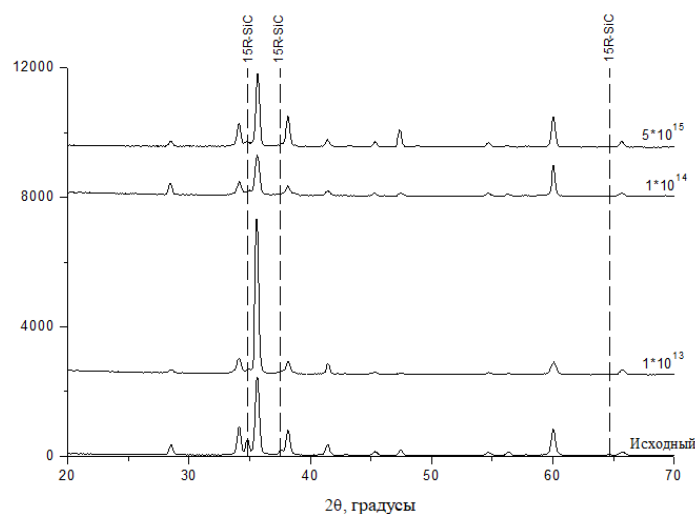


Рисунок 3 – Рентгенограммы образцов, облученных ионами Kr^+ (280 кэВ) при флюенсах $1 \cdot 10^{13}$, $1 \cdot 10^{14}$, $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$

На рисунке 4 представлены зависимости относительного изменения параметра решетки ($\Delta a/a_0$) и ($\Delta c/c_0$) от дозы облучения ионами криптона и ксенона. Параметры решетки a и c были рассчитаны с использованием метода Ритвельда. В качестве a_0 и c_0 использовались параметры решетки необлученного SiC-6H.

Видно, что облучение ионами К приводит к значительному росту деформации решетки, что обусловлено формированием радиационных дефектов и их кластеров [3]. При увеличении дозы относительное изменение параметра a решетки уменьшается, параметра c увеличивается. Такое изменение кристаллической решетки происходит вследствие радиационного роста. Этот радиационный эффект характерен для облученных металлов с ГПУ решеткой, особенно цирконии [4].

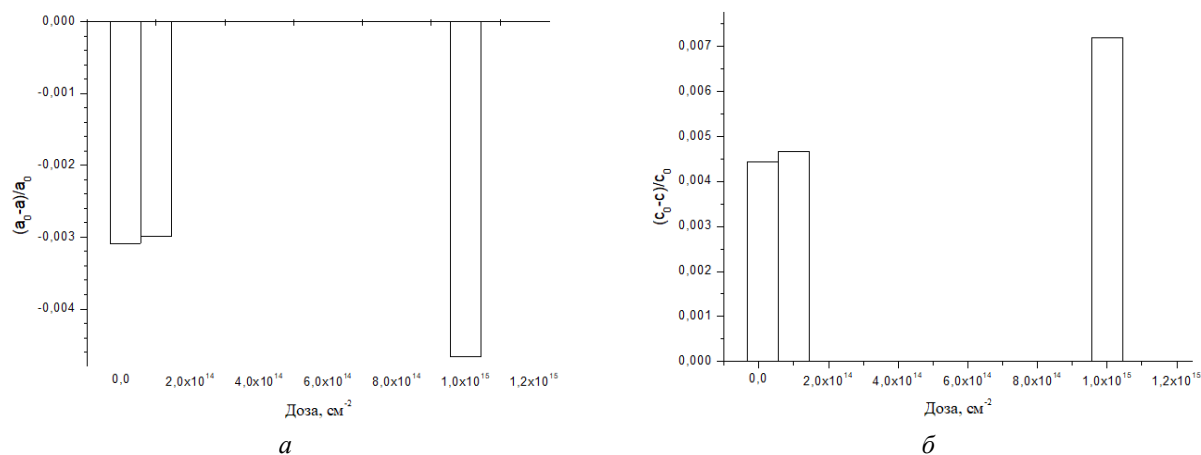


Рисунок 4 – Зависимость деформаций параметра a (а) и c (б) 6H-SiC от дозы облучения образцов SiC, облученных ионами Kr^+

Результаты СЭМ показаны на рисунке 5. Глубина проникновения электронов около 0,5 мкм. На исходном образце элементный контраст позволяет выявить зерна карбида кремния, а между ними кремний (что связано с технологией приготовления образцов). При дозе $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ наблюдается зеренная структура, но при дальнейшем увеличении дозы происходит аморфизация приповерхностного слоя. Исходя из полученных данных и рассчитанных глубин анализа глубин зондирования, можно предположить, что толщина аморфного слоя составляет примерно 0,5 мкм.

Таким образом, при облучении карбида кремния ионами Kr^+ (энергия 280 кэВ и дозами до $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) происходит радиационный рост, характерный для гексагонального типа кристаллической решетки, а также аморфизация приповерхностного слоя толщиной $\sim 0,5 \text{ мкм}$.

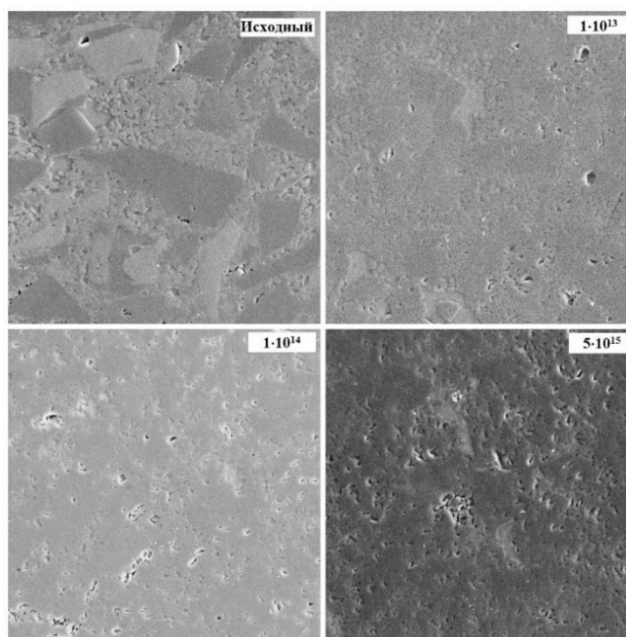


Рисунок 5 – СЭМ-изображения образцов SiC, облучённых ионами Kr⁺

Список литературы

1. Thermal recovery of amorphous zones in 6H-SiC and 3C-SiC induced by low fluence 420 keV Xe irradiation / C. L. Xu [et al.] // Materials Science and Engineering B. – 2003. – P. 269–276.
2. Grinchuk, P. S. Effect of technological parameters on densification of reaction bonded Si/SiC ceramics / P. S. Grinchuk, M. V. Kiyashko, H. M. Abuhimd // Journal of the European Ceramic Society 38. – 2018. – P. 4815–4823.
3. Углов, В. В. Радиационные эффекты в твердых телах / В. В. Углов. – Минск : БГУ, 2011. – 207 с.
4. Yang Li. Cluster dynamics modeling of irradiation growth in single crystal Zr / Yang Li, Nasr Ghoniem // Journal of Nuclear Materials. – 2020. – № 540. – С. 152–312.

A study was conducted on the effect of Kr ion irradiation (280 keV energy and doses of $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ and $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) on the structural and phase state of ceramics based on silicon carbide.

Холод Валентина Михайловна, студентка 4 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, valentinakholad@mail.ru.

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

УДК 535.371

А. А. ЧАЙКОВСКАЯ

КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ AIS И ВЛИЯНИЕ pH НА ИХ СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ

Исследованы спектральные свойства наночастиц AIS при различных значениях pH. Показано, что смещение максимума флуоресценции наночастиц AIS связано с изменением локального электрического поля, вызванного ионами в растворах с различным значением pH, расположенными у поверхности квантовых точек. В рамках этой модели показано, что данные квантовые точки AIS могут использоваться как флуоресцентные нанозонды для определения локального значения pH.

Квантовые точки (КТ) являются перспективными материалами в медицине, биологии, оптике, оптоэлектронике, микроэлектронике, полиграфии, энергетике. КТ обладают уникальными оптическими и химическими характеристиками, что отличает их от обычных органических флуоресцирующих красителей [1].

Они обладают широким спектром поглощения, что позволяет возбуждать нанокристаллы разных цветов одним источником излучения. КТ имеют узкий и симметричный пик флуоресценции, что обеспечивает чистый цвет. Также для них характерна высокая яркость флуоресценции (квантовый выход $>50\%$) и высокая

фотостабильность. Свойства КТ, в том числе цвет излучения, зависит от размеров, формы и материалов, из которых они изготовлены [2].

Данные свойства делают их идеальными флуорофорами для сверхчувствительного, многоцветного детектирования биологических объектов и для медицинской диагностики с одновременной регистрацией нескольких параметров [3].

На поверхность квантовых точек можно наносить биологические маркеры, фрагменты нуклеиновых кислот (например, ДНК или РНК), которые реагируют на определенный тип клеток и это позволяет использовать их для контрастирования в биологических исследованиях и диагностике рака на ранних стадиях [4].

Целью данной работы являлось проведение сравнительного анализа параметров флуоресцентного свечения КТ AIS (PEI) в растворах с различными значениями pH.

Квантовые точки AIS (PEI), которые использовались в работе, любезно предоставлены Э. И. Зенькевичем (БНТУ, г. Минск). Эти КТ характеризуются спектром флуоресценции с максимумом интенсивности на длине волны 660 нм. В качестве поверхностно-активного вещества, покрывающего монослоем данные КТ, выступает полиэтиленмин (PEI) или полиазиридин. PEI – это полимер с повторяющимся звеном, состоящим из аминогруппы и двух алифатических атомов углерода CH_2CH_2 .

Спектры поглощения растворов КТ AIS (PEI) регистрировали на спектрофотометре Specord 200 (Carl Zeiss, Германия). Спектры стационарной флуоресценции растворов измеряли на спектрофлуориметре CM 2203 (Solar, Беларусь).

Для определения влияния кислотности среды на спектры поглощения и флуоресценции квантовых точек AIS (PEI) измеряли спектры поглощения и испускания при различных pH растворов. Спектры испускания измерялись при возбуждении излучением с длиной волны 473 нм. Спектры поглощения, измеренные при различных pH раствора, представлены на рисунке 1, из которого можно видеть, что спектр поглощения КТ чувствителен к изменению pH раствора.

Для того, чтобы более четко определить длины волн, соответствующих максимуму спектра поглощения КТ AIS (PEI) в водных растворах с различными значениями pH, были получены вторые производные спектров поглощения КТ AIS (PEI) (рисунок 2).

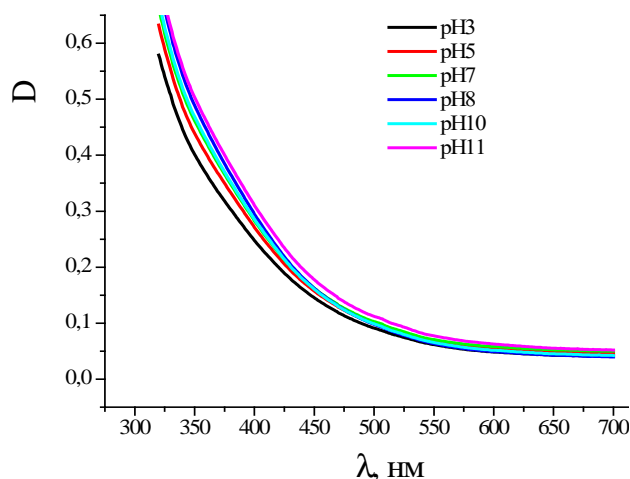


Рисунок 1 – Спектры поглощения КТ AIS (PEI) в водных растворах с различными значениями pH

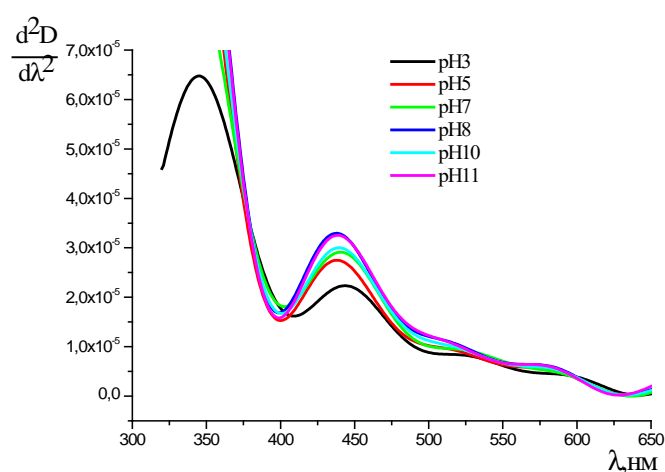


Рисунок 2 – Вторые производные спектров поглощения КТ AIS (PEI) в водных растворах с различными значениями pH

Следует отметить, что интенсивность и положение максимума спектра флуоресценции КТ AIS (PEI) также чувствительны к pH раствора (рисунок 3). При этом ширина спектра флуоресценции не изменяется при изменении pH раствора. Максимум спектра флуоресценции КТ AIS (PEI) при pH = 6 расположен на длине волны 660 нм.

При увеличении pH от 3 до 8 наблюдается возрастание интенсивности флуоресценции КТ AIS (PEI) и смещение максимума спектра в коротковолновую область с 700 нм до 660 нм. При увеличении pH от 8 до 11 происходит тушение флуоресценции (рисунок 3) и смещение максимума спектра в длинноволновую область от 660 нм до 655 нм. Подобное поведение спектра флуоресценции при изменении pH раствора может быть объяснено изменением аминогруппы, покрывающего монослоем квантовые точки. Длинноволновой сдвиг спектра флуоресценции можно связать с присутствием у поверхности КТ катионов водорода H^+ . Аналогичная ситуация наблюдается с КТ AIS/ZnS, покрытые GSH [5].

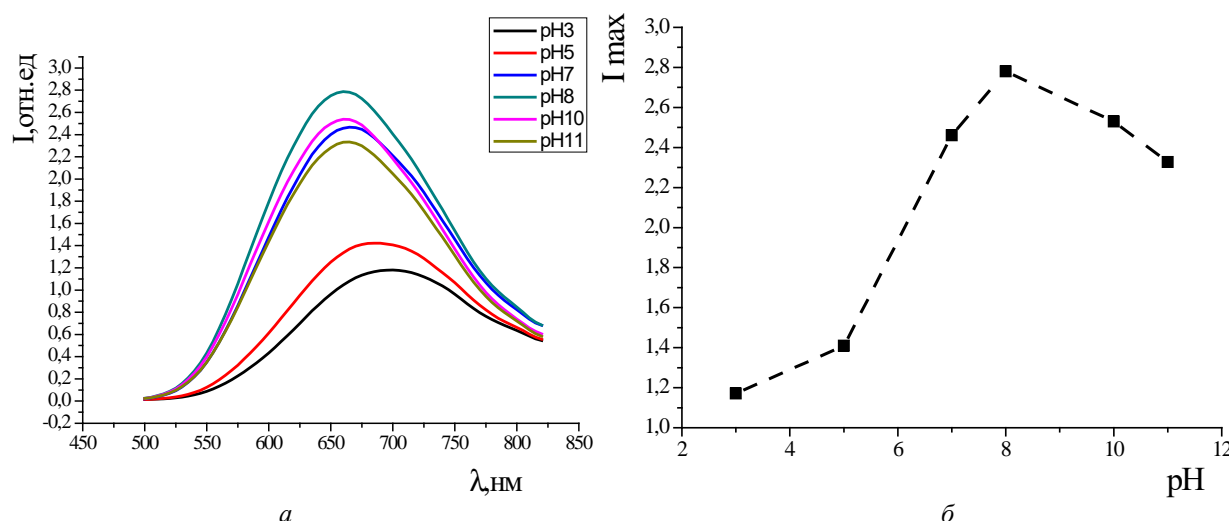


Рисунок 3 – Спектры флуоресценции КТ AIS (PEI) в водном растворе с различными значениями pH (а) и зависимость интенсивности флуоресценции в максимуме спектра от значения pH раствора (б)

Список литературы

1. Semiconductor and metal nanocrystals: Synthesis and Electronic and Optical Properties / ed. by V. Klimov. – New York : Marcel Dekker Inc., 2004. – 485 p.
2. Hines, M. A. Synthesis and characterization of strongly luminescing ZnS-capped CdSe nanocrystals / M. A. Hines, P. Guyot-Sionnest // J. Phys. Chem. B. – 1996. – Vol. 100. – P. 468.
3. Олейников, В. А. Квантовые точки в биологии и медицине / В. А. Олейников // Природа. – 2010. – Т. 3. – С. 22.
4. Multicolor quantum dots for molecular diagnostics of cancer / A. M. Smith [et al.] // Exp. Rev. Mol. Diagn. – 2006. – Vol. 6. – P. 231–244.
5. Чайковская, А. А. Влияние pH на спектральные свойства полупроводниковых квантовых точек AIS/ZnS в водных растворах / А. А. Чайковская // Физика конденсированного состояния [Электронный ресурс] : материалы XXIX междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 22–23 апр. 2021 г.) / ГрГУ им. Янки Купалы, физ.-техн. фак. ; редкол.: Г. А. Гачко (гл. ред.), Н. Г. Валько (зам. гл. ред.) [и др.]. – С. 127–130.

The spectral properties of AIS (PEI) nanoparticles at different pH values are studied. It is shown that the shift of the maximum fluorescence of AIS (PEI) nanoparticles is associated with a change in the local electric field caused by ions in solutions with different pH values located near the surface of quantum dots. Within the framework of this model, it is shown that these AIS (PEI) quantum dots can be used as fluorescent nanoprobe to determine the local pH value.

Чайковская Анастасия Александровна, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nastenachajkovskay@mail.ru.

Научный руководитель – *Мотевич Инна Григорьевна*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, i.motovich@grsu.by.

УДК 530.1

А. В. ЧЕРНЯВСКАЯ, И. А. ДОРОЖКО

ТВЁРДЫЕ ЧАСТИЦЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Современная авиационная и космическая техника ориентируется на сверхзвуковые и гиперзвуковые скорости. Физические процессы, происходящие при таких скоростях, обладают рядом особенностей, которые необходимо учитывать при разработке новой техники. В первую очередь эти процессы происходят при высоких температурах, сопровождаются химическими реакциями и фазовыми превращениями, усложняются гидродинамические и тепловые условия. Проблемы, связанные с этими процессами, далеки от разрешения и требуют тщательного изучения. В работе рассмотрена математическая модель и алгоритм решения задачи движения гетерогенного сверхзвукового потока.

Наилучший способ изучения – это экспериментальное исследование. Однако зависимость исследуемых процессов от огромного числа факторов и трудоемкость практической реализации ограничивает этот вид исследований. В дополнение к экспериментальным исследованиям применяются методы математического

моделирования. Однако и на этом пути имеются существенные трудности – необходимо решение сложных нелинейных гидродинамических уравнений, требующее больших вычислительных ресурсов. В целом, рассматриваемая проблема является, несомненно, актуальной, и ее решение следует находить как экспериментальными, так и модельными методами.

В камере сгорания после впрыска топлива в воздушный поток происходит воспламенение воздушно-топливной смеси за счет теплоты торможения потока в воздухозаборнике. Для устойчивости пламени могут использоваться пирофорные добавки. Это мелкодисперсные частицы (капли), сгорающие в потоке и повышающие его температуру. В качестве пирофорных добавок используют гидриды кремния $\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}$. Низкомолекулярные гидриды кремния (Si_2H_6 , $\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}$) и (Si_3H_8) являются соответственно газами и жидкостью. Высокомолекулярные гидриды кремния являются твердыми веществами. Введение добавок в поток технологически может быть осуществлено разными способами, при этом в гипергазовый поток могут инкапсулироваться газ, капли жидкости либо твердые частицы. Пирофорные добавки чаще всего поступают в поток вместе с топливом. Указанные факторы требуют тщательного изучения динамики частиц в потоке. Эти проблемы интенсивно начали изучаться в последние десятилетия [1]. В основном это модельные методы, основанные на решении для потока уравнений Навье-Стокса и уравнения Эйлера для частиц [2]. Наличие частиц в потоке, их механическое взаимодействие с несущим потоком, ударные волны, химические реакции, фазовые превращения, сингулярности концентрации частиц [2–4] показывают, что в общем случае рассматриваемая задача не разрешима. Требуется упрощение модели течения. Чаще всего рассматривают два потока: невязкий – в центральной части и вязкий – в пограничном слое. Кроме того, будем считать, что столкновение частиц отсутствует, а также отсутствуют химические реакции. Поскольку частицы в потоке сгорают, последнее допущение может показаться слишком сильным. Тем не менее на данном этапе нас будут интересовать только гидродинамические параметры и тепловое взаимодействие частиц и несущего потока.

Рассматривается свободная сверхзвуковая струя с вводимыми частицами (рис. 1).

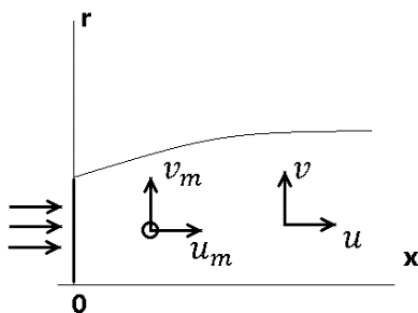


Рисунок 1 – Схема потока

Невязкое нестационарное сжимаемое течение несущего потока может быть описано уравнениями Эйлера в форме:

$$U_t + F(U)_x + G(U)_r = IG \quad (1)$$

где

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \end{bmatrix}; F(U) = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ u(\rho E + p) \end{bmatrix}; G(U) = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho v^2 + p \\ \rho uv \\ v(\rho E + p) \end{bmatrix}$$

$$IG = \begin{bmatrix} -j\rho v/r \\ -j\rho uv/r - F_{px} \\ -j\rho v^2/r - F_{pr} \\ v(\rho E + p) \\ -jv(\rho E + p)/r - UpF_{px} - vpF_{pr} - Qp \end{bmatrix}$$

Для описания движения частиц используем метод Лангранжа [2], тогда уравнения движения примут вид:

$$\begin{aligned}\frac{dx_m}{dt} &= u_m; \quad \frac{\partial r_m}{\partial t} = v_m \\ \frac{du_m}{dt} &= \frac{3\rho}{4\rho_m D_m} (C_D)_m (u - u_m) |U - U_m| \\ \frac{dv_m}{dt} &= \frac{3\rho}{4\rho_m D_m} (C_D)_m (v - v_m) |U - U_m| \quad (2) \\ \frac{dT_m}{dt} &= \frac{6\mu c_m Nu_m}{c_p \rho_m Re D_{pt}^2} (C_D)_m (T - T_m)\end{aligned}$$

x_m, y_m — относительные координаты частицы;

$U(x, y), U_m(x_m, y_m)$ — векторы скорости несущего потока и частицы;

ρ, ρ_m — плотности несущего потока и частицы;

c, c_m — теплоемкости несущего потока и частицы;

D_m — диаметр частицы;

$Re = \frac{vR\rho}{\mu}$ — число Рейнольдса для потока;

μ — коэффициент динамической вязкости несущего потока;

$(C_D)_m$ — коэффициента сопротивления частицы.

Индекс « m » относится к частице.

Дополнительно к уравнениям движения представим выражения для коэффициента лобового сопротивления частицы и критерия Нуссельта для описания теплового взаимодействия частицы и несущего потока [3]:

1. Коэффициент сопротивления.

$$(C_D)_m = \frac{24}{Re_m} \left(1 + \frac{Re_m^{2/3}}{6} \right), Re_m < 1000; (C_D)_m = 0.44, Re_m > 1000;$$

2. Число Нуссельта для частицы.

$$Nu_m = 2 + 0.6 Re_m^{1/2} Pr^{1/3}$$

3. Число Рейнольдса для частицы.

$$Re_m = \rho D_{pt} |U - U_m| Re / \mu$$

Частицы вводятся в начальном сечении. При этом их распределение может задаваться случайным либо регулярным. На границе 0-х частицы упруго отражаются, на границе x исчезают и на границе с внешней средой скорости принимают нулевые значения.

Алгоритм движения частиц можно составить на основе системы (2).

1. Координаты:

$$x_{i,k+1} = x_{i,k} + \Delta t u_{i,k}$$

$$r_{i,k+1} = r_{i,k} + v_{i,k} \Delta t$$

2. Компоненты силы и компоненты ускорений частицы:

$$F_{mx} = \frac{\pi}{8V_{ij}} \rho \frac{D_m^2}{D_p} (C_D)_m |u - u_m| (u - u_m)$$

$$F_{mr} = \frac{\pi}{8V_{ij}} \rho \frac{D_p^2}{D_m} (C_D)_m |v - v_m| (v - v_m)$$

$$a_{mx} = \frac{3\rho}{4\rho_{pt} D_{pt}} (C_D)_m (u - u_m) |u - u_m|$$

$$a_{mr} = \frac{3\rho}{4\rho_m D_m} (C_D)_m |v - v_m| (v - v_m)$$

3. Компоненты скорости:

$$u_{i,k+1} = u_{i,k} + a_{mx} \Delta t$$

$$v_{i,k+1} = v_{i,k} + a_{mr} \Delta t$$

4. Тепловой поток от частицы и ее температура:

$$Q_{i,k+1} = \frac{\pi \mu}{V_{ij} Re Pr} \rho \frac{D_m}{D_p} Nu_m (T - T_m)$$

$$T_{i,k+1} = T_{i,k} + \Delta t 6 \mu \frac{c_p}{c_p D_p^2} \rho \frac{D_p}{D_p} Nu_m (T_k - T_{i,k})$$

Представленный алгоритм, реализующий движение частиц в сверхзвуковой свободной струе, позволяет установить влияние параметров частиц (диаметр, масса, концентрация) на конфигурацию струи и распределение в ней частиц.

Список литературы

1. Inertial-particle dynamics in turbulent flows: caustics, concentration fluctuations and random uncorrelated motion / K. Gustavsson [et al.] // New Journal of Physics. – 2012. – № 14.
2. Ветлуцкий, В. Н. Исследование потока газа с твердыми частицами в сверхзвуковом сопле / В. Н. Ветлуцкий, В. Л. Ганимедов, М. И. Мучная // Прикладная механика и техническая физика. – 2005. – Т. 46, № 6. – С. 65–77.
3. Raj Mani Yadav. Effect of magnetic field on two phase gas particle flow / Raj Mani Yadav, Amit Kumar Ray, Rajesh Yadav and Mohd. Sadiq Khan // JETIR. – October 2020. – Vol. 7, iss. 10.

4. Стасенко, А. В. Физические аспекты многофазных течений в аэродинамике, летательной технике и авиационной экологии / А. В. Стасенко // ТРУДЫ МФТИ. – 2011. – Т. 3, № 4.

Model methods investigated the effective thermal conductivity of composites based on polyethylene and polycarbonate with a filler of silicon carbide. The work was carried out with the help of computer modeling using numerical models, experimental studies. The following tasks were solved: – on the basis of the experiment and modeling, the thermal resistance of the interphase layer was evaluated, algorithms for obtaining the distribution of the filler in the matrix and a numerical model of the effective thermal conductivity of the composite were developed, factors affecting the effective thermal conductivity of composite systems depending on the concentration of the filler in the matrix were determined: the distribution of the filler in the matrix.

Чернявская Алеся Владимировна, магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, aonezhina1@gmail.com.

Дорошко Илья Анатольевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, ilyadorozhko02@gmail.com.

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nik@grsu.by.

УДК 535.33;544.174.2/3

В. С. ШЕРШЕНЬ, А. С. СТАРУХИН, Т. А. ПАВИЧ,
А. А. РОМАНЕНКО, Ю. А. КАЛЬВИНКОВСКАЯ, С. Б. БУШУК

ВОДОРАСТВОРИМЫЕ КОМПЛЕКСЫ ПОРФИРИНОВ С ЦИКЛОСАХАРИДАМИ

Синтезированы и исследованы водорастворимые комплексы на основе *мезо*-замещенных порфиринов с активными функциональными карбокси- и аминогруппами, которые использованы для химического связывания с циклосахаридами. Методами люминесцентной микроскопии исследована проникающая способность синтезированных комплексов в клеточную структуру фибробластоподобных клеток.

Работы по созданию эффективных фотосенсибилизаторов для применения в фотодинамической терапии, а также для использования в антибактериальной фотодеструкции широко ведутся во многих научных центрах. Фотосенсибилизаторы третьего поколения должны быть растворимы в воде и в физиологических растворах. Представляются актуальными разработки по созданию новых супрамолекулярных комплексов на основе фотосенсибилизаторов, химически связанными с различными полисахаридами в качестве лигандов [1, 2].

В настоящем сообщении приведены структуры новых синтезированных водорастворимых комплексов на основе различных фотосенсибилизаторов, химически связанных с циклосахаридами, а также результаты исследований их спектральных и фотофизических параметров. Указанные комплексы должны состоять из трех составных частей: 1) фотосенсибилизаторы; 2) связующие мостики (линкеры или спейсеры); 3) циклосахаридами различного состава. С использованием хромофоров с активными функциональными карбокси- и аминогруппами в *мезо*-положениях порфириновых макроциклов выполнен синтез химически связанных водорастворимых комплексов с α -циклодекстрином. На рисунке 1 представлены структурные формулы синтезированных соединений.

Выполнены синтезы для двух супрамолекулярных комплексов (структуры 1а и 1б). Соединение H_2 -TAPP-(L-Ala-Su-CD)₄ (структура 1а на рисунке 1) состоит из хромофора H_2 -25,10,15,20- (тетра-4-аминофенил) порфирина (H_2 -TAPP), α -циклодекстрина (CD) и линкера 1 – L-Аланин с янтарной кислотой (Su). Комплекс H_2 -TCPP-(EDODEA-Su-CD)₄, (структура 1б на рисунке 1) состоит из 5,10,15,20-(тетра-4-карбоксифенил) порфирина (H_2 -TCPP), α -циклодекстрина (CD) и линкера 2 – 2,2'-(этилендиокси) диэтиламина (EDODEA) с янтарной кислотой (Su).

Синтезированные комплексы H_2 -TCPP-(ESuCD)₄ и H_2 -TAPP-(LASuCD)₄ показали высокую растворимость в воде (H₂O), а также в диметилсульфоксиде (ДМСО). На рисунке 2 приведены спектры поглощения и флуоресценции комплекса H_2 -TCPP-(ESuCD)₄ в H₂O. Положения полос в спектрах поглощения и флуоресценции комплексов на рисунке 2 практически не отличаются от спектров H_2 -TCPP, которые были зарегистрированы для этого соединения в различных органических растворителях.

Созданные комплексы обладают высокоинтенсивной люминесценцией, что позволяет использовать их для исследований скоростей накопления соединений живыми клетками методами конфокальной люминесцентной спектроскопии. В качестве культуры клеток были выбраны клетки почечной ткани обезьяны BGM в буферной среде (водный раствор с определенной pH = 7,4).

Спектры поглощения регистрировались на спектрофотометре Shimadzu UV-3600 Plus. С использованием спектрофлуориметра FluoroLog 3 фирмы HORIBA Scientific, США были измерены спектры флуоресценции, а также спектры возбуждения флуоресценции, скорректированные на мощность фотовозбуждения и спектральную

чувствительность системы регистрации. Для ряда синтезированных соединений были измерены квантовые выходы флуоресценции и времена жизни флуоресценции. Квантовые выходы флуоресценции были определены относительным методом по отношению к известному значению квантового выхода стандарта. В качестве стандарта было использовано значение квантового выхода флуоресценции Zn-TPP в толуоле [3]. Для измерения времени жизни флуоресценции использовалась методика время-коррелированного счета одиночных фотонов с применением TCSPC-контроллера DeltaHub (HORIBA Scientific). Источниками возбуждения фотолюминесценции выступали импульсный лазерный диод LDH-D-C-375 (PicoQuant, Германия) с длиной волны 376 нм и минимальной длительностью импульса 59 пс, а также импульсный светодиод PLS-400 (PicoQuant, Германия) с длиной волны 406 нм и минимальной длительностью импульса 780 пс.

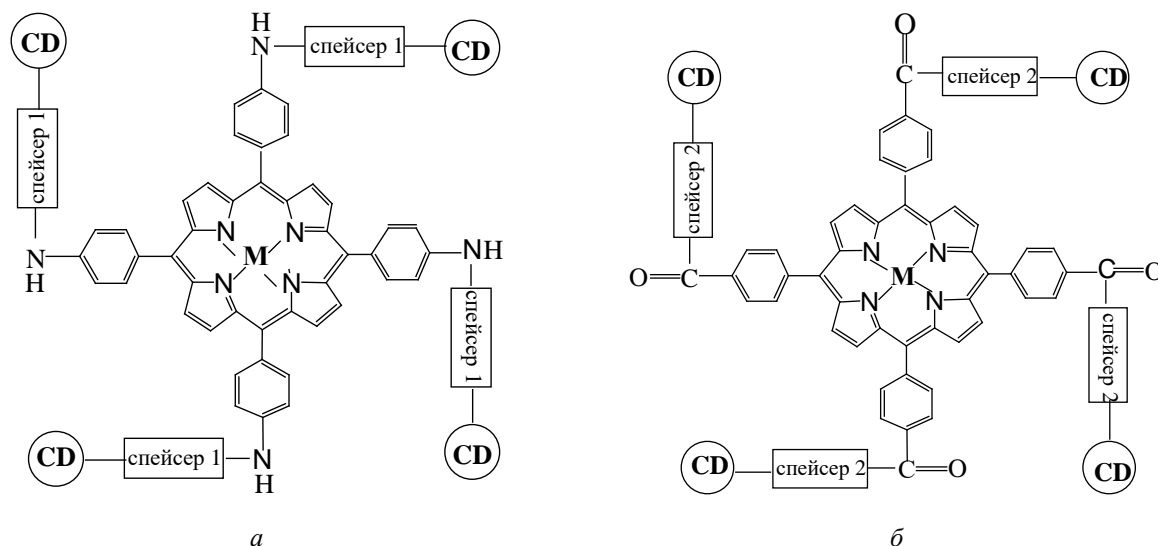


Рисунок 1 – Структурные формулы химически связанных комплексов M -TAPP-(L-Ala-Su-CD) $_4$ – а; M -TCPP-(EDODEA-Su-CD) $_4$ – б

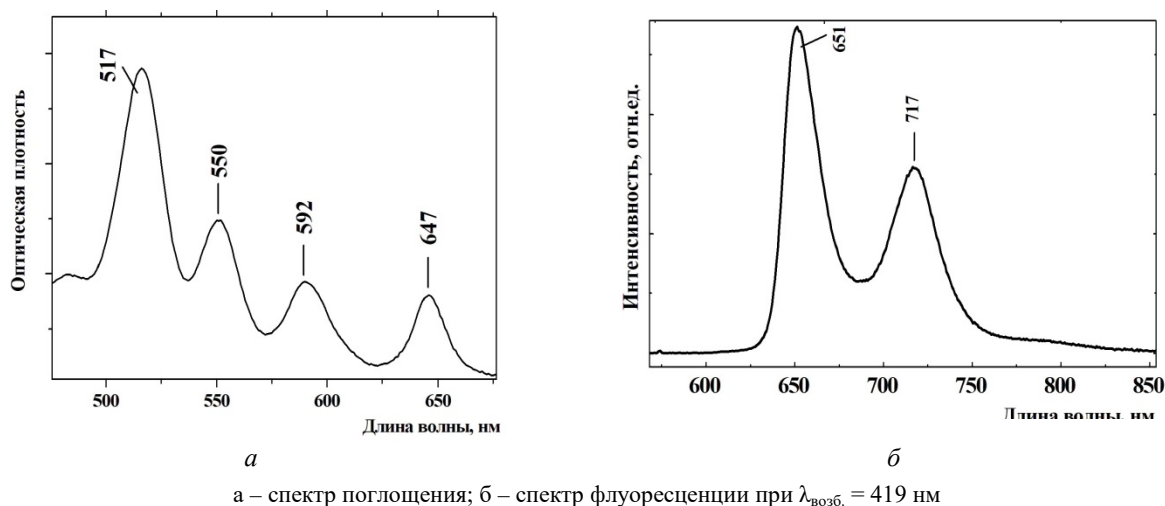


Рисунок 2 – Спектры поглощения (а) и флуоресценции (б) H_2 -TCPP-(EDODEA-Su-CD) $_4$ в воде при 293 К

Исследование скоростей накопления синтезированных комплексов живыми клетками выполнялось методами флуоресцентной и лазерной сканирующей микроскопии. Использовался лазерный сканирующий микроскоп Zeiss LSM 510 NLO на базе инвертированного исследовательского флуоресцентного микроскопа Zeiss Axiovert 200 M при возбуждении образцов излучением аргонового лазера. Были использованы объективы Zeiss Plan-Neofluar 40x/0.75 и Plan-Neofluar 20x/0.5 без иммерсии. Контроль состояния образца проводился посредством микроскопии светлого поля. Возбуждение флуоресценции проводилось излучением непрерывного аргонового лазера на длине волны 514 нм в режиме сканирования лазерного возбуждения. Регистрация конфокальных изображений производилась в спектральном диапазоне 590–800 нм с размером фрейма 512×512

пикселей и временем накопления сигнала 3,2 мкс/пиксель. Параметры, при которых были получены все приведенные флуоресцентные изображения, были идентичны.

Образец представлял из себя суспензию живых клеток в буферном растворе при температуре 37⁰ С с концентрацией 100 000 ед./мл. Раствор содержался в камерах для микроскопии NUNC Lab-Tek с восемью ячейками и дном из покровного стекла с толщиной 0,17мм. В одиночную ячейку помещалось 0,2 мл суспензии клеток и 10 мкл водного раствора синтезированного комплекса с концентрацией 1×10⁻⁵М. Регистрация изображений производилась спустя 2 часа после инкубирования клеток с синтезированными комплексами и спустя 24 часа. Образцы содержались при температуре 37⁰ °С в инкубаторе с 5 %-м содержанием CO₂.

На начальной стадии образцы демонстрировали слабую флуоресценцию суспензии чистых клеток, которая обусловлена эндогенными хромофорами, при отсутствии в камере супрамолекулярных комплексов. После двух часов инкубирования водорастворимых синтезированных комплексов были получены флуоресцентные изображения при возбуждении образца лазерным излучением ($\lambda_{\text{возб.}} = 514 \text{ нм}$). Через такой временной интервал мембраны клеток слабо окрашивались, а межклеточная среда демонстрировала фоновую флуоресценцию.

Через 24 часа после инкубации наблюдается эффективное вхождение комплексов в клетки и легко детектируется интенсивная флуоресценция на мембранах и внутри клеток. На рисунке 3 также представлены флуоресцентные изображения клеток при поглощении макрофагами двух синтезированных комплексов. Сравнение изображений для одиночных клеток на рисунке 3 демонстрирует существенно более интенсивное свечение при использовании комплекса H₂-TAPP-(LASuCD)₄ по сравнению с применением в качестве фотосенсибилизатора комплекса H₂-TCPP-(ESuCD)₄ при аналогичных условиях эксперимента.

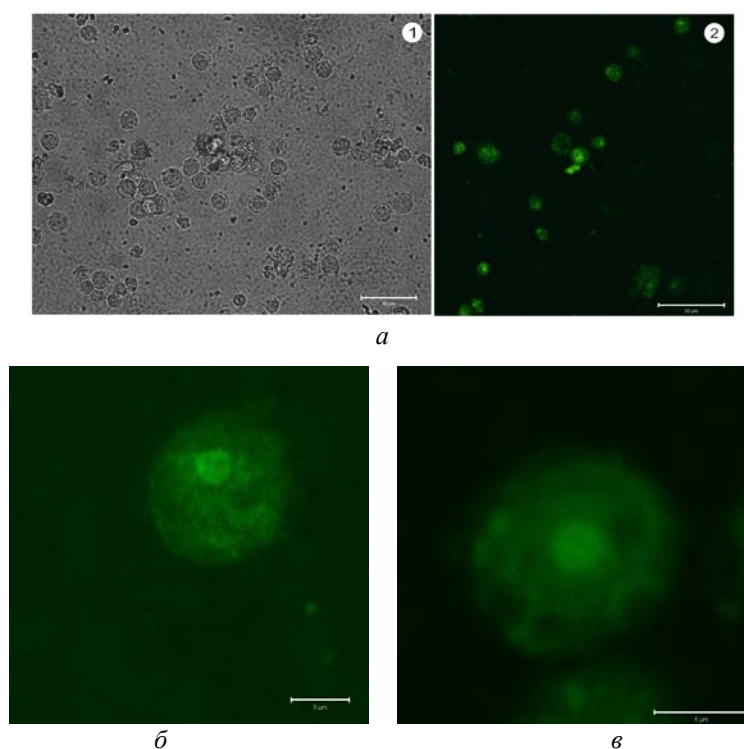


Рисунок 3 – Изображения образцов с клетками спустя 24 часа после инкубации: при использовании комплекса H₂-TCPP-(ESuCD)₄ (а): 1 – в проходящем свете и 2 – флуоресценция клеток; Флуоресценция одиночной живой клетки BGM спустя 24 часа после инкубации при использовании комплекса H₂-TCPP-(ESuCD)₄ (б) и при использовании комплекса H₂-TAPP-(LASuCD)₄ (в)

Применение методов лазерной сканирующей конфокальной микроскопии наглядно демонстрирует высокую проникающую способность синтезированных комплексов на основе порфириновых макроциклов и полисахаридов в клеточную структуру фибробластоподобных клеток в культуре (клетки почки зеленой мартышки BGM). Созданные комплексы обеспечивают значительное усиление внутриклеточной флуоресценции, что свидетельствует об эффективном связывании фотоактивного комплекса с клетками³.

³Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (белорусско-румынский проект № Ф20РА-013).

Список литературы

1. Some activities of PorphyrChem illustrated by the applications of porphyrinoids in PDT, PIT and PDI / B. Habermeyer [et al.] // Photochem. Photobiol. Sci. – 2018. – Vol. 17. – P. 1675–1690.
2. A next-generation bifunctional photosensitizer with improved water-solubility for photodynamic therapy and diagnosis / H. Nishie [et al.] // Oncotarget. – 2016. – Vol. 7, № 45. – P. 74259–74268.
3. Comprehensive review of photophysical parameters (ϵ , Φ_f , τ_s) of tetraphenylporphyrin (H_2TPP) and zinc tetraphenylporphyrin ($ZnTPP$) – Critical benchmark molecules in photochemistry and photosynthesis / M. Taniguchia [et al.] // Journal of Photochemistry and Photobiology C. – 2021. – Vol. 46, No 3. – P. 100401.

Water-soluble complexes of *meso*-substituted porphyrins with active functional carboxy- and amino- groups which chemically conjugated with cyclosaccharides have been synthesized and studied. The penetrating abilities of the synthesized complexes into the cellular structure of fibroblast-like cells were studied by the methods of luminescence microscopy.

Шершень Виталий Сергеевич, аспирант, младший научный сотрудник Института физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, vitaliy.sergeich@mail.ru.

Старухин Александр Степанович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, astar@ifanbel.bas-net.by, starukhin@mail.ru.

Павич Татьяна Александровна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, pavich@ifanbel.bas-net.by.

Романенко Андрей Алексеевич, научный сотрудник Института физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, a.romanenka@ifanbel.bas-net.by.

Кальвинковская Юлия Анатольевна, научный сотрудник Института физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, juliet@ifanbel.bas-net.by.

Бушук Сергей Борисович, заведующий лабораторией ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Республика Беларусь, bushuk@oelt.basnet.by.

Научный руководитель – *Старухин Александр Степанович*, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, astar@ifanbel.bas-net.by, starukhin@mail.ru.

УДК 546.62;542.93

В. М. ШИЛЬКО

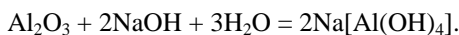
АКТИВАЦИЯ АЛЮМИНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ СПЛАВА АЛЮМИНИЙ – ВИСМУТ

Проведен эксперимент по получению водорода на основе сплава фольги Al легированного Bi, а также проведен анализ микроструктуры данной фольги.

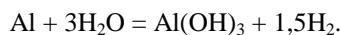
Запасы газа, угля, нефти, которые укрепились как основные источники топлива, конечны. Человечеству требуется находить другие такие же по эффективности, или даже лучше, источники топлива. Одной из таких альтернатив является водород. Это отличная замена нефти и углю с точки зрения экологии, а также экономики. Запасу водорода на Земле сложно найти границы. Замена всех традиционных видов топлива на водород не составит труда, но основной проблемой в наше время является его получение и хранение. Уже появилось достаточно способов генерации водорода при помощи угля, метана, электролиза, биомассы, а также металлов в реакции с водой. Большинство таких способов неэффективно из-за требуемого соблюдения определенных условий. В данной работе представлен метод получения водорода из сплава Al-Bi, а также некоторые другие методы на основе Al.

Одним из способов получения водорода на основе сплава алюминия является легирование этого сплава галатами, а именно Al-Ga-Ii-Sn. Реакционная способность сплавов Al-Ga и Al-Ga-In-Sn с водой исследуется как средство использования химической потенциальной энергии Al для расщепления воды для производства H_2 . Al в массе этих сплавов вступает в гетерогенную реакцию с водой с образованием H_2 и α -Al(OH) $_3$ (байерит) [1].

Существует концепция получения водорода, которая основана на окислении алюминия водными растворами щелочи. Из-за образования оксидной пленки на поверхности алюминия его высокая активность «запечатывается», появляется химическая инертность, что позволяет проводить с ним различные манипуляции. Чтобы использовать алюминий для получения водорода, нужно затратить время и реагенты для растворения пленки. Это можно сделать как кислыми, так и щелочными средами. В последних процесс растворения пленки занимает меньше времени. Уравнение реакции растворения имеет следующий вид [2]:



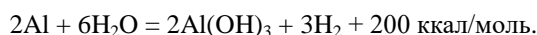
После удаления Al_2O_3 с поверхности алюминия протекает реакция, в результате которой образуется гидроксид алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$ [2]:



Гидроксид алюминия препятствует взаимодействию алюминия с водой. Для устранения этой проблемы вводится щелочная среда. После чего водород окисляется по одной из трех реакций с образованием оксида, бемита или байерита [2].

Еще одним способом получения водорода при взаимодействии воды с алюминием является легирование алюминия висмутом или свинцом [3].

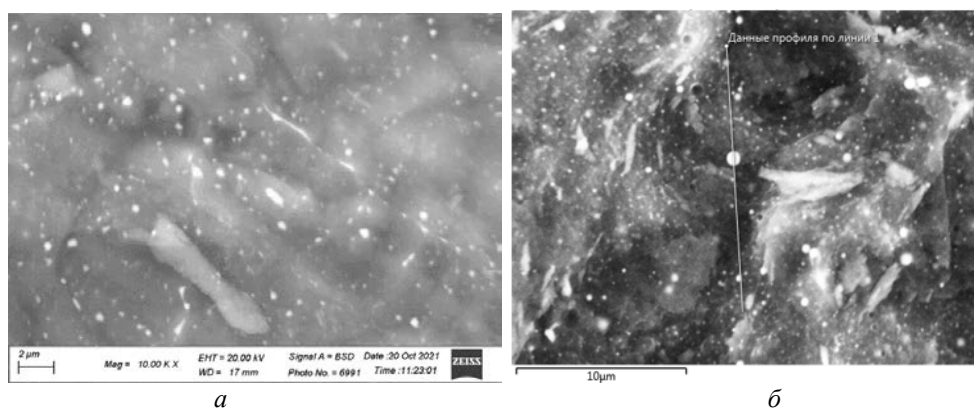
Добавки висмута и свинца приводят к искажению структуры алюминия, возникновению в ней напряжений, которые в свою очередь приводят к возникновению микродефектов в сопряженной оксидной пленке. Т. е. напряжения в кристаллической структуре алюминия приводят к появлению в хрупкой оксидной пленке микротрещин, через которые вода поступает к обнаженной поверхности алюминия с образованием водорода и гидроокиси по реакции [3]:



Для получения водорода в данной работе был взят сплав алюминия, содержащий 0,3 мас. % железа, который был легирован висмутом до 20 %. Висмут был выбран из-за его дешевой стоимости по отношению к галлию и индию, а также условий протекания реакции данного сплава по сравнению с галлием и индием, которым недостаточно комнатных условий. Вместо висмута можно было взять свинец, но этот металл обладает токсичными свойствами.

Данный сплав был получен в печи при 700 °С. После из данного сплава изготавливалась фольга методом высокоскоростной кристаллизации из жидкой фазы. После помещения в воду фольги через 1–3 минуты при температуре 20–25 °С начинает происходить реакция с бурным выделением водорода. Реакция длится несколько часов до полного окисления алюминия, после которой остается серовато-белый порошок (оксид алюминия), а также частицы висмута, которые можно отделить от оксида алюминия и использовать повторно.

Данный сплав в данной работе был исследован при помощи растрового электронного микроскопа LEO 1455 VP для исследования его микроструктуры. Микроскоп имеет приставку для определения химического состава фольги.



а – электронное изображение № 1 на стороне (А); б – электронное изображение № 2 на стороне (В)

Рисунок 1 – Изображение снимков микроструктуры сплава быстрозатвердевшей фольги Al–Bi

На рис. 1 наблюдаются белые участки, которые соответствуют висмуту, а черный фон – алюминию. Большинство таких пятен имеют маленький размер. На рис. 2а можно заметить в центре, что висмут вырисовывает прерывистые линии, залегающие в границах зерен. Но в основном он во всем сплаве распространен неоднородно.

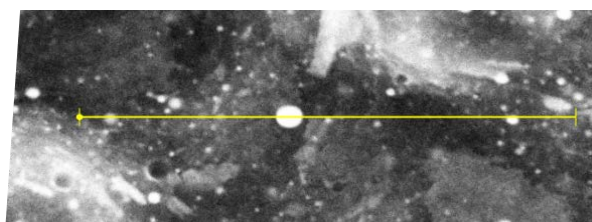


Рисунок 2 – Увеличенное изображение линии из рис. 1б

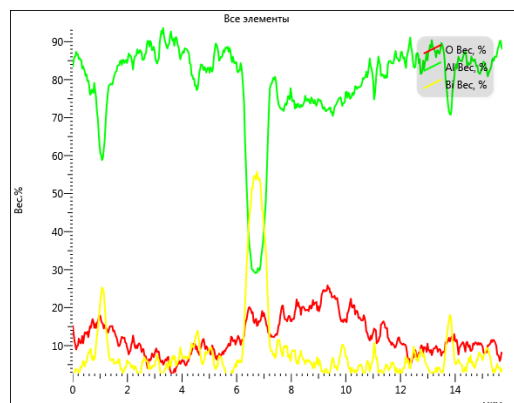


Рисунок 3 – Спектрограмма, определяющая распределение элементов

Спектрограмма (рис. 3) показывает, что вдоль линии сканирования преобладающую часть занимает алюминий. Наличие кислорода дает понять, что алюминий окисляется. Висмут на данной прямой чуть меньше, чем оксида алюминия.

Исходя из анализа структуры рис. 1а в таблице 1 численно подтверждается, размеры и занимаемое пространство в сплаве у висмута достаточно мало и на основе малого его количества в сплаве происходит выделение водорода. Определение параметров макроструктуры сплава Al–Bi при помощи метода стереометрического анализа, по которому были вычислены значения среднего размера фаз, объемной доли фаз, а также удельной поверхности фаз, представлено на изображении микроструктуры (рис. 1а).

Таблица 1 – Результаты измерений параметров микроструктуры висмута (рис. 1а)

Количество выделений висмута	138
Средний размер выделений	0,25 мкм
Объемная доля выделений висмута	0,064
Удельная поверхность межфазной границы	0,037 мкм ⁻¹

Диаграмма состояния сплава системы Al–Bi соответствует диаграмме состояний с монотектическим равновесием [4]. В расплавленном состоянии компоненты сплава находятся в одном состоянии жидкости. При понижении температуры происходит разделение расплава на две жидкости Ж₁ и Ж₂. При распаде жидкости Ж₁ происходит монотектическое превращение, при котором образуется твердый раствор алюминия, содержащий малое количество висмута. При дальнейшем понижении температуры жидкость Ж₂ испытывает эвтектическое превращение с образованием более крупных выделений висмута [4].

Список литературы

1. Алюминиевый сплав для генерирования водорода из воды / С. П. Мунтян [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2009. – № 4. – С. 108–112.
2. Чудотворова, Е. О. Оценка возможности применения алюминия для получения водородного топлива / Е. О. Чудотворова, А. С. Пугачук // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 3. – С. 42–48.
3. Патент РФ № 2356830С2, 27.05. 2009 : Способ получения водорода / К. Н. Кошкин, В. В. Семенов, Г. В. Серопян, К. Х. Урусов.
4. Петров, Д. А. Двойные и тройные системы / Д. А. Петров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1986. – 256 с.

In this paper, an experiment was carried out to obtain hydrogen based on an alloy of Al-doped Bi foil, as well as an analysis of the microstructure of this foil.

Шилько Виктор Марьянович, студент 4 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, shilko62@gmail.com.

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

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

УДК 53.04

З. А. АТАМУРАТОВА

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕГРАДАЦИИ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СТРЕССОМ, В МОП ТРАНЗИСТОРАХ ПО ПОВЕДЕНИЮ БОКОВОЙ ЁМКОСТИ

Посредством моделирования рассматривается влияние различных распределений оксидного ловушечного заряда на вольт-фарадную характеристику боковых переходов исток-подложка и сток-подложка наноразмерного полевого транзистора с изолированным затвором (МОПТ). Рассматриваются распределения, соответствующие различным режимам электрического стресса. Результаты моделирования показывают, что максимальное значение барьерной емкости боковых переходов зависит от положения максимума распределения встроенного оксидного заряда вдоль канала. Зависимость отношения максимумов емкостей переходов исток-подложка и сток-подложка от положения максимума распределения встроенного заряда может быть использована для оценки распределения оксидного ловушечного заряда, инжектированного в оксидный слой при различных режимах электрического стресса.

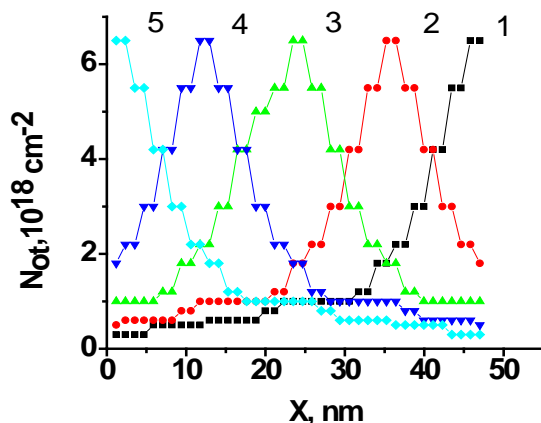
При функционировании транзисторов металл-оксид-полупроводник (МОПТ) различные деградационные эффекты могут повлиять на параметры и характеристики этих приборов [1]. При длительном функционировании под действием электрического стресса может иметь место деградация, связанная с инжекцией и захватом горячих носителей в подзатворном оксидном слое, а также на границе раздела оксид-полупроводник МОПТ. Различные режимы электрического стресса могут приводить к различным распределениям инжектированного и захваченного заряда. Оксидный ловушечный заряд так же, как и граничный ловушечный заряд приводит к нежелательным изменениям параметров и характеристик транзистора. Следовательно, одной из важных проблем для МОП транзисторной электроники является исследование продольного (вдоль канала) распределения инжектированного заряда и развитие сравнительно простых и экспрессных методов определения и оценки этого распределения.

В рассматриваемой работе моделированием исследуется возможность использования метода боковой емкости для оценки бокового распределения (вдоль канала) инжектированных и захваченных горячих носителей в подзатворном оксидном слое наноразмерного планарного МОП транзистора.

3D моделирование проводилось с использованием программы TCAD Sentaurus. C-V зависимость моделировалась с использованием метода слабого переменного сигнала в смешанной моде (small AC signal method) [2]. Анализ проводился при частоте 10^6 Hz при каждом шаге постоянного смещения источника напряжения V_s или V_d подаваемого на исток или сток соответственно. При определении порогового напряжения использовалась диффузионно-дрейфовая модель транспорта с квантовой коррективкой density gradient. В использованной модели подвижности учитывалось влияние нормального поля, зависимость от уровня легирования, а также насыщение скорости носителей при высоких полях.

При моделировании рассматривался планарный МОП транзистор с такими же параметрами, как и в экспериментальной работе, выбранный для калибровки модели [3]. Длина и ширина поликремниевых затворов транзистора составляли 47 нм. Толщина подзатворного SiO_2 слоя равнялась 4.46 nm. Концентрация легирования подложки мышьяком (As) составляет 10^{17} cm^{-3} , исток и сток легированы бором до максимальной концентрации 10^{19} cm^{-3} . Кроме распределения 1 (рис. 1), для сравнения, рассматривались также и другие распределения встроенного заряда, полученные смещением максимума распределения вдоль канала от стока к истоку (рис. 1, распределения 2–5). Такие распределения могут наблюдаться при различных режимах электрического стресса или их комбинациях.

Были смоделированы вольт-фарадные характеристики для барьерной емкости боковых переходов исток-подложка C_{sbt} и сток-подложка C_{dbs} . Барьерная емкость во всем рассмотренном диапазоне обратных смещений являются отрицательными для обоих боковых переходов. Проявление отрицательной емкости переходов при моделировании методом слабого переменного сигнала может быть объяснено немонотонным поведением производной по времени переходного тока при воздействии слабого импульса напряжения.



X – расстояние от истока в направлении стока. Распределение 1 соответствует типичному распределению при ИГН

Рисунок 1 – Рассмотренные при моделировании распределения концентрации инжектированного заряда, встроенного в оксидный слой вдоль канала от истока в направлении стока

Результаты моделирования показывают, что C-V зависимости барьерных емкостей C_{dbt} и C_{sbt} переходов сток-подложка и исток-подложка, соответственно, заметно зависят от формы распределения встроенного заряда при малых приложенных напряжениях (рис. 2). Такое же поведение барьерной емкости боковых переходов наблюдается и в экспериментальной работе [4]. В этой работе также наблюдается изменение емкости боковых переходов при встраивании неоднородно распределенного вдоль канала оксидного заряда, при малых обратных напряжениях. Рассматривался планарный транзистор с длинным каналом (11 мкм), а неоднородность встроенного оксидного заряда достигалась радиационно-полевым воздействием на МОПТ.

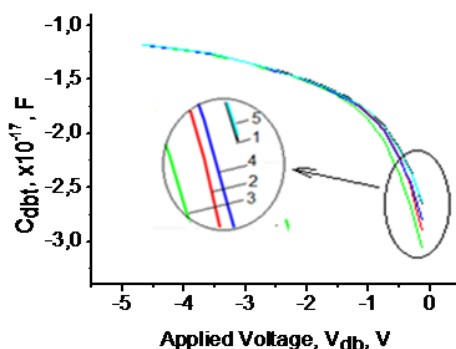


Рисунок 2 – Типичная C-V зависимость для барьерной ёмкости перехода сток–подложка при различных формах распределения инжектированного заряда, показанных на рис. 1

C-V зависимость моделировалась как для перехода сток-подложка, так и для перехода исток-подложка. Зависимость барьерных емкостей C_{dbt} и C_{sbt} при обратном смещении 10 мВ от положения максимума распределения встроенного заряда вдоль канала от стока к истоку показана на рис. 3. Видно, что эти зависимости имеют минимум при расположении максимума распределения в середине канала. Немонотонное поведение зависимостей является результатом соответствующего влияния оксидного ловушечного заряда на ширину обедненного слоя d боковых переходов.

Такое поведение боковой емкости может быть использовано для оценки распределения инжектированного и встроенного оксидного заряда и, следовательно, для идентификации деградационного эффекта, вызванного инжекцией заряда в оксидный слой. Для экспериментальной реализации этой возможности может быть использована зависимость отношения барьерных емкостей боковых переходов исток-база и сток-база C_{sbt}/C_{dbt} от положения максимума распределения, измеренных при малых обратных напряжениях. На рисунке 4 показана эта зависимость, полученная моделированием при приложенном напряжении на переходе 10 мВ. Полученная зависимость позволяет оценить положение максимума амплитуды распределения вдоль канала. В случае локализации амплитуды распределения в истоковой стороне от середины канала $C_{sbt}/C_{dbt} > 1$, а в случае локализации в стоковой половине $C_{sbt}/C_{dbt} < 1$. Значение отношения $C_{sbt}/C_{dbt} = 1$ соответствует положению амплитуды распределения в середине канала.

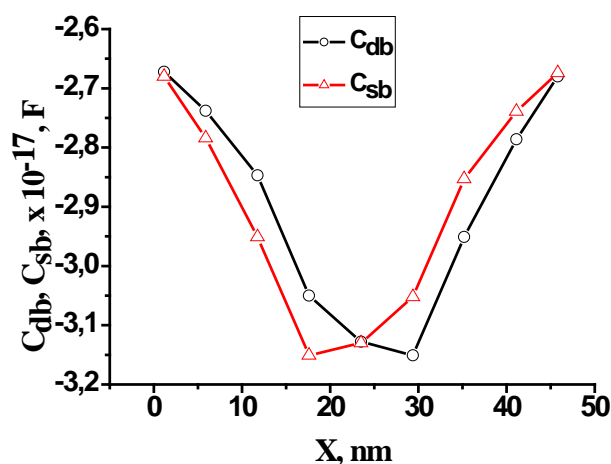


Рисунок 3 – Зависимость барьерных ёмкостей C_{db} и C_{sb} от положения максимума распределения вдоль канала от истока в направлении стока, при обратном напряжении на переходе 10 mV

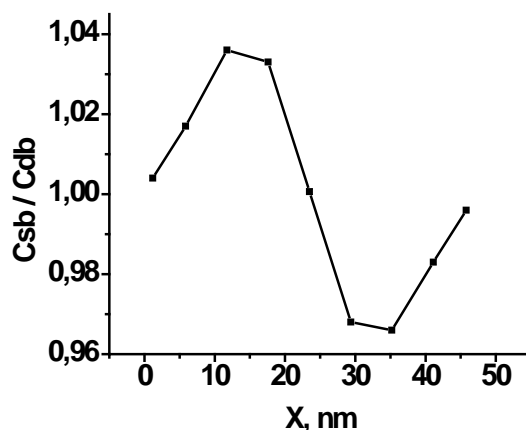


Рисунок 4 – Зависимость отношения C_{sb} / C_{db} от положения максимума распределения встроенного оксидного заряда

Список литературы

1. Sonal Agrawal, Anurag Srivastava, Gaurav Kaushal. Modeling of interface trap charges induced degradation in underlap DG and GAA MOSFETs. Microelectronics Reliability, Vol. 125, 114344, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114344>
2. www.synopsys.com.
3. Yeohyeok Yun, Ji-Hoon Seo, Young-Kyu Kwon, Bongkoo Kang. Effect of oxide-trapped charge on the anomalous drain avalanche hot carrier degradation of a SiO₂ dielectric nMOSFET. Microelectronics Reliability. Vol. 100–101, September 2019, 113449. doi: 10.1016/j.microrel.2019.113449
4. Atamuratov A. E., Yusupov A., and Adinaev K. Inorganic Materials, Vol. 37, No. 8, 2001, pp. 767–768. Translated from Neorganicheskie Materialy, Vol. 37, No. 8, 2001, pp. 910–912.

In this paper the impact of oxide trapped charge distributions to C-V dependence of lateral source-base and drain-base transitions of nanosized metal-oxide-semiconductor field effect transistor (MOSFET) is considered by simulation. It was considered the distributions appropriated to different type of the electrical stresses. Results of simulations show, that the transition capacitance of lateral junctions, at small applied voltages, depend on the position of maximum of the distributions of trapped charge along the channel. Ratio of transition capacitances of source-base and drain-base junctions, at small applied voltages, depend on position of distribution maximum. This dependence can be used for estimation the distribution of oxide trapped charge injected in oxide layer under different electrical stresses.

Атамуратова Зухра Атабековна, докторант Ургенчского государственного университета, Ургенч, Узбекистан, atamuratovazuhra03@gmail.com.

Научный руководитель – Юсупов Ахмед, доктор физико-математических наук, профессор, Ташкентский университет информационных технологий имени Аль Хорезми, Ташкент, Узбекистан, ayus@mail.ru.

А. АШИРОВ, Ф. БОБОЕВ, Ш. АСКАРОВА, Х. КАРИМОВ, Я. ЖАББАРОВА, У. КУТЛИЕВ

**МАЛОУГЛОВОЕ РАССЕЯНИЕ ИОНОВ Ne^+ С ПОВЕРХНОСТИ
ТОНКОЙ ПЛЁНКИ $\text{SiO}_2(001)<\bar{1}10>$**

Представлено малоугловое рассеяние ионов Ne^+ поверхности SiO_2 при малоугловом скольжении. Спектроскопия рассеяния низкоэнергетических ионов наряду с методами зондирования используется для изучения структуры многокомпонентных структур, т. е. пленки оксида кремния. Пленки оксида кремния можно осаждать как с легирующими добавками, так и без них. Тонкая пленка оксида кремния используется во многих отраслях. Угловое распределение ионов Ne^+ , рассчитанное методом приближения бинарных столкновений, показывает, что существует определённый угол падения ионов, который наблюдается как эффект ионной фокусировки. При анализе угловых распределений рассеянных ионов наблюдаются интенсивные пики, соответствующие перефокусирующимся и фокусирующимся ионам. Также была рассчитана глубина проникновения ионов на поверхностные полуканалы. Полученные результаты очень интересны для понимания структуры и явления поверхности полупроводников.

Одна из тенденций развития современных технологий состоит в возрастании роли поверхности и приповерхностных областей твердых тел. Это связано с тем, что зачастую такие области определяют физико-химические свойства материалов, представляющих наибольший интерес для микроэлектроники или материаловедения. Поэтому не случайно, что многие технологии, например, ионная имплантация, обработка поверхности импульсными электронными пучками и лазерами, приводят к модификации именно этих областей обрабатываемого материала. Такие области можно специально создавать посредством нанесения тонких слоев с помощью самых разных источников. В значительной степени практическая применимость указанных способов обработки материалов стала возможной благодаря развитию специальной группы методов анализа, среди которых важное место занимают методы, основанные на исследовании разнообразных излучений, которые возникают в объеме материала, облученного ускоренными ионами с энергией несколько килоэлектронвольт.

Рассеяние ионов низкой энергии (РИНЭ), также называемое спектроскопией рассеяния ионов (СРИ), является уникальным инструментом анализа поверхности, поскольку позволяет определить атомный состав внешнего атомного слоя. Чтобы в полной мере воспользоваться этой функцией, важно, чтобы результаты можно было оценить количественно, что может быть нетривиальной проблемой. Цель этого обзора состоит в том, чтобы описать соответствующие фундаментальные процессы в РИНЭ, указать случаи, когда количественная оценка является простой, а где нет, и получить руководящие принципы для экспериментальных условий, которые позволяют надежная количественная оценка. Атомы внешней поверхности доминируют во многих процессах, таких как адгезия, катализ, эмиссия электронов, рост и смачивание. Поэтому неудивительно, что 80–90 % задач, стоящих перед химической и электронной промышленностью, связаны с поверхностями. В случае плохой адгезии они относятся к поверхностям, которые обнажаются после разрушения. В то время как для других методов анализа поверхности анализ состава представляет собой среднее значение по нескольким или, как правило, даже по многим атомным слоям, для РИНЭ анализ является селективным для внешних атомов. В настоящее время РИНЭ одинаково легко применима как к проводникам, так и к изоляторам, к атомарно-плоским монокристаллам, а также к высокодисперсным аморфным материалам и при любой температуре образца. Таким образом, изучаются все виды материалов, включая металлы, полупроводники, керамику, органику и полимеры. Единственным серьезным ограничением является то, что, как и в случае с другими лучевыми методами при анализе поверхности, необходимо вакуум, что давление паров материала достаточно низкое, чтобы поддерживать вакуум. В дополнение к использованию упомянутой выше поверхностной чувствительности также можно получить подробную информацию о составе нескольких внешних нанометров [1, 2].

Этот неразрушающий анализ основан на использовании определенного свойства ионов (реионизация). Типичные применения этого особенностью являются ультратонкие слои (0–10 нм). Этот прогресс в сочетании с поверхностной селективностью расширило область применения приложений чрезвычайно широко.

Спектроскопия рассеяния низкоэнергетических ионов наряду с методами зондирования используется для изучения структуры многокомпонентных структур, т. е. пленки оксида кремния. Пленки оксида кремния можно осаждать как с легирующими добавками, так и без них. Тонкая пленка оксида кремния используется в качестве изолирующей пленки между многослойной металлизацией, в качестве маскирующей пленки в процессах диффузии и ионной имплантации, в качестве защитной пленки для защиты нелегированных областей от автолегирования при термоциклировании, а также для увеличения толщины диэлектрической подложки. Пленки оксида кремния, легированные фосфором, используются в качестве изолятора между металлическими слоями, в качестве пассивирующих покрытий на поверхности уже сформированных устройств и в качестве геттерирующих слоев. Иногда источниками диффузии служат оксиды, легированные фосфором, мышьяком или бором. Поэтому оксид кремния часто используется в солнечной энергетике. Основной целью данной работы является исследование структуры поверхности тонкой пленки SiO_2 методом рассеяния низкоэнергетических ионов.

Метод моделирования и расчёты. Отражение первичных ионов, падающих на поверхность твердого тела, результат взаимодействия их с атомами решетки. Для установления точной природы такого процесса следует построить квантово-механические волновые функции падающего иона и атомов кристаллической решетки и определить закона рассеяния решением волновых уравнений. Однако, как уже было отмечено в предыдущих главах, такие методы чрезвычайно затруднительны. В области низких энергий траектории сталкивающихся частиц определяются в первом приближении силами упругого взаимодействия атомов. Это кулоновские силы взаимодействия ядер и электронов атомов. Они действуют на атомных расстояниях между взаимодействующими частицами. Следовательно, для расчета траектории налетающего иона необходимо рассмотреть его взаимодействие с совокупностью атомов кристаллической решетки одновременно. Однако при не очень низких энергиях столкновения иона с атомом кристалла можно ограничиться рассмотрением изолированных парных столкновений частиц. Подтверждением тому, что атомы решетки свободны при столкновениях, т. е. ведут себя как атомы плотного газа, служат результаты исследования времени взаимодействия и энергии сталкивающихся частиц.

Для дальнейшего развития математического моделирования процесса рассеяния ионов средних и малых энергий в широком интервале углов падения и рассеяния нами использованы закономерности столкновения двух тяжелых частиц и рассмотрено рассеяние пучка ионов от поверхности монокристаллического образца на основе модели парных одно-, двух- и т. д. многократных соударений.

Предполагается, что частицы движутся между столкновениями вдоль прямых линий, которые являются асимптотами путей частицы в лабораторной системе координат. Неупругие потери полагаются равными сумме локальных и нелокальных потерь. Локальные потери определяют по формуле Кена-Робинсона [3]. Нелокальные потери энергии ассоциируются с непрерывными потерями энергии движущейся частицы и полагаются пропорциональными скорости частицы. Учет локальных и нелокальных потерь может быть произведен в любых соотношениях. Программа MARLOWE [4] позволяет также моделировать взаимодействие ионов с аморфными и поликристаллическими твердыми телами. Это осуществляется при помощи специальных процедур вращения монокристаллического блока, параметры которого являются входными данными программы. Так, чтобы моделировать отражение от мишени с хаотическим расположением атомов, кристаллическую мишень после каждого столкновения с бомбардирующей частицей поворачивают по случайному закону относительно кристаллической решетки.

В наших расчетах мы использовали программу, очень похожую на программу MARLOWE. И результаты, полученные нашей программой, согласуются с данными, полученными программой MARLOWE. Что касается потенциалов межатомного взаимодействия, то в основном при моделировании рассеяния ионов в твердых телах используют экранированные кулоновские потенциалы, иногда используют также эмпирические потенциалы, комбинированные потенциалы. В наших расчетах использовался потенциал Бирзака-Циглера-Литмарка [5].

Неупругие потери энергии предполагаются либо локальными, т. е. происходящими в каждом элементарном акте столкновения, либо непрерывными (нелокальными) вдоль траекторий движения частиц. Они были рассчитаны Кишиневским [6].

При моделировании рассматривался поверхностный полуканал, сформированный в направлениях $\text{SiO}_2(001)\langle 110 \rangle$. Поскольку атомы располагаются послойно, стенка полуканала состоит из атомов кислорода и кремния, расположенных послойно (рис. 1). Ширина и высота этого полуканала соответственно 2,53 Å и 4,22 Å.

На рисунке 2 представлено угловое распределение ионов Ne, рассеянных на $\text{SiO}_2(001)\langle 110 \rangle$ под углами падения $\psi = 9^\circ, 12^\circ$ и 15° с начальной энергией 1 кэВ.

Угловая зависимость показывает, что во всех случаях имеется интенсивный пик, относящийся к ионам, рассеянным по плоскости поверхности. Следует отметить, что наиболее интенсивный пик наблюдается при угле скольжения $\psi = 15^\circ$, пик при угле падения $\psi = 12^\circ$ по интенсивности меньше, чем $\psi = 9^\circ$. Это связано с тем, что угол падения $\psi = 9^\circ$ ближе к углу перефокусировки для этого полуканала. На угловой зависимости также видны малоинтенсивные пики, возникающие из-за кластеров при определенных углах рассеяния и относящиеся к сфокусированным ионам.

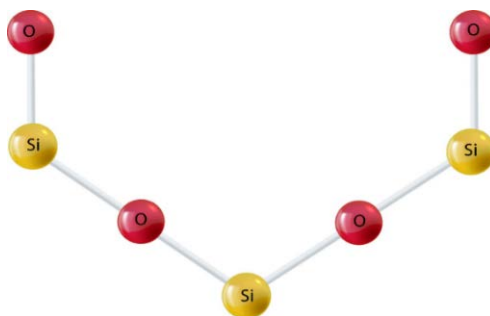


Рисунок 1 – Схематическое изображение полуканала на поверхности $\text{SiO}_2(001)\langle 110 \rangle$

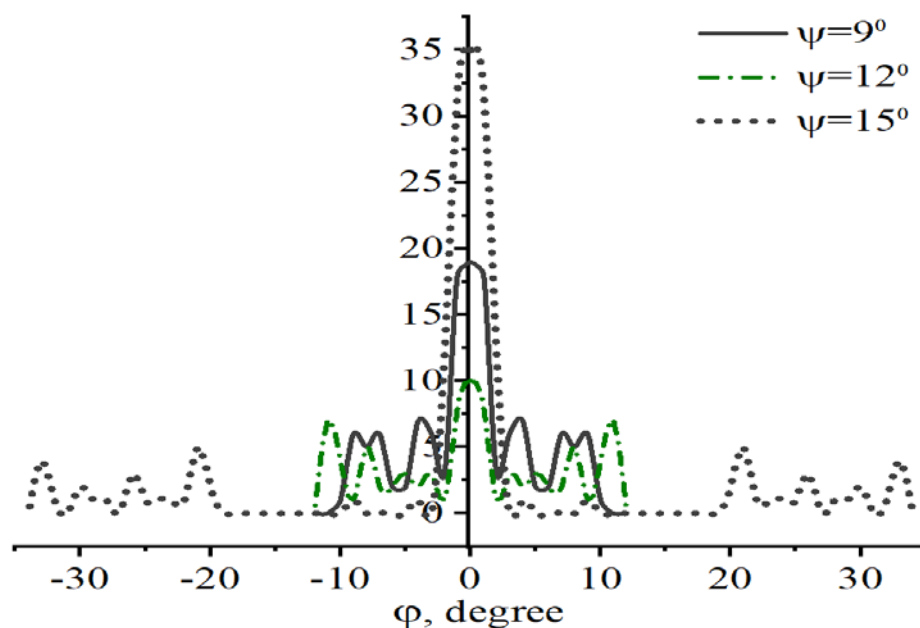


Рисунок 2 – Угловое распределение рассеянных ионов Ne^+ с поверхности $\text{SiO}_2(001)\langle 110 \rangle$ при значении начальной энергии 1000 эВ и $\psi = 9^\circ$ (линия), 12° (линия-точка) и 15° (точка) углах падения

Исследовано малоугловое рассеяние ионов Ne^+ от поверхности $\text{SiO}_2(001)\langle 110 \rangle$ с начальной энергией $E_0 = 1000$ эВ при углах падения $\psi = 9^\circ$, 12° и 15° . Зависимость точек рассеяния от точки прицеливания рассеянных ионов Ne^+ $\text{SiO}_2\langle 110 \rangle$ с энергией $E_0 = 1000$ эВ, что свидетельствует о возможности разделения групп ионов, рассеянных от поверхности и внутри полуканала. Определение точки рассеяния ионов позволяет изучить процесс ионной имплантации. Полученные результаты представляют интерес для изучения поверхностей полупроводников.

Список литературы

1. Parilis E. S., Kishinevsky L. M., Turaev N. Yu., Baklitzky B. E., Umarov F. F., Verleger V. Kh., Niznaya S., Bitensky I. S. Atomic collisions on solid surfaces. (North-Holland; Amsterdam). 1993, 664 p.
2. Mashkova, E. S. The Scattering of Medium-Energy Ions by Solid Surfaces / E. S. Mashkova, V. A. Molchanov. – M. : Atomizdat, 1980. – 265 p.
3. Interaction potentials for fast atoms in front of Al surfaces probed by rainbow scattering / P. Tiwald [et al.] // Physical Review. – 2010, B 82 : 125453.
4. Interatomic potentials from rainbow scattering of keV noble gas atoms under axial surface channeling / A. Schüller // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 2005. – № 230 (1–4) – P. 172–177.
5. Ziegler J. F., Biersack J. P., Littmark U. The stopping and range of ions in solids, 321 (NY : Pergamon Press, 1985).
6. Kishinevsky L. M. Izv. Acad. Nauk SSSR Ser. Fiz. 1962.26, P. 1410–1414.

Abstract. In this work, small-angle scattering of Ne^+ ions by the SiO_2 surface during small-angle glide is presented. Scattering spectroscopy of low-energy ions, along with probing methods, is used to study the structure of multicomponent structures, i.e. silicon oxide films. Silicon oxide films can be deposited both with and without dopants. Silica thin film is used in many industries. The angular distribution of Ne^+ ions, calculated by the binary collision approximation method, shows that there is a certain angle of incidence of ions, which causes the effect of ion focusing. When analyzing the angular distributions of scattered ions, intense peaks are observed corresponding to refocusing and focusing ions. The depth of penetration of ions into the surface half-channels was also calculated. The results obtained are very interesting for understanding the structure and surface phenomena of semiconductors.

Аширов Атабек Салиевич, аспирант, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, atabek.ashirovs@gmail.com.

Бобоев Фарход, магистрант, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, uchkunk@mail.ru.

АскарOVA Шахноза, магистрант, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, uchkunk@mail.ru.

Каримов Хурид, магистрант, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, uchkunk@mail.ru.

Жаббарова Янгилжон Жуманазаровна, магистрант, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан.

Кутлиев Учкун Отобоевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физики Ургенчского государственного университета, Ургенч, Узбекистан, uchkunk@mail.ru.

Научный руководитель – *Кутлиев Учкун Отобоевич*, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физики Ургенчского государственного университета, Ургенч, Узбекистан, uchkunk@mail.ru.

В. В. ВАШИНА

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ БИОИМПЕДАНСОМЕТРИИ

Изучение состава тела человека как новая отрасль медицины и биологии, использующая биофизические свойства различных тканей организма, выделилась в отдельное самостоятельное направление [1]. Целью исследования является разработка программного обеспечения для обработки данных биологических объектов, полученных методом биоимпедансометрии. Благодаря данному программному обеспечению, можно найти зависимости величин и в дальнейшем использовать его для улучшения диагностики методом биоимпедансометрии.

Биоимпедансный анализ – это контактный метод измерения электрической проводимости биологических тканей, дающий возможность оценки широкого спектра морфологических и физиологических параметров организма. В биоимпедансном анализе измеряется активное и реактивное сопротивление человека или его сегментов на различных частотах.

На основе полученных данных рассчитываются характеристики состава тела, такие как жировая, тощая, клеточная и скелетно-мышечная масса, объем и распределение воды в организме.

Биоимпедансный анализ помогает отслеживать состояние белкового, липидного и водного обмена организма, а также является недорогим методом. Применение методов биоимпедансного анализа помогает при оценке эффективности лечения больных ожирением, для оценки нарушений водного баланса, перераспределения жидкости в водных секторах организма и подбора лекарственных препаратов [2].

На современном этапе возникла необходимость обрабатывать данные полученные с помощью биоимпедансного анализа. Для обработки полученных данных используется корреляционный анализ и регрессионный анализ.

Корреляционный анализ – статистический метод изучения взаимосвязи между двумя и более случайными величинами. В качестве случайных величин в эмпирических исследованиях выступают значения переменных, измеряемые свойства исследуемых объектов наблюдения.

Регрессионный анализ – это метод изучения статистической взаимосвязи между одной зависимой количественной переменной от одной или нескольких независимых количественных переменных. Зависимая переменная в регрессионном анализе называется результирующей, а переменные факторы – предикторами или объясняющими переменными.

Взаимосвязь между средним значением результирующей переменной и средними значениями предикторов выражается в виде уравнения регрессии. Уравнение регрессии – математическая функция, которая подбирается на основе исходных статистических данных зависимой и объясняющих переменных.

Для упрощения обработки данных был создано программное обеспечение, которое было разработано благодаря среде разработки Visual Studio 2022 с использованием объектно-ориентированного языка программирования C#, сам интерфейс программного обеспечения был реализован с помощью Windows Forms C#, в котором использовались такие элементы управления, как Button, TextBox, Chart, DataGridView и другое.

При разработке программного обеспечения используется корреляционный и регрессионный анализ, с помощью данного программного обеспечения можно обнаружить зависимости величин.

В программном обеспечении есть возможность вести в таблицу данные или загрузить Excel file (воспользовавшись кнопкой upLoad Excel file), затем выбрать регрессию, и программа сможет нарисовать график, в зависимости от выбора регрессии (линейная, полиномиальная, гиперболическая, показательная, логарифмическая, экспоненциальная, степенная, синусоидальная); а также в программном обеспечении на экран выводится: коэффициент детерминации, коэффициент корреляции, уравнение регрессии.

Полученный график и результаты коэффициента детерминации, коэффициента корреляции, уравнения регрессии можно сохранить, воспользовавшись кнопкой Save. Для обработки данных использовались результаты, полученные методом биоимпедансометрии.

Разработанное программное обеспечение может быть применено на практике для определения многих физиологических характеристик с помощью биоимпедансного анализа.

Предлагаемый метод является простым и удобным в исполнении и может применяться в медицинской практике.

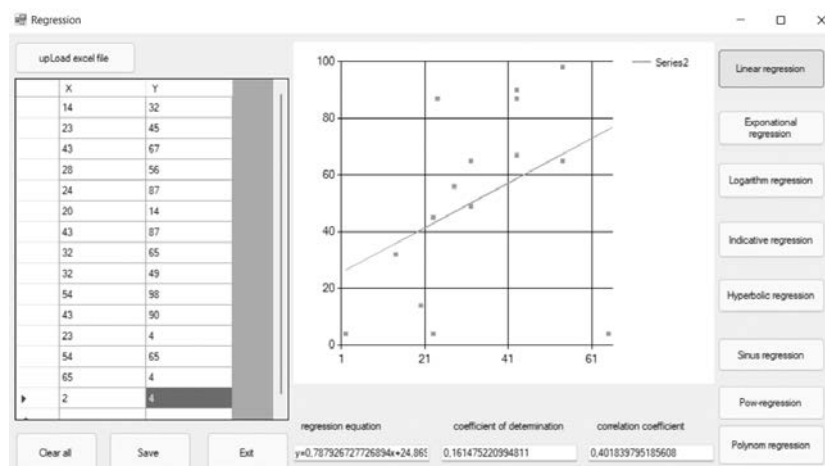


Рисунок 1 – Программное обеспечение для обработки данных биологических объектов, полученных методом биоимпедансометрии

Список литературы

1. Башун, Н. З. Методы исследования состава тела человека на современном этапе / Н. З. Башун, О. А. Жарнова, А. М. Жарнов // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 119–130.
2. Поклонский, Н. А. Основы импедансной спектроскопии композитов / Н. А. Поклонский, Н. И. Горбачук. – Минск : Изд-во БГУ, 2005. – 130 с.
3. Биоимпедансный анализ состава тела / Д. В. Николаев [и др.]. – М. : Наука, 2009. – 392 с.

The developed software can be applied in practice to determine the fluid content in the body using bioimpedance analysis. The proposed method is simple and convenient in execution and can be used in medical practice in the study of the degree of hydration of internal organs.

Вашина Виолетта Владимировна, студентка 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, violkamm4@gmail.com.

Научный руководитель – *Жарнова Ольга Александровна*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, zharik783@tut.by.

УДК 004.383.3

Н. А. ВОЛОРОВА, В. Я. АНИСИМОВ, А. П. ПРОТАСОВ, И. Д. СТАСЕЛЬКО, Т. Д. ПОЗНЯКОВ АРХИТЕКТУРА БЛОКА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ (ISP) НА БАЗЕ ПРОЦЕССОРА M1

Проведено исследование Image Signal Processor в процессоре Apple M1 на примере доступного датчика изображения на базе CMOS. В ходе тестирования данного датчика изображений с использованием языка C и предполагаемыми алгоритмами достигнут результат того, что тесты соответствуют стандартам обработчика изображений на процессоре M1.

Датчики изображения используются во многих типах устройств сбора изображений, таких как цифровые фотоаппараты, видеокамеры и камеры видеонаблюдения. В последнее время область их применения расширилась и теперь включает интеллектуальные устройства, а полученные изображения предназначены не только для хранения, но и для взаимодействия между человеком и компьютером. Для удовлетворения многих целей датчиков изображения роль улучшения изображения как никогда важна.

ISP (Image Signal Processor) – процессор сигналов изображения является одним из неоптических устройств, которые повышают качество захваченных необработанных изображений. Данный процессор использует несколько алгоритмов обработки изображений, включая шумоподавление и баланс белого, а также другие алгоритмы улучшения изображения. Специальная аппаратная реализация обеспечивает высокое качество изображения и производительность обработки за счет масштабируемости и гибкости.

Функции ISP могут быть реализованы и на выделенном оборудовании, процессоре общего назначения или процессоре параллельных вычислений. Реализация ISP на процессоре общего назначения может быть подходящей не только для высокого качества изображения сложных алгоритмов, но также для

масштабируемости и гибкости звука. Однако стоимость реализации последнего высока из-за большого объема вычислений, и необходима высокопроизводительная платформа, такая как настольный ПК.

ISP (Image Signal Processor) – это небольшой встроенный в чип M1 процессор для обработки изображений, полученных из камеры устройства.

Процессор состоит из своего локального ЦП, который может запускать локальные алгоритмы обработки изображений, такие как АвтоФокус. Также в ISP присутствуют встроенные модули для выполнения профессиональных процессов для изображений, интерфейсы передачи изображений. Для обработки изображений различного качества и цвета, в ISP используются различные алгоритмы и принципы, такие как GWA. GWA (предположение серого мира) – предположение, что цвет в каждом канале датчика в среднем равен серому по всему изображению (полю зрения). Оно является одним из наиболее распространенных предположений, сделанных при попытке оценить спектральное распределение источника света. Обычно каждый канал датчика усредняется независимо. BF – двусторонний фильтр, AC – автоматический контраст, а LTI – переходное улучшение яркости.

Цветные изображения, которые поступают через датчик изображения, могут показывать цвета, отличные от тех, которые видны невооруженным глазом. Чтобы исправить это, используют процесс баланса белого (WB). Алгоритм WB GWA предполагает, что средний цвет изображения – серый. Аналогично, алгоритм Retinex (WR) с белыми пятнами предполагает, что пиксель максимальной интенсивности является белым. Поскольку эти предположения могут быть статистически неверными, итеративный баланс белого (IWB) итеративно уточняет белые пиксели, в то время как голосование по освещению проверяет условия освещения.

$$C_{WB}(x, y) = C(x, y) \left(\sum_x \sum_y R + \sum_x \sum_y G + \sum_x \sum_y B \right) / 3 \sum_x \sum_y C$$

где C представляет собой один из R, G и B, а CWB представляет значение цвета после балансировки белого. После процесса GWA, Demosaicing – это алгоритм для создания полных каналов RGB, который достигается за счет интерполяции цветных пикселей, которые отсутствуют в изображениях, снятых датчиком. Существует множество алгоритмов, включая эвристические методы, подходы в частотной области, подходы к реконструкции. На рисунке 1 показан поток Adaptive Homogeneity-Directed Demosaicing, используемый в ISP чипа M1.

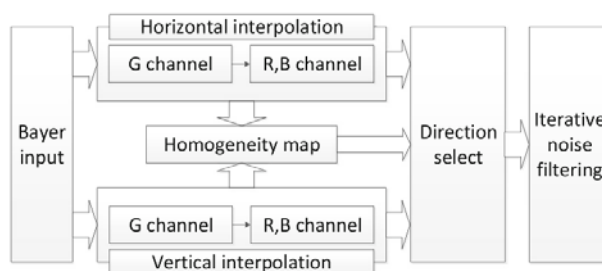


Рисунок 1 – Поток Adaptive Homogeneity-Directed Demosaicing

После demosaicing блок цветокоррекции находит особенности цвета и исправляет цветовые артефакты. Уравнение цветокоррекции может быть вычислено в сочетании с последующим преобразованием цветового пространства. Поскольку уравнение цветокоррекции может быть объединено с уравнением преобразования цветового пространства, промежуточный процесс для сохранения значений результата цветокоррекции может быть удален, тем самым сокращая цикл доступа к памяти.

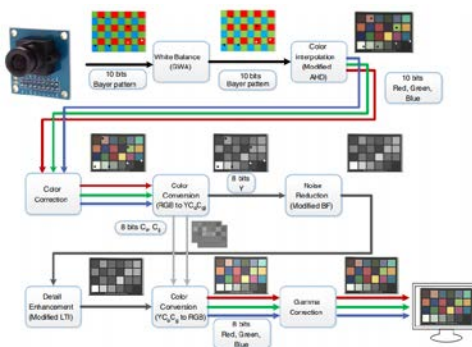


Рисунок 2 – Предположительная цепочка ISP

Чтобы проверить производительность предложенной полной цепочки ISP, качество полученных изображений должно сначала пройти коммерчески доступный тест качества изображения.

Эксперименты проводились с использованием датчика изображения CMOS со спецификацией, показанной на рисунке 3. На рисунках 5 и 7 показаны части тестовых шаблонов.

Specification	
Active array size	2592 × 1944
Output formats	10-bit RGB raw
Lens size	1/4 in.
Input clock frequency	6 to 27 MHz
Max S/N ratio	36 dB

Рисунок 3 – Тестовые шаблоны



Рисунок 4 – Результат, полученный на ISP процессора M1

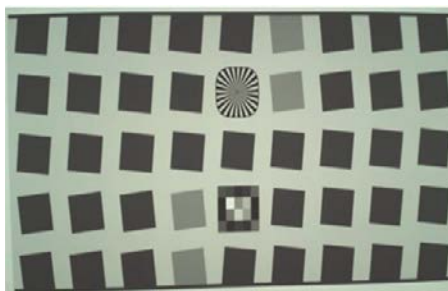


Рисунок 5 – Тестовый шаблон качества изображения на доступном датчике изображений на базе CMOS



Рисунок 6 – Результат, полученный на ISP процессора M1



Рисунок 7 – Тестовый образец цветопередачи на доступном датчике изображений на базе CMOS

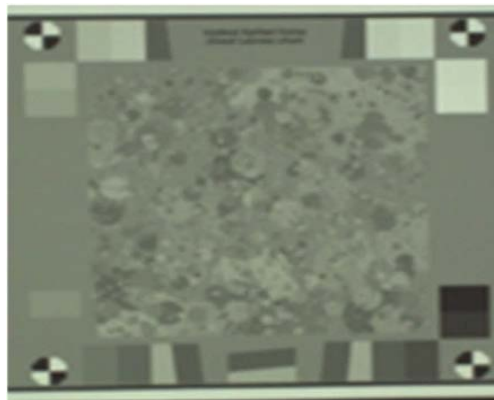


Рисунок 8 – Тестовый образец остроты текстуры на доступном датчике изображений на базе CMOS

В данной научной работе было проведено исследование Image Signal Processor в процессоре Apple M1 на примере доступного датчика изображения на базе CMOS. В ходе тестирования данного датчика изображений с использованием языка C и предполагаемыми алгоритмами достигнут результат того, что тесты соответствуют стандартам обработчика изображений на процессоре M1. Целью дальнейших изучений будет являться полная отладка ISP на аппаратном уровне, дальнейшее тестирование процессора в других условиях и с другим программным и аппаратным обеспечением для выявления возможных ошибок и уязвимостей, а также для предположения оптимизации и энергоэффективности ISP.

Список литературы

1. Mayhand Handley, M1 Explainer. – 2021. – № 1. – С. 8–27.
2. Patrick Hansen, Alexey Vilkin, Yury Khrustalev, James Imber, Dumidu Talagala, David Hanwell. The Role of Image Signal Processing in Efficient Deep Learning Vision Systems. – 2020. – № 1. – С. 2–12.
3. Maxime Pelcat – Models of Architecture for DSP Systems. – 2020. – № 1. – С. 5–10.

We validated the approach by comparing training results from simulated raw images against raw images captured in-lab. We found that processing images with an ISP improves accuracy by an average of 7.0 % for a broad set of MobileNet CNNs. Our results indicate that the ISP has a more significant impact, and our results on the larger ResNet-50 and are consistent with this trend.

Волорова Наталья Алексеевна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информатики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь volorva@bsuir.by.

Анисимов Владимир Яковлевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, anissimov@bsuir.by.

Протасов Александр Петрович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, mister.protasov@gmail.com.

Стаселько Иван Дмитриевич, студент 3 курса Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, staselko2002@gmail.com.

Позняков Тимур Денисович, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, agressor98@gmail.com.

Научные руководители – *Волорова Наталья Алексеевна*, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информатики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь volorva@bsuir.by.

Анисимов Владимир Яковлевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, anissimov@bsuir.by.

УДК 629.036,629.78

Н. Л. ГРЕВЦОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭМИТТЕРОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ НАНОСПУТНИКОВ

Произведено моделирование электрофизических характеристик эмиттеров электростатического микродвигателя для использования в составе наноспутников и проведен анализ соответствующих результатов. Изучено влияние геометрических параметров созданной модели эмиттера микродвигателя на распределение напряженности и скалярного потенциала в системе эмиттер-тянущий электрод. Установлено оптимальное сочетание геометрических параметров основных состав-

ляющих элементов эмиттера: высота щели – 20 мкм, расстояние до тянущего электрода – 3 мм, высота пролетного отверстия тянущего электрода – 3 мм. Отмечается, что при указанных значениях геометрических параметров обеспечивается достижение высокой напряженности электрического поля (около 1 МВ/м), а также наиболее достигается рациональная технологичность изготовления эмиттеров электростатического микродвигателя с учетом возможных допусков.

Принцип действия электростатических микродвигателей для наноспутников основан на распылении и ускорении электрическим полем рабочего тела – топлива, обычно находящегося в жидкой фазе и представляющего собой легкоплавкий металл (цезий, индий) или ионную жидкость [1–3]. В зависимости от режима работы двигателя в результате распыления топлива образуется факел топлива, состоящий либо из отдельных частиц (ионов), либо из заряженных капель жидкости [3, 4]. По этому признаку электростатические микродвигатели разделяют на электростатические с полевой эмиссией (field-emission electric propulsion – FEED) и коллоидные [3]. Такое деление является условным, так как режим работы двигателя может быть, в том числе и смешанным, а принцип их действия абсолютно идентичен. Основной частью электростатического микродвигателя для наноспутников является эжектор, состоящий из эмиттера и кольцевого тянущего электрода-экстрактора, между которыми создается электрическое поле, диспергирующее и ускоряющее частицы жидкого топлива [3]. Распыление топлива в эмиттере электростатического микродвигателя происходит из мениска, образованного электропроводящей жидкостью, форма которого задается приложенным электрическим полем [5]. Режим работы эмиттера электростатического микродвигателя и его характеристики определяются конструкцией эжектора, геометрическими размерами элементов, типом используемого топлива, величиной электрического поля. Для того, чтобы выбранная конструкция эжектора микродвигателя для наноспутников обеспечивала выполнение требуемых характеристик, из-за сложности процессов, протекающих в эмиттере, целесообразно проведение численного моделирования с использованием ЭВМ и современных средств разработки.

Конечная цель моделирования – принятие решения, которое должно быть выработано на основе анализа полученных результатов. Обычно ожидаемый результат уже известен из результатов патентно-информационного списка, поэтому сравнить полученный в результате моделирования и ожидаемый результаты возможно до проведения натурного эксперимента. В случае совпадения результатов можно принять решение о разработке конструкции эмиттера электростатического микродвигателя для наноспутников с конструкционными параметрами, реализованными в модели. Основой для выработки решения служат результаты тестирования и экспериментов. В случае, если результаты не соответствуют целям поставленной задачи, имели место ошибки на предыдущих этапах: слишком упрощенное построение информационной модели, неудачный выбор метода или среды моделирования, нарушение технологических приемов при построении модели. Если такие ошибки выявлены, то требуется корректировка модели, то есть возврат к одному из предыдущих этапов. Процесс повторяется до тех пор, пока результаты численного эксперимента не будут отвечать целям моделирования.

При анализе результатов моделирования принципиальное значение имеет характер модели: стохастический или детерминированный. Стохастический подход позволяет учитывать неопределенность в оптимизационных моделях. Детерминированный подход состоит в том, что объект моделирования признается строго детерминированным. Это означает, что каждое действие и изменение вызывает строго определенный результат. Всеми случайными факторами и возмущениями пренебрегают. Обработанные результаты моделирования будут использованы для принятия решения о работоспособности эмиттера электростатического микродвигателя для наноспутников, для выбора лучшего проектного варианта, а также для оптимизации прочих элементов электростатического микродвигателя. Решение о работоспособности принимается по тому, выходят или не выходят характеристики эмиттера электростатического микродвигателя за установленные границы при любых допустимых изменениях параметров. При выборе лучшего варианта из всех работоспособных вариантов выбирается тот, у которого значение критерия эффективности максимально. Наиболее ресурсоемким и сложным является процесс оптимизации элементов электростатического микродвигателя: требуется найти такие сочетания значений переменных параметров элементов электростатического микродвигателя или рабочей нагрузки из множества допустимых, которые максимизируют значение критерия эффективности [6]

$$E_{opt} = \max(\min) E(y)$$

при соблюдении ограничений на все n характеристики

$$y_{imin} \leq y_i \leq y_{imax}, i = 1, 2, \dots, n.$$

Обычно детерминированный подход сознательно принимают как упрощение реальной действительности, носящей на самом деле вероятностный характер. Тем не менее, чтобы уйти от упомянутых выше сложностей, связанных со статистической обработкой результатов моделирования, мы используем полностью детерминированный подход.

Для того чтобы выполнить анализ результатов численного моделирования эмиттера электростатического микродвигателя, необходимо преобразовать рассчитанное значение потенциала в трехмерном пространстве в амплитуду напряженности электрического поля. Преобразование скалярного потенциала выполняется по следующей формуле [7]:

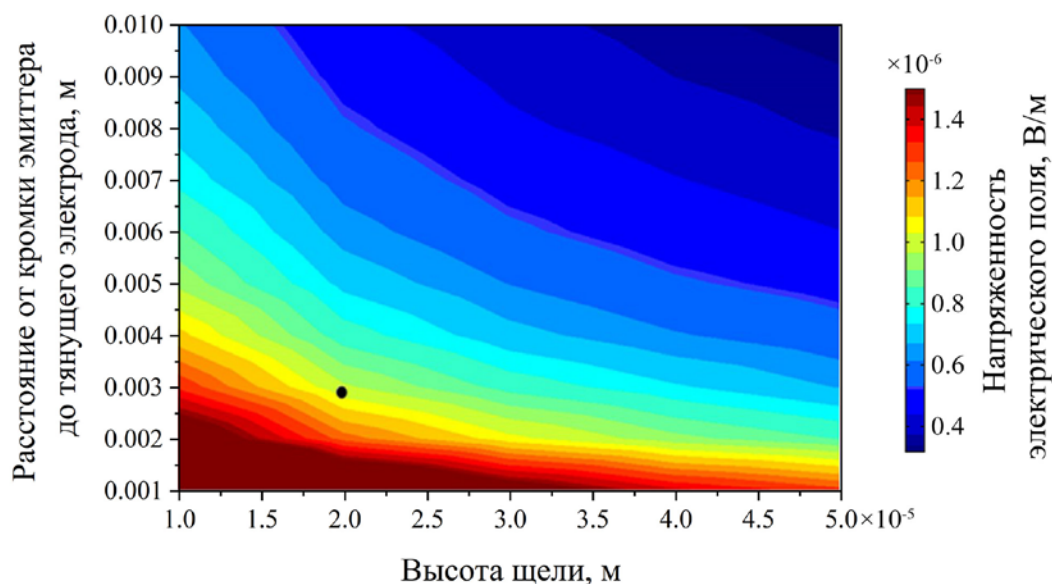
$$E \equiv |\vec{E}| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2},$$

$$E_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad E_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad E_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z},$$

где φ – скалярный потенциал.

Для удобства анализа результатов моделирования эмиттера, ввиду большого количества вариантов конфигурации, было принято решение отобрать пятьдесят наиболее адекватных из них путем редукции одного из параметров – высоты пролетного отверстия в тянущем электроде. Значение этого параметра отождествлено с расстоянием от передней кромки эмиттера до тянущего электрода.

На рисунке 1 отображено поведение напряженности электрического поля в месте расположения зонда – у кромки эмиттера. Для удобства анализа полученные данные представлены в виде плоскости в координатах расстояние до тянущего электрода – высота щели. Цветом отображается напряженность электрического поля в соответствии с приложенной легендой.



Чёрная точка соответствует оптимальному сочетанию параметров эмиттера.

Рисунок 4 – Напряжённость электрического поля зонда

Выбор наиболее оптимальной конфигурации параметров эмиттера электростатического микродвигателя основывается на следующих критериях:

1. Напряженность электрического поля в точке зонда должна быть как можно более высокой, желательно не менее 10^6 В/м. Чем выше это значение, тем меньшие требования предъявляются к блоку питания и изоляции элементов электростатического микродвигателя.

2. Абсолютные значения расстояния до тянущего электрода и высоты щели должны быть как можно больше. С уменьшением этих параметров нелинейно вырастает сложность изготовления элементов электростатического микродвигателя.

3. Градиент значений напряженности электрического поля для некоторого фиксированного отклонения (дельты) параметров должен быть как можно меньше. Известная величина погрешности при изготовлении

элементов электростатического микродвигателя не должна приводить к существенным изменениям в режимах работы микродвигателя.

Исходя из представленных на рисунке 1 данных, очевидно, что требования первого критерия находятся в противоречии с двумя остальными, поэтому необходимо компромиссное решение. Таким образом, наиболее оптимальной конфигурацией, которая наилучшим образом удовлетворяет всем вышеперечисленным критериям, являются следующие значения параметров: высота щели 20 мкм и расстояние от эмиттера до тянущего электрода 3 мм⁴.

Список литературы

1. Johannes, M. Miniaturized liquid metal ion sources (MILMIS) / M. Johannes // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1991. – Vol. 19. – P. 790–799.
2. Marcuccio, S. IL-FEEP: A simplified, low cost electric thruster for micro- and nano-satellites / S. Marcuccio, P. Pergola, N. Giusti // The 4S Symposium, Portorož, Slovenia. – 2012. – 4–8 June. – P. 1–12.
3. Mueller, J. Thruster options for microspacecraft: A review and evaluation of state-of-the-art and emerging technologies / J. Mueller // Micropropulsion for small spacecraft / ed. by M. Micci, A. Ketsdever // Progress in astronautics and aeronautics. – 2000. – Vol. 187. – P. 45–138.
4. Jaworek, A. Classification of the modes of EHD spraying / A. Jaworek, A. Krupa // J. Aerosol Sci. – 1999. – Vol. 30. – P. 873–893.
5. Higuera, F. J. Flow rate and electric current emitted by a Taylor cone / F. J. Higuera // J. Fluid Mech. – 2003. – Vol. 484. – P. 303–327.
6. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей / Б. Ю. Лемешко [и др.]. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011.
7. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : в 5 т. Т. 3 : Электричество : учеб. пособие / Д. В. Сивухин. – 4-е изд., стер. – М. : Физматлит, 2004.

The results of modeling the emitters of an electrostatic microthruster for use in nanosatellites is analyzed. The influence of the geometric parameters of the microthruster emitter model on the distribution of electric field strength and scalar potential in the emitter-extracting electrode system is studied. Based on the resulting data, an optimal combination of geometric parameters for the emitter's primary elements is established: a slit height of 20 μm , the distance to the extracting electrode of 3 mm, and the height of the span hole of the extracting electrode of 3 mm. This combination of parameters ensures a high enough electric field strength (about 1 MV/m) and practical manufacturability of the emitters, taking into account all the possible tolerances.

Гревцов Никита Леонидович, аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, hrautsou@gmail.com.

Научный руководитель – *Бондаренко Виталий Парфирович*, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, vitya51@mail.ru.

УДК 535.391

И. К. ГУБАРЕВИЧ

РАСЧЁТ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ПАРОПЛАЗМЕННОМ ОБЛАКЕ, ОБРАЗУЮЩЕМСЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МАТЕРИАЛЫ

Представлен метод скоростной голографической диагностики плазмы, возникающей в ходе лазерного воздействия на материалы. Предложена методика обработки интерферограмм для расчета параметров плазмы, что позволяет достичь значительной экономии ресурсов и времени, выделяемых на обработку данных, полученных в ходе эксперимента.

При воздействии лазерного излучения на поверхность твёрдого тела большой интерес вызывает изучение быстропротекающих процессов, происходящих как на поверхности материала, так и вблизи очага воздействия. Подобные исследования особенно важны для выбора наиболее эффективных режимов лазерной обработки материалов, включая лазерный раскрой, перфорацию, сварку материалов и модификацию свойств их поверхности, а также для разработки новых методов контроля лазерных технологических процессов. Лазерный импульс приводит к испарению материала образца, разлету отдельных частиц, расплавленным каплям материала, формированию ударных волн вдоль поверхности образца, а также других процессов, изменяющих его структуру, химические, механические, термодинамические и другие характеристики обрабатываемого вещества. Анализ всех факторов оказывающих влияние на размеры и формы образующегося на поверхности кратера может сделать данный процесс более управляемым. Это в конечном итоге приведет к возможности

⁴Выполнение исследований финансировалось по заданию 4.1.2 ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Композиционные материалы».

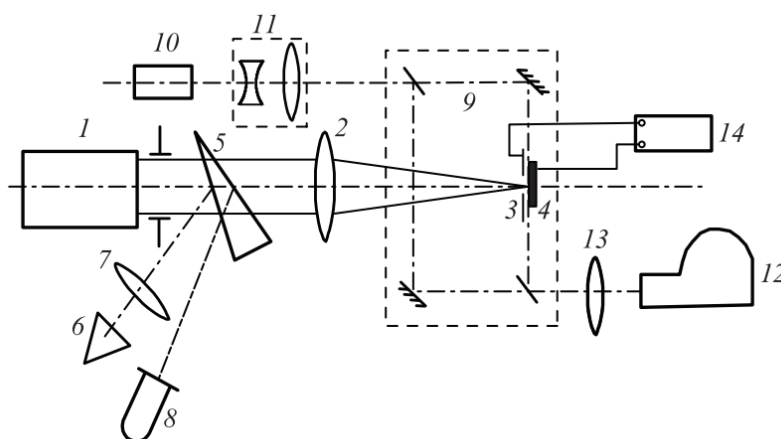
Автор выражает благодарность С. В. Редько за консультации и помощь в проведении моделирования.

получать желаемые результаты воздействия лазерного излучения, более близкими к расчетным. В ходе экспериментов оценивалась эффективность различных режимов лазерной обработки материалов без [1], [2] и при воздействии внешних факторов, например пониженном давлении фонового газа, различной температуре и т. д., например [3]. Среди них весьма влияющим воздействием обладает облако плазмы, возникающее вблизи поверхности облучаемого образца. В связи с этим возникла необходимость изучения возможностей воздействия на лазерную плазму, ее форму и параметры, с помощью внешнего электрического поля различной напряженности (от 0 до 10^6 В/м).

Для изучения пространственной и временной эволюции лазерного факела в ходе воздействия лазерного излучения на образец использовался метод скоростной голографической киносъемки [3]. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1. Излучение рубинового лазера ГОР-100М, работавшего в режиме свободной генерации (длительность импульса $\tau \sim 1,2$ мс, длина волны $0,694$ мкм), пройдя через фокусирующую систему, направлялось через отверстие в электроде на поверхность образца. Образец располагался в воздухе при давлении 10^5 Па. Диаметр полученного таким образом пятна излучения с резкими краями варьировался в ходе экспериментов от 1 до 2 мм. С высоковольтного источника напряжение до 25 кВ подавалось на электроды 3 и 4. Облучаемый образец располагался на поверхности электрода 4. При воздействии на мишень импульса лазерного излучения вблизи поверхности образуется пароплазменное облако, на параметры которого воздействует внешнее электрическое поле. Напряженность электрического поля между пластинами можно регулировать в диапазоне от 0 до 10^6 В/м изменяя как расстояние между пластинами, так и величину подаваемого на них напряжения высоковольтного источника в пределах от 5 до 25 кВ. Одновременно электрическое поле оказывает влияние и на разлетающиеся от очага воздействия расплавленные частицы металлического образца, а также на формирование формы кратера и поверхности возле него.

Методика исследования параметров плазмы следующая. Межэлектродный промежуток помещался в одно из плеч интерферометра Маха-Цендера. Интерферометр освещался излучением рубинового лазера (длина волны $\lambda = 0,694$ мкм), работавшего в режиме свободной генерации. Длительность импульса излучения зондирующего лазера составляла $\tau \sim 400$ мкс. Селекция поперечных мод зондирующего лазера осуществлялась диафрагмой, помещенной внутри 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 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 при этом изображения интерферограмм имеют временное разрешение порядка 1 мкс (время экспозиции одного кадра) и пространственное разрешение по полю объекта примерно 50 мкм.

Исследование параметров плазмы происходит только на начальной стадии развития лазерного факела, поскольку после достижения пароплазменным облаком электрода 3 происходит электрический пробой (короткое замыкание) и внешнее поле исчезает.



- 1 – рубиновый лазер ГОР-100М ($\lambda = 0,694$ мкм); 2 – фокусирующая система; 3, 4 – электроды;
 4 – исследуемая поверхность образца; 5 – стеклянный клин; 6 – измеритель энергии ИМО-2Н; 7 – объектив;
 8 – фотозащитный элемент ФЭК-14; 9 – интерферометр Маха-Цендера; 10 – рубиновый лазер ($\lambda = 0,694$ мкм); 11 – коллиматор;
 12 – СФР-1М; 13 – объектив; 14 – высоковольтный источник

Рисунок 1 – Оптическая схема экспериментальной установки

Процессы, происходящие во время воздействия на объект лазерного импульса длительностью порядка 1 мс и сразу после него, описаны в [3]. Методика исследования формы поверхности кратера, образовавшегося на поверхности образца, описана в [4].

Зарегистрированные интерферограммы лазерной плазмы в различные моменты времени с интервалами в несколько микросекунд после начала лазерного воздействия могут быть использованы для расчета полей показателя преломления лазерной плазмы. В [5] описана методика исследования зависимости между смещением интерференционных полос на интерферограмме и изменением показателя преломления, которые связаны между собой интегральным уравнением Абеля. Затем следует расчет концентрации электронов в пароплазменном облаке. Чтобы зафиксировать и исследовать динамику происходящих в плазме процессов использовались кадры голографической кинофотосъемки. Использование скоростного фоторегистратора СФР-1М позволяет получать время экспозиции одного кадра до 1 мкс с интервалами между ними через небольшие (несколько микросекунд) промежутки времени. Возможности данной камеры позволяют изменять данные временные характеристики записи. В итоге достаточно было получать 6–20 кадров, что позволяет записывать картину быстропротекающих процессов от начала образования облака плазмы до межэлектродного пробоя через данное облако с последующим снятием внешнего электронного поля.

В целом исследование взаимодействия лазерного импульса с образцом представляет собой трудоемкий процесс. Он включает в себя запись быстропротекающего процесса образования плазменного облака вблизи поверхности образца и обработку интерферограммы каждого кадра.

Наличие светлых и темных полос обусловлено сдвигом фаз между световой волной, прошедшей через объект (плазменное облако), и опорной волной (волной сравнения). Следующим этапом были вычисления по изображению величины смещения интерференционных полос от невозмущенного состояния, и вычисление требуемых параметров плазмы, например расчет концентрации электронов. Обработку изображений интерферограмм и математические расчеты можно автоматизировать, используя возможности пакета MATLAB и его расширений. Положительный эффект от этого заключается в значительной экономии ресурсов и времени, выделяемых на обработку данных полученных в ходе эксперимента, а также существенно повысить точность конечного результата. Сдвиг полосы в пикселях преобразуется в число полос, на которое сместилась интерференционная картина при образовании неоднородности. Для этого сдвиг полосы в пикселях делится на среднюю ширину полосы в пикселях. Средняя ширина полосы определяется как среднее расстояние между двумя соседними светлыми либо темными полосами [5].

На рисунке 2 приведены примеры обработки изображений интерферограмм с помощью пакета MATLAB. Его расширение Image Processing Toolbox обрабатывает изображение интерферограммы до необходимого для расчетов состояния. Далее для расчетов поочередно вручную выбирается полоса, на приведенном примере это темные полосы (на рисунках отмечены красными линиями). Затем средствами расширения Curve Fitting Toolbox кривая сглаживается для более точной ее обработки (синяя кривая). Значения смещения в пикселях определяется как длина перпендикуляра, опущенного их точки кривой, описывающей текущее положение полосы к прямой описывающей положение полосы в невозмущенном состоянии. Сдвиг полосы в пикселях преобразуется в число полос, на которое сместилась интерференционная картина при образовании неоднородности. Для этого сдвиг полосы в пикселях делится на среднюю ширину полосы в пикселях. Средняя ширина полосы определяется как среднее расстояние между двумя соседними светлыми либо темными полосами. На рисунке 3 приводятся рассчитанные по интерферограммам, показанным на рисунке 2, графики распределения плотности концентрации электронов.

Данные исследования важны при изучении закономерностей изменения рельефа и структуры твердых тел в процессе их облучения импульсным лазерным излучением с различными спектральными, энергетическими и пространственно-временными характеристиками, оценке влияния различных внешних факторов на ход обработки материалов.



Рисунок 2 – Интерферограммы лазерной плазмы с вручную выбранными для расчетов темными полосами (красные линии), построенные аппроксимирующие кривые (отмечены синим)

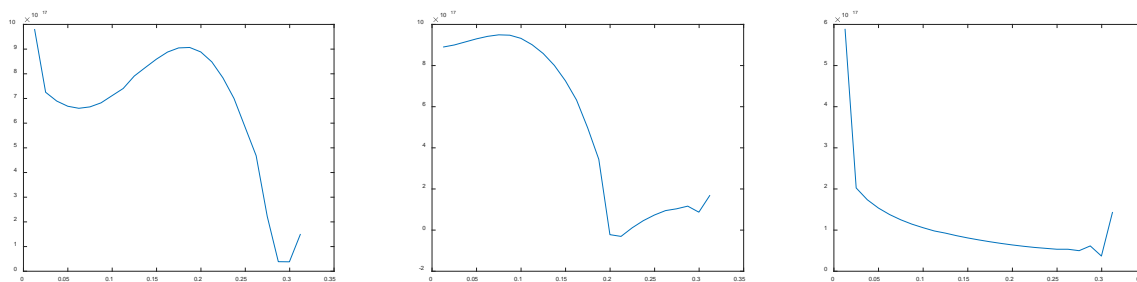


Рисунок 3 – Графики концентрации электронов

Перспективным является применение методов голографической интерферометрии с использованием цифровых средств регистрации с высоким разрешением, компьютерным анализом полученных опытным путём голографических интерферограмм и построением фазового портрета, позволяющих визуализировать и моделировать картину процесса образования плазмы и динамику изменения ее параметров.

Список литературы

1. Действие излучений большой мощности на металлы / С. И. Анисимов [и др.]. – М. : Наука, 1970. – 272 с.
2. Куликов, И. С. Электродитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 232 с.
3. 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.
4. Губаревич, И. К. Визуализация формы поверхности в реальном времени с регулированием чувствительности измерения / И. К. Губаревич, А. М. Ляликов // Оптика и спектроскопия. – 1996. – Т. 80, № 6. – С. 948–952.
5. Губаревич, И. К. Голографическая диагностика быстропротекающего процесса образования плазменного облака в ходе лазерного воздействия на материалы / И. К. Губаревич // Физика конденсированного состояния [Электронный ресурс] : материалы XXIX междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 22–23 апр. 2021 г.) / ГрГУ им. Янки Купалы, физ.-техн. фак. – Гродно, 2021. – С. 36–38.

The method of high-speed holographic diagnostics of plasma generated during laser action on materials is presented. A technique for processing interferograms for calculating plasma parameters is proposed, which consists to achieve significant savings in resources and time allocated for processing data obtained during the experiment.

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

УДК 616.71

А. В. ДЛУБАКОВСКАЯ

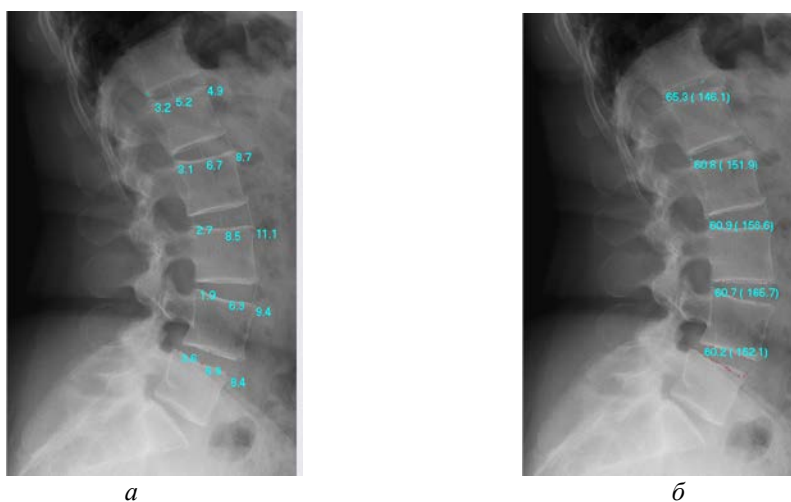
КОМПЬЮТЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА

Актуальным вопросом является предотвращение заболеваний позвоночника, которые развиваются постепенно [1]. Динамические и статические нагрузки на позвонки не до конца изучены, и на современном этапе не существует модели для изучения состояния поясничного отдела позвоночника в динамике. Компьютерная диагностика поясничного отдела позволяет наиболее точно определить наличие и характер отклонений позвоночного столба от нормы, после чего можно предлагать соответствующие медицинские рекомендации.

Диагностика поясничного отдела позвоночника важна на раннем этапе выявления в нем деформаций. Целью исследования является обработка прямотеневых рентгенофункциональных изображений поясничного отдела позвоночника на имеющейся компьютерной программе «PozvonoK-1», позволяющей оценить состояние межпозвонкового диска, что важно для ранней диагностики заболеваний. В программе «PozvonoK-1» можно проводить конкретные измерения, оценивая: периметр диска, углы между задней боковой поверхностью позвонка и вертикалью в вертикальном положении пациента, при наклонах вперед и назад. Имеющийся пакет программ позволяет также рассчитать площади и высоты тел позвонков и межпозвонковых дисков, так как именно эти параметры являются важными для определения заболеваний. На прямотеневых рентгенофункциональных изображениях видны только твердые ткани, а такие как хрящи и связки не

отображаются. Для определения площади рентгенологического межпозвонкового пространства, которая находится между телами позвонков, определяют границы на рентгенофункциональных изображениях. Магнитно-резонансная томография позволяет увидеть мягкие ткани на снимках, но не позволяет исследовать их в динамике, в отличие от нашего метода.

Для получения достоверного результата очень важна статистическая обработка данных для каждого биологического объекта [2]. Обработка измерений по цифровым рентгенограммам была проведена для контрольной группы с получением результатов, характеризующих нормальное состояние поясничного отдела позвоночного столба, и для конкретных объектов с дистрофическими изменениями, с сопоставлением их с нормой для данной возрастной и половой категории. Измерение высоты межпозвонкового диска поясничного отдела позвоночника и его площади было предложено для оценки состояния межпозвонкового диска, отвечающего за движение позвонково-двигательного сегмента. Для высот и для площадей межпозвонкового диска поясничного отдела позвоночника имеет смысл ввести понятие относительной площади. Это обусловлено следующими основными факторами: 1) площадь межпозвонкового диска у разных пациентов может быть разной вследствие разного физиологического строения, 2) измерения могут проводиться на разных аппаратах (с пучковым источником рентгеновского излучения, щелевым и т. д.). Рисунки, демонстрирующие методику измерения, представлены ниже.



а) измерение высот межпозвонкового диска; б) измерение площадей межпозвонкового диска

Рисунок 1

Отношение высоты диска и высоты тела позвонка по одной вертикали вдоль задней боковой поверхности тела позвонка:

$$\frac{h}{H} \approx 0,17 \pm 0,05. \quad (1)$$

Соответственно, отношение площади диска к площади тела позвонка составляет:

$$\frac{S_{\text{площади диска}}}{S_{\text{площади тела}}} \approx 0,26 \pm 0,08. \quad (2)$$

Предложенная нами методика диагностики поясничного отдела позвоночника может использоваться для выявления изменений в позвоночном столбе на ранних этапах, анализируя их площади и высоты. Данная методика позволяет расширить набор диагностических тестов для адекватного диагноза путем получения цифровой рентгенограммы в формате JPG с помощью различных аппаратов с использованием цифровых технологий.

Список литературы

1. Абельская, И. С. Остеохондроз шейного отдела позвоночника / И. С. Абельская, О. А. Михайлов. – Минск : БелМАПО, 2004. – 220 с.
2. Попелянский, А. Я. Остеохондроз. Клинический аспект / А. Я. Попелянский // Вестн. рентгенологии и радиологии. – 1977. – № 6. – С. 58–63.
3. Жарков, П. Л. Остеохондроз и другие дистрофические изменения позвоночника у взрослых и детей / П. Л. Жарков. – М. : Медицина, 1994. – 240 с.

A topical issue is the prevention of spinal diseases that develop gradually [1]. Dynamic and static loads on the vertebrae are not fully studied and at the present stage there is no model for studying the state of the lumbar spine in dynamics. Computer diagnostics of the lumbar spine allows the most accurate determination of the presence and nature of spinal column deviations from the norm, after which appropriate medical recommendations can be offered.

Длубаковская Анна Валерьевна, студентка 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, dlubakovskaya@gmail.com.

Научный руководитель – *Жарнова Ольга Александровна*, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, zharik783@tut.by.

УДК 530.1

М. А. ЖУКЕВИЧ

СТРУКТУРА И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОБУЧАЮЩИХ ПРОГРАММ ПО ФИЗИКЕ

Предложена структура и варианты программной реализации обучающих программ по физике. Представлены формы и программная реализация использования информационных технологий при преподавании физических дисциплин. На конкретных примерах показана дидактика и компьютерная реализация физических от простых иллюстраций до сложных объектов и процессов, понимание которых без компьютерного моделирования затруднено. Предложена универсальная структура обучающих программ по физике, которые можно использовать для проведения. На конкретных примерах проиллюстрирована парадигма «физика+компьютер», обеспечивающая изучение программирования на физических примерах.

Применение компьютерных технологий в обучении предметным знаниям не должно быть самоцелью. Главное правило при этом: «не навреди». Важно, чтобы компьютерный интерфейс не усложнял решение задачи. На наш взгляд, следует использовать вычислительные и графические возможности компьютеров для изложения предметного материала в интересной и доступной форме. Мы не рассматриваем переложение лекционного материала в виде компьютерной презентации. Применение компьютера для динамических иллюстраций с возможностью варьирования исходными данными параметров, быстрое построение графических зависимостей – это наиболее простой способ. Существуют методы, применение которых без использования компьютера практически невозможно.

Рассмотрим несколько примеров. Продемонстрируем свой опыт компьютеризации при обучении физике. Ранее уже обсуждались эти вопросы [1]. Сейчас более системно и подробно попробуем изложить наш взгляд на разработку программного обеспечения для обучения предметным знаниям. Исходя из стандартных типов занятий (лекция, практическое, лабораторное), проиллюстрируем это на примерах. Рассматривая конкретные темы, мы обобщаем подход к изучению и других тем дисциплины.

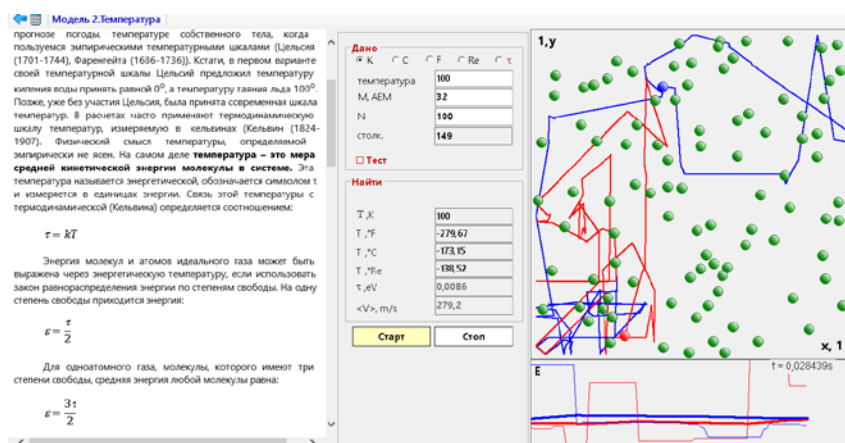


Рисунок 1 – Пример интерфейса программы – динамическая иллюстрация

Окно «теория» содержит все необходимые сведения по теме с формулами и их выводами. Окно «данные» позволяет менять исходные параметры и отображает результаты расчета производных параметров. Окно «динамическая иллюстрация» визуализирует физический процесс.

При изучении основ молекулярно-кинетической теории важно понять статистический характер параметров системы (температура, давление, энергия), необратимость процессов, стремление системы к

динамическому равновесию. Простая модель «Газ дисков» позволяет динамически проиллюстрировать эти понятия (рис. 1). Меняя число молекул, определяя и отображая на графике их среднюю скорость, можно убедиться, что понятие температуры справедливо только для большого числа молекул. Устанавливая упорядоченную начальную конфигурацию и задавая одинаковые начальные скорости, можно убедиться, что система стремится к динамическому равновесию и распределению Максвелла по скоростям. Эта простая модель позволяет проиллюстрировать и необратимость процессов (парадокс Лошмидта), сделать более понятными определения температуры, длины свободного пробега. Разумеется, разработка моделей, используемых при обучении, это серьезная профессиональная работа предметников и программистов. На рис. 1 представлен интерфейс программы, реализующий изучение понятия температуры на основе метода молекулярной динамики.

Аналогичная структура интерфейса предлагается при разработке приложений для тренинга и тестирования: данные, теория, динамическая иллюстрация.

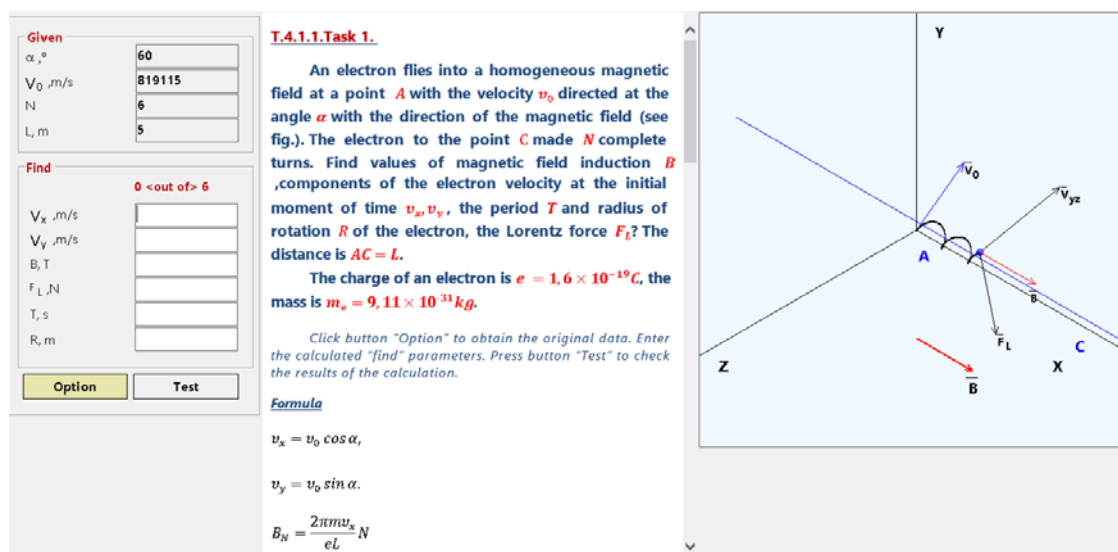


Рисунок 2 – Пример интерфейса программы – тестирование

На рис. 2 представлен интерфейс программы-тестирования. Окно «данные» отличается от предыдущего интерфейса тем, что искомые параметры вычисляются пользователем и тестируются программой. Динамическая иллюстрация демонстрирует векторы силы Лоренца и скорости электрона, обеспечивая наиболее информативную (визуальную) образовательную функцию.

На рис. 3 представлен интерфейс программы – лабораторная работа. Как видно, используется унифицированный интерфейс с элементами, характерными для лабораторных работ. Описываются теория, лабораторная установка, алгоритм выполнения лабораторной работы. Кроме того, компьютерная модель позволяет расширить возможности экспериментальной установки с точки зрения варьирования диапазоном и режимами, задаваемыми исходными данными. Предусмотрена автоматизация сбора и обработки экспериментальных данных.

Приведем пример секции «формулы» в лабораторной работе «Изучение колебаний связанных осцилляторов».

1. Расчетные частоты нормальных колебаний системы:

$$\omega_{1N} = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}; v_{1N} = \frac{\omega_{1N}}{2\pi};$$

$$\omega_{2N} = \sqrt{\frac{k_1 + 2k_2}{M}}; v_{2N} = \frac{\omega_{2N}}{2\pi}.$$

2. Расчетные частоты резонансных колебаний системы:

$$\omega_{1res} = \sqrt{\omega_{1N}^2 - 2\beta^2}; v_{1res} = \frac{\omega_{1res}}{2\pi}; \quad \omega_{2res} = \sqrt{\omega_{2N}^2 - 2\beta^2}; \quad v_{2res} = \frac{\omega_{2res}}{2\pi}$$

3. Теоретическая амплитуда колебаний магнита, м:

$$A_{01T} = \frac{f_0}{[(\omega_{1N}^2 - \omega_g^2)^2 + 4\omega_g^2\beta^2]^{1/2}}; \quad A_{02T} = \frac{f_0}{[(\omega_{2N}^2 - \omega_g^2)^2 + 4\omega_g^2\beta^2]^{1/2}}.$$

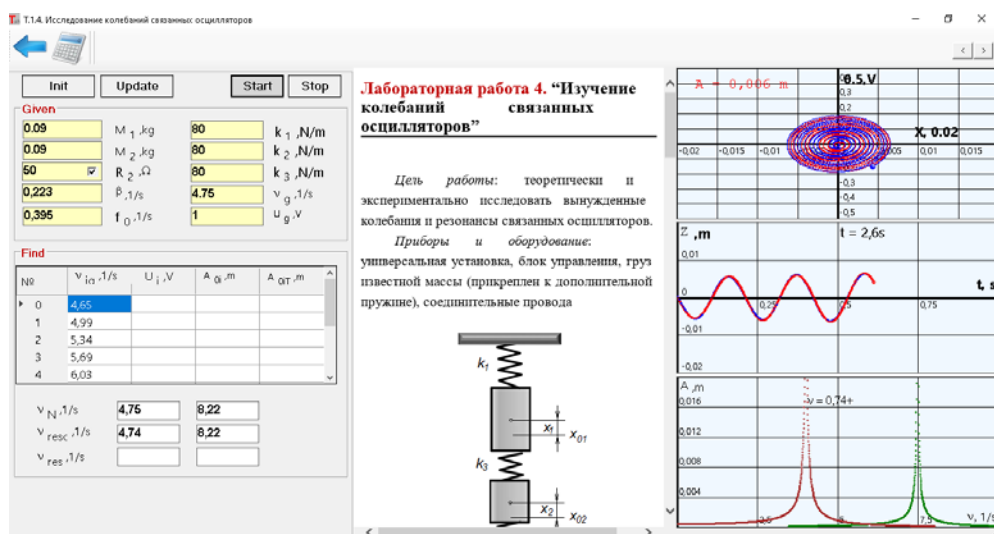


Рисунок 3 – Пример интерфейса программы – лабораторная работа

Список литературы

1. Применение активных демонстраций в курсе общей физики в высшей школе / И. С. Зейликович [и др.] // Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании : материалы IV междунар. науч. конф., Красноярск, 6–9 окт. 2020 г. : в 2 ч. Ч. 1 / под общ. ред. М. В. Носкова. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2020. – С. 134–138.
2. Никитин, А. В. Компьютерное моделирование физических процессов / А. В. Никитин, А. И. Слободянюк, М. Л. Шишаков. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2013. – 679 с.
3. <https://sites.google.com/view/physicscomputerforcolleges>.

The structure and options for the program implementation of training programs in physics are proposed. The forms and programmatic implementation of the use of information technologies in the teaching of physical disciplines are presented. Specific examples show the didactics and computer implementation of physical from simple illustrations to complex objects and processes, the understanding of which without computer modeling is difficult. A universal structure of training programs in physics is proposed, which can be used to conduct. On specific examples, the paradigm «physics + computer» is illustrated, which provides the study of programming on physical examples.

Жукевич Михаил Анатольевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, zhukevich_ma_19@student.grsu.by.

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nik@grsu.by.

УДК 53.04

Б. ЖУМАБАЕВ

ВЛИЯНИЕ ТИПА РЕКОМБИНАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ КРЕМНИЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОРНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Посредством моделирования рассматривается зависимость эффективности кремниевого концентраторного вертикального многопереходного солнечного элемента от концентрации солнечного потока. Сравнивается влияние учета различных механизмов рекомбинации по отдельности и влияние всех механизмов вместе взятых на эффективность вертикального многопереходного солнечного элемента. Основным механизмом, влияющим на эффективность, является механизм Шокли-Рида-Холла. Показано, что в диапазоне солнечной концентрации до $C = 1000$ Солнц эффективность линейно увеличивается с увеличением концентрации и при дальнейшем увеличении концентрации достигает насыщения.

К солнечным установкам с ультравысокой солнечной концентрацией относятся солнечные установки, использующие концентрацию солнечного потока, превышающие 1000–2000 Солнц. Они предназначены для достижения высокой эффективности с низкой себестоимостью. Предполагается, что теоретическая эффективность этих солнечных установок увеличивается с увеличением солнечной концентрации (C) и при этом используется очень малая масса полупроводникового материала. Для достижения этих целей делается много важных усилий в различных направлениях, в частности проектируются новые оптические конфигурации солнечных установок, разрабатываются методы эффективного теплоотвода и новые архитектуры солнечных элементов, способных функционировать при указанных солнечных концентрациях.

В настоящее время среди концентраторных солнечных элементов преобладают многопереходные горизонтальные солнечные элементы (ГСЭ), сделанные на основе сложных III–V полупроводников с различной шириной запрещенной зоны. ГСЭ имеют только два электрода (сверху и снизу) для пропускания генерированного тока. Конкуренция между двумя факторами: увеличение площади, покрытой контактом, приводящее к уменьшению солнечного потока, и увеличение последовательного сопротивления R_s при уменьшении площади контакта приводит к ограничению роста эффективной солнечной концентрации до $C < 1000\text{--}2000$ Солнц [1]. Как альтернатива, избегающая указанную проблему конкуренции двух механизмов, предлагаются вертикальные многопереходные солнечные элементы с последовательно соединенными несколькими переходами [2]. Такой подход позволяет развить архитектуру солнечных элементов с низким R_s обусловленного большим поперечным сечением тока носителей и следовательно развить высококонцентрированные кремниевые солнечные элементы с максимальным КПД, что было показано экспериментально достижением КПД = 19 % при $C = 2500$ Солнц [3]. В работе [4] предлагается новая архитектура вертикального многопереходного солнечного элемента на основе GaAs, в котором переходы соединены не металлическим контактом, а туннельным переходом. Согласно результатам указанной работы, при такой архитектуре достигается линейный рост эффективности с увеличением солнечной концентрации. В нашей работе рассматривается такая же архитектура солнечного элемента, только в качестве полупроводникового материала выбран широко применяемый кремний и изучается зависимость эффективности элемента от солнечной концентрации, а также влияние учета различных механизмов рекомбинации на эффективность солнечного элемента с такой структурой. В частности, рассматривается учет таких механизмов рекомбинации, как Шокли-Рид-Холла, Оже, рекомбинация и излучательная рекомбинация.

Рассматриваемая структура вертикального солнечного элемента (ВСЭ) состоит из двух вертикальных последовательно соединенных p-n переходов, соединенных туннельным переходом. Р-слой состоит из двух последовательных слоев, один из которых высоколегирован до концентрации $5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и второй легирован до концентрации $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. n-слой также состоит из двух последовательных слоев, первый из которых легирован до концентрации $4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и второй легирован высокой концентрацией $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Туннельный переход представляет собой p+/p+ переход, с шириной каждой из которых по 26 нм и уровнем легирования $7 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Полная ширина структуры равна 200.332 мкм и высота (H) составляет 500 мкм. При этом высота структуры H может быть увеличена без ограничения, связанного с увеличением последовательного сопротивления R_s , что обычно имеет место в случае горизонтального солнечного элемента. В данном случае увеличение H даже уменьшает нежелательное последовательное сопротивление структуры. Нужно отметить, что структура расположена вертикально, то есть граница p-n перехода ориентирована параллельно к направлению вертикального солнечного потока (рис. 1) и имеет только два электрода для вывода генерированного тока. В данной работе моделирование и анализ свойств кремниевого солнечного элемента проводились с использованием программного обеспечения TCAD Sentaurus Synopsys.

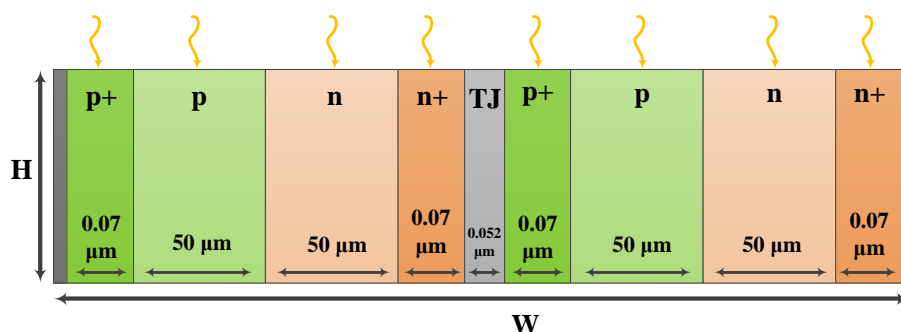


Рисунок 1 – Структура моделируемого вертикального солнечного элемента с туннельным переходом

При моделировании рассматривалось влияние каждого механизма рекомбинации по отдельности и всех механизмов вместе взятых на генерированный ток. Результаты моделирования показывают, что вольт-амперная характеристика существенно зависит от типа механизма рекомбинации. Рекомбинация Шокли-Рид-Холла до

солнечной концентрации 1000 заметно уменьшает эффективность ВСЭ и даёт основной вклад в суммарную рекомбинацию (рис. 2). При больших концентрациях основной вклад наблюдается от механизма Оже рекомбинации. При вычислениях принималось во внимание отличие площадей сечения тока и площади, покрываемой солнечным потоком. Проводилось также моделирование зависимости эффективности вертикального солнечного элемента от концентрации солнечного потока (рис. 3). Как и в работе [4], наблюдается линейная зависимость эффективности от концентрации солнечного потока до $C = 1000$ Солнц, что отличается от аналогичной зависимости для горизонтальных концентраторных солнечных элементов, где уже при концентрации $C = 200\text{--}300$ Солнц наблюдается насыщение и дальнейший спад эффективности.

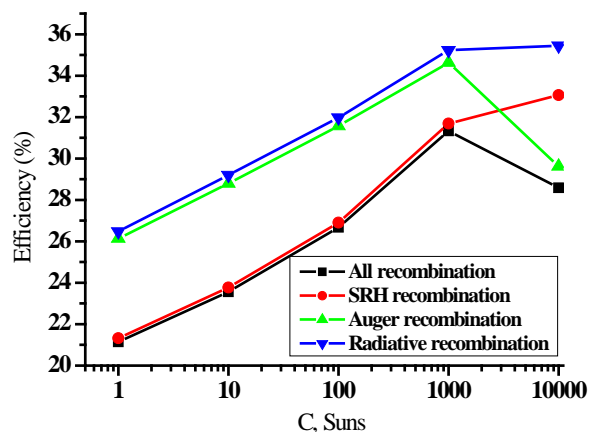


Рисунок 2 – Зависимость эффективности вертикального солнечного элемента с туннельным переходом от солнечной концентрации при различных механизмах рекомбинации

Список литературы

1. Paquette B., Boucherif A., Aimez V., and Arès R. Novel multijunction solar cell design for low cost, high concentration systems, Prog. Photovolt., Res. Appl., vol. 24, no. 2, pp. 150–158, 2016, doi: 10.1002/pip.2646.
2. Gover A. and Stella P. Vertical multijunction solar-cell onedimensional analysis, IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-21, no. 6, pp. 351–356, Jun. 1974, doi: 10.1109/T-ED.1974.17927.
3. Sater B. L. and Sater N. D. High voltage silicon VMJ solar cells for up to 1000 suns intensities, in Proc. Conf. Rec. 29th IEEE Photovolt. Spec. Conf., May 2002, pp. 1019–1022, doi: 10.1109/PVSC.2002.1190778.
4. Eduardo F. Fernández, Natalia Seoane, Florencia Almonacid, and Antonio J. García-Loureiro. Vertical-Tunnel-Junction (VTJ) solar cell for ultra-high light concentrations (>2000 suns). IEEE Electron Device Letters, vol. 40, no. 1, January 2019, pp. 44–47.

In this paper it is simulated dependence of efficiency of silicon based concentrating vertical solar cell on the solar concentration. Influence of different type of recombination mechanisms to the efficiency of vertical solar cell is considered. It is shown that the main recombination mechanism which considerably influence to efficiency is Shockley-Read-Hall mechanism. It is shown, that up to the concentration 1000 Suns the efficiency is increased linearly with increasing the sun concentration.

Жумабаев Бехзод, докторант Ургенчского государственного университета, Ургенч, Узбекистан, atamuratovazuhra03@gmail.com.

Научный руководитель – Атамуратов Атабек Эгамбердиевич, доктор физико-математических наук, доцент, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, atabek.atamuratov@urdu.uz.

УДК.537.539

М. К. КАРИМОВ, У. О. КУТЛИЕВ, М. У. ОТАБАЕВ, К. У. ОТАБАЕВА, П. ДАВЛЕТОВА

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАССЕЯННЫХ ИОНОВ ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ ДЕФЕКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ InP(001)

Смоделирован процесс рассеяния ионов Xe^+ с начальной энергией 3 кэВ с дефектной поверхностью InP (001). Изучены влияния на процесс малоуглового рассеяния ионов низко индексные кристаллические направления дефектной поверхности. Установлено, что геометрические параметры поверхностных полуканалов играют одну из важных ролей в образовании пиков в энергетическом спектре рассеянных ионов. Показано, что поверхностные дефекты образуют соответствующие пики в энергетическом спектре. Также рассчитаны траектории рассеянных частиц. Наши расчеты показали, что отсутствие атома приводит к уменьшению числа столкновений падающих частиц с атомами поверхности.

Одно из явлений, наблюдаемых в случае бомбардировки поверхности ускоренными положительными ионами, – рассеяние этих ионов поверхностью. К настоящему времени выполнено большое число экспериментальных и теоретических работ по изучению данного явления как в нашей стране, так и за рубежом. Эти исследования в основном относятся к области кэВ-х энергий бомбардирующих частиц и, как правило, касаются рассеяния ионов с массой, значительно меньшей массы атомов исследуемой мишени. Взаимодействие энергичных ионов с атомами в твердых телах имеет фундаментальное значение для понимания поведения дефектов, а также для метода анализа рассеяния ионов с низкой энергией (РИНЭ). Показано, что, исходя из простой модели упругих парных одно- и многократных столкновений и экранированного кулоновского потенциала, можно объяснить основные особенности отражения ионов (атомов) от поверхности твердого поликристаллического тела [1]. Там же указывалось, что для монокристаллов следует ожидать анизотропии углового и структурности энергетического распределения рассеянных частиц. В [2, 3] была рассчитана структура энергетического спектра ионов, рассеянных монокристаллом, и показано, что на общем фоне, обусловленном многократным рассеянием, должен выделяться, наряду с главным, ряд вторичных пиков. Эти пики, расположенные в основном в высокоэнергетической части спектра, соответствуют рассеянию в результате двукратных столкновений с атомами решетки. Необходимо отметить, что недостатком ряда ранних экспериментальных работ является несовершенство экспериментальной техники. Отсутствие эффективного контроля за состоянием поверхности и возможность снятия только вольт-амперных характеристик вместо энергетических спектров рассеянных ионов не позволяли исследователю получить достоверную информацию о механизме рассеяния. Исследование явления рассеяния ионов поверхностью, как правило, сводится к изучению коэффициента рассеяния, представляющего собой отношение тока рассеянных ионов к току падающих на мишень ионов, а также угловых и энергетических распределений рассеянных ионов. Эти характеристики исследуют в зависимости от геометрических факторов (углов падения и рассеяния, кристаллографических направлений и типа кристаллической решетки), от рода сталкивающихся частиц (их массы и зарядового состояния), начальной энергии E_0 и состояния бомбардируемой поверхности. Вакуумные условия играют важную роль при установлении механизма взаимодействия.

В этой работе мы представляем исследования ринэ с поверхностями $\text{InP}(001)$, которые имеют точечные дефекты. Уникальные свойства InP вызвали огромный исследовательский интерес. Этот метод широко применяется в высокоскоростных электронных и оптоэлектронных устройствах благодаря своим привлекательным электронным свойствам, а также превосходному согласованию решетки со сплавами с малой шириной запрещенной зоны, такими как GaInAs , GaInAsP , AlGaInAs и т. д. фотодиоды на основе GaInAsP/InP работают в окне с низкими потерями кремнезема с высокой квантовой эффективностью и малым временем отклика. Благодаря своим превосходным физическим свойствам, таким как высокая теплопроводность, высокие пиковые скорости электронов и дырок, InP считается важным полупроводниковым материалом и широко используется в устройствах для транзисторов с высокой подвижностью электронов, высокоэффективных и высокоскоростных лазерах с квантовыми ямами. Фотоприемники, фотонные интегральные схемы и т. д. InP также предпочтительнее, чем устройства на основе GaAs , для источников и усилителей миллиметрового диапазона из-за его низкого уровня шума и более высокой эффективности работы в высокочастотном режиме.

Метод моделирования и результаты. Для исследования процесса рассеяния ионов мы используем вычислительную модель, основанную на приближении парных столкновений. В приближении парных столкновений основаны две базовые программы, с помощью которых моделируют широкий круг процессов, вызываемых бомбардировкой твердых тел ускоренными частицами, – программа MARLOWE и программа TRIM. В основе обеих программ лежит практически одинаковый формализм. Отличие этих программ в том, что первая изначально работает с кристаллическими мишенями, а вторая – с аморфными.

Самый простой подход при описании столкновений частиц состоит в том, чтобы рассматривать каждое взаимодействие как бинарное столкновение, т. е. движущегося налетающего иона (или атома) и неподвижного атома-мишени без каких-либо внешних ограничений. Это приближение справедливо из-за ограниченного диапазона взаимодействия ядер, и, следовательно, никакие другие ядра не будут задействованы. Полная энергия будет сохранена, поэтому энергия, потерянная падающим ионом, будет получена атомом-мишенью.

Это удобное приближение для описания взаимодействующих частиц как точечных масс, что разумно с учетом размера ядра. Существуют силы притяжения между ядрами и электронами и силы отталкивания между ядрами и между электронами. Взаимодействие определяется потенциалом между двумя частицами, который представляет собой сумму потенциалов взаимодействия для каждого отдельного электрона и ядер двух частиц. Полезное упрощение состоит в том, чтобы рассматривать потенциал взаимодействия просто как потенциал между двумя ядрами, при этом электроны служат только для экранирования положительных ядерных зарядов друг от друга, тем самым уменьшая эффективные положительные заряды.

Нами были изучены процессы рассеяния ионов Xe^+ на дефектных поверхностях монокристаллов $\text{InP}(001)\langle 110 \rangle, \langle \bar{1}10 \rangle$ при малых значениях угла падения ($\psi = 3^0, 5^0, 7^0$) с начальной энергией падающие частицы

равны 3 кэВ (рис. 1). При бомбардировке поверхности InP (001)<110> ионами Xe по углу наклона распределение энергии имеет двойные пики, образованные поверхностными атомами и полуканалом (рис. 2а).

Из распределения энергии, представленного на рис. 2б мы можем видеть больше, чем некоторые вершины. Необходимо отметить, что геометрические параметры (глубина и ширина) поверхностного полуканала формируются в направлении <110> больше, чем в направлении <110>.

Из этого распределения видно, что на низкоэнергетической части энергетического спектра наблюдаются пики, образованные рассеянными ионами от точечных дефектов.

На энергетическом распределении мы видим два пика, для которых наблюдаются более высокие энергии, относящиеся к частицам, рассеянными от поверхностных атомов и полуканалов. Но также мы можем видеть низкоинтенсивные пики на энергетическом спектре. Это низкоэнергетические пики, образованные ионами, рассеянными от точечных дефектов. Представленные в этих двух случаях пики в энергетическом спектре, возникающие в результате столкновений Xe^+ с поверхностными атомами In (поверхностные атомные цепочки) и P (полуканалы), хорошо видны. Энергии рассеянных ионов несколько ниже, чем при чисто упругом рассеянии, предположительно из-за неупругих процессов во время столкновения.

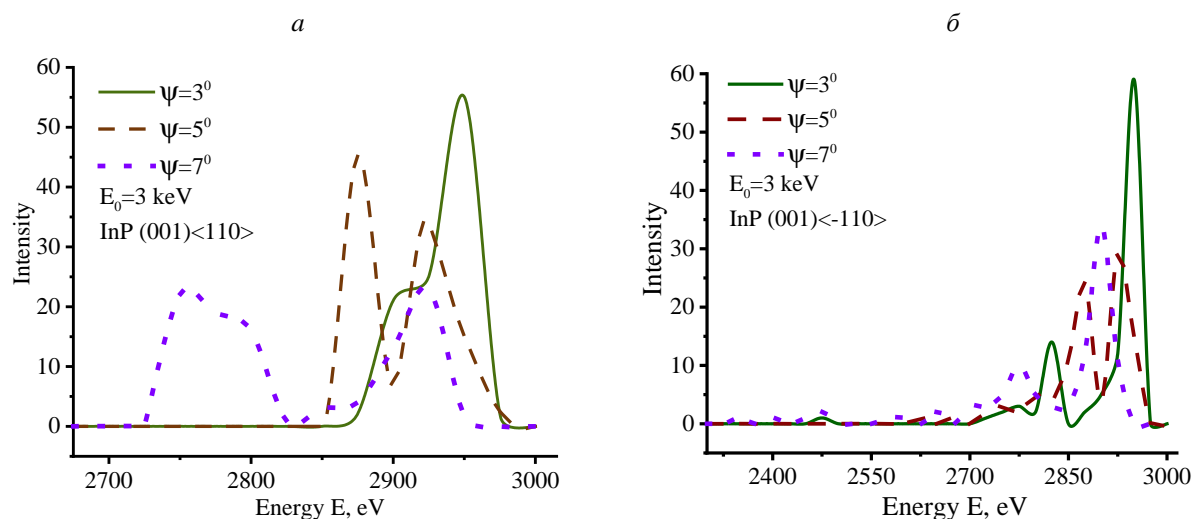


Рисунок 1 – Энергетическое распределение ионов Xe, рассеянных с дефектной поверхности InP (001)<110> (а), <110> (б) с начальной энергией 3 keV и при углах скольжения $\psi = 3^\circ, 5^\circ, 7^\circ$

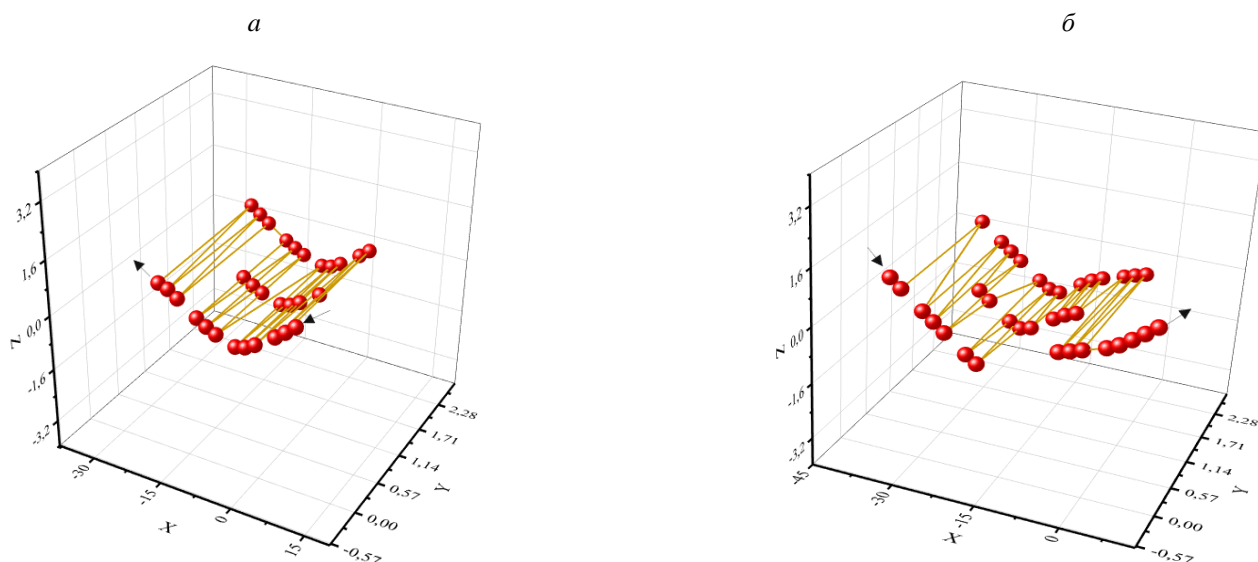


Рисунок 2 – Характерные траектории рассеянных ионов Xe с дефектной поверхности InP(001)<110> (а), <110> (б) с начальной энергией 3 keV и $\psi = 7^\circ$

На рисунке 2 представлены характерные траектории ионов Xe дефектной структуры InP(001)<110> (а), <110> (б) с начальной энергией $E_0 = 3 \text{ keV}$ и $\psi = 7^\circ$.

Сначала на этих снимках видны структуры точечных дефектов для указанного выше направления и одна из простых траекторий рассеяния иона. Видно, что в отсутствие поверхностного атома налетающий ион сталкивается со следующим атомом поверхности. Наши расчеты показали, что отсутствие атома приводит к уменьшению числа столкновений падающих частиц с атомами поверхности.

Изучение характеристик траекторий рассеяния ионов также позволит получить больше информации о проникновении ионов в поверхностные слои.

Мы рассчитали все физические параметры ионно-атомного столкновения. В случае рассеяния ионов Хе поверхностью точечного дефекта $\text{InP}(001)\langle 110 \rangle$ (рис. 3а) коэффициент столкновения – 29, неупругие потери энергии – 61 эВ. В случае $\text{InP}(001)\langle \bar{1}10 \rangle$ (рис. 3б) коэффициент столкновения – 36, неупругие потери энергии – 77 эВ. Эти параметры и снимки показывают, что с помощью метода LEIS мы можем получить информацию о поверхностях точечных дефектов и определить смещение точечных дефектов на поверхности.

Нами показано, что при изучении рассеяния низкоэнергетических ионов на структурах с точечными дефектами теоретический интерес представляет расчет распределения дефектов, в то время как для ринэ зависимость энергии рассеянных ионов от угла рассеяния и глубины, на которой центр рассеяния находится в центре внимания. По существу, необходима соответствующая теория, чтобы связать выход обнаруженных рассеянных ионов как функцию энергии при малом угле рассеяния с плотностью и распределением по глубине различных рассеивающих атомов. Поэтому необходимо рассмотреть теорию процессов упругого рассеяния, чтобы определить потери энергии при столкновении в зависимости от угла рассеяния и масс сталкивающихся частиц. В принципе, эта информация позволяет рассчитать пробег рассеянной частицы и определить распределение смещенных атомов мишени.

Список литературы

1. Eckstein W. Computer Simulation of Ion-Solid Interactions (Springer, Berlin 1991).
2. Karimov, M. K. Effect of Ion Refocusing and Focusing at the Ne and Ar Small Angle Ion Bombardment on the Surface III–V Compound Semiconductors / M. K. Karimov, Sh. R. Sadullaev, R. Y. Sobirov // International Journal of Trend in Scientific Research and Development. – 2018. – Vol. 2 (5). – P. 110–113.
3. Nastasi M. Hirvonen J. K., Mayer J. W. Ion-Solid Interactions: Fundamentals and Applications (Cambridge University Press 1996).

The process of scattering of Xe^+ ions with an initial energy of 3 keV with a defective InP (001) surface is simulated. The effects of low-index crystalline directions of a defective surface on the process of small-angle ion scattering are studied. It has been established that the geometric parameters of the surface half-channels play an important role in the formation of peaks in the energy spectrum of scattered ions. It is shown that surface defects form corresponding peaks in the energy spectrum. The trajectories of scattered particles are also calculated. Our calculations have shown that the absence of an atom leads to a decrease in the number of collisions of incident particles with surface atoms.

Каримов Мухтор Каримбергенович, доцент, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, karimov_m_k@mail.ru.

Кутлиев Учкун Отобоевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физики Ургенчского государственного университета, Ургенч, Узбекистан, uchkunk@mail.ru.

Отабаев Мехрож Учкун угли, студент Ургенчского государственного университета, Ургенч, Узбекистан, uchkunk@mail.ru.

Отабаева Камола Учкун кизи, магистрант Ургенчского государственного университета, Ургенч, Узбекистан, uchkunk@mail.ru.

Давлетова Поишажон, магистрант Ургенчского государственного университета. Ургенч, Узбекистан, uchkunk@mail.ru.

Научный руководитель – *Кутлиев Учкун Отобоевич*, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физики Ургенчского государственного университета, Ургенч, Узбекистан, uchkunk@mail.ru.

УДК 535.391:621.376

Э. А. КАРПОВИЧ

РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА, ПОДВЕРГАЮЩЕГОСЯ ДЕЙСТВИЮ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА

Исследовалось воздействие излучения лазерного излучения умеренной интенсивности на образцы из полиметилметакрилата в условиях, приводящих к плазмообразованию при атмосферном давлении воздуха через некоторое время после начала лазерного воздействия. Проведены расчеты нагревания облучаемого участка плоской поверхности ПММА при различных значениях энергии отдельных пиков лазерного излучения. Определены времена воздействия, при которых происходит разложение на мономеры и, как следствие, испарение и возгорание облучаемого материала.

Моделирование изменения температуры на поверхности полиметилметакрилата (ПММА) под воздействием лазерных импульсов представляет собой решение уравнения теплопроводности на границе пятна фокусировки излучения.

Параметры теплофизических и оптических свойств полиметилметакрилата приняты при нормальных физических условиях окружающей среды: температура воздуха $T_0 = 293$ К, атмосферное давление $P = 10^5$ Па.

В таблице 1 представлены рассчитанные для энергии $E = (2-6)$ изменения температуры $\Delta T = T - T_0$ на границе пятна фокусировки излучения. Видно, что за время действия лазерного импульса температура T быстро возрастает до значений, превышающих температуру размягчения образца ПММА при $E = 4$ Дж и $E = 5$ Дж, а также достигает значения плавления полиметилметакрилата при энергии $E = 6$ Дж. В остальных случаях, в сторону уменьшения энергии лазерного излучения ($E = 2$ Дж и $E = 3$ Дж), наблюдается более умеренное, прогревание поверхности пластины.

Таблица 1 – Изменение температуры $\Delta T = T - T_0$ на границе пятна фокусировки излучения

E , Дж	2	3	4	5	6
ΔT , К	46,88908	70,33362	93,77817	117,2227	140,6672

Предполагается, что лазерные импульсы, нагревающие образец, подаются с интервалом $t = 1$ мкс, за это время область пятна фокусировки лазера остывает. В таблице 2 можно увидеть ряд значений количества лазерных импульсов, при которых на поверхности ПММА происходят размягчение, плавление и воспламенение, что позволяет рассуждать о деформациях материала, и изменение фазовых состояний с учётом охлаждения материала.

Таблица 2 – Количество импульсов n , приводящих к размягчению, плавлению и воспламенению ПММА при различных энергиях излучения

E , Дж	2	3	4	5	6
размягчение	$n = 2-3$	$n = 2$	$n = 1$	$n = 1$	$n = 1$
плавление	$n = 6-7$	$n = 3$	$n = 2$	$n = 2$	
горение	–	$n = 10$	$n = 4$	$n = 3$	$n = 2$

На рис. 1 и 2 представлены рассчитанные для $E = (2-6)$ Дж импульсные зависимости $\Delta T = T - T(t)$ с учётом охлаждения.

Анализируя рис. 1, можно наблюдать, что температура T достаточно медленно возрастает, а при подаче 10-го импульса временная зависимость ΔT стабилизируется, далее и вовсе остаётся неизменной, меняется только T_0 . Таким образом, после подачи 4-го импульса температура не опускается ниже температуры размягчения ПММА ($T_{\text{разм}} = 373$ К). После 6-го импульса находится в переменном фазовом состоянии, при подаче импульса полиметилметакрилат расплавляется ($T_{\text{плав}} = 433$ К), а при остывании возвращается в размягчённую зону.

На рис. 2 видим, что увеличение энергии лазерного излучения на 1 Дж ($E = 3$ Дж) приводит к более быстрому росту температуры до больших значений в сравнении с зависимостью выше, вплоть до температуры воспламенения образца. После подачи 5-го импульса температура находится выше зоны плавления, достигает температуры воспламенения ($T_{\text{гор}} = 533$ К) к 10-му импульсу и далее находится в переменном состоянии, не опускаясь ниже температуры плавления ПММА. Под конец воздействия лазерного импульса область фокусировки пятна лазерного излучения воспламеняется, после остывает до $T = 475$ К. Следует обратить внимание и на то, что при температуре, близкой к температуре горения материала, начинается обильное парообразование.

Очевидно, что скорость возрастания температуры T увеличивается с ростом энергии лазерного излучения.

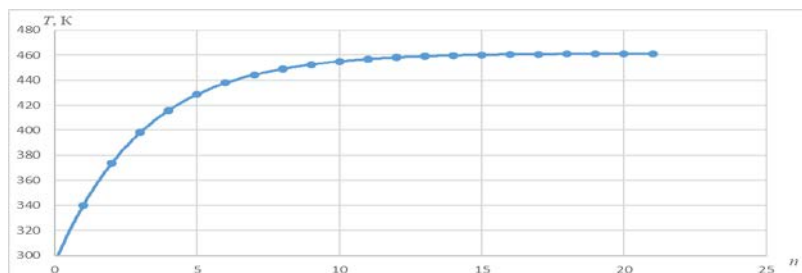


Рисунок 1 – Импульсная зависимость T на границе пятна фокусировки излучения ($E = 2$ Дж)

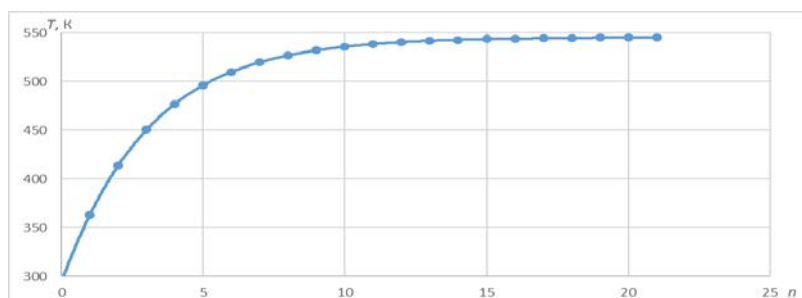


Рисунок 2 – Импульсная зависимость T на границе пятна фокусировки излучения ($E = 3$ Дж)

При энергиях лазерного импульса $E = (4-6)$ Дж расчёты показывают стремительный переход поверхности ПММА в состояние горения.

The effect of moderate-intensity laser radiation on poly(methyl methacrylate) samples under conditions leading to plasma formation at atmospheric air pressure some time after the start of laser exposure was studied. The heating of the irradiated area of a flat PMMA surface is calculated for different energies of individual laser radiation peaks. The exposure times were determined at which decomposition into monomers occurs and, as a result, evaporation and ignition of the irradiated material.

Карнович Эдгар Айварович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, knzmt3@mail.ru.

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

УДК 004.032.2

С. В. ЛУКАШЕВИЧ, А. С. ВОРОНКО

НЕЙРОСЕТЬ НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON

Рассматривается работа простейшей нейросети для анализа входных цифровых данных и её обучение методом обратного распространения ошибки. Метод обратного распространения ошибки, вероятно, самая фундаментальная составляющая нейронной сети.

Метод используется для эффективного обучения нейронной сети с помощью так называемого цепного правила (правила дифференцирования сложной функции). Проще говоря, после каждого прохода по сети обратное распространение выполняет проход в обратную сторону и регулирует параметры модели (веса и смещения). Алгоритм обратного распространения ошибки применяется для многослойной нейросети. После каждого цикла алгоритма мы будем реализовывать стохастический градиентный спуск, то есть будем подправлять веса после каждого обучающего примера и, таким образом, «двигаться» в многомерном пространстве весов. Чтобы «добиться» до минимума ошибки, нам нужно «двигаться» в сторону, противоположную градиенту, то есть, на основании каждой группы правильных ответов, добавлять к каждому весу.

Предположим, нам нужно обучить нейросеть прогнозировать значения выходных данных на основе входных. Обычно в обучении нейросетей используются вещественные числа. Используем матрицу из 0 и 1, где каждая строка – тренировочный пример. Столбцы – это входы. У нас получается 3 входа и 4 тренировочных примера. Нейросеть будет пытаться максимально близко определять значение дополнительного, четвёртого столбца. Обратное распространение, в самом простом случае, рассчитывает подобную статистику для создания модели.



Рисунок 1 – Блок-схема программы

Переменные, используемые в формулах ниже, где X – матрица входного набор данных; строки – тренировочные примеры, y – матрица выходного набора данных; строки – тренировочные примеры, $l0$ – первый слой сети, определённый входными данными, $l1$ – второй слой сети, или скрытый слой. $syn0$ – первый слой весов, **Synapse 0**, объединяет $l0$ с $l1$.

Рассмотрим работу программы в Python на основе блок-схемы. Предположим, мы имеем базу данных, из которой будем брать выборку для тренировки нейросети.

Для активации нейронов скрытого слоя используется сигмоидальная функция активации:

```
def nonlin(x, deriv = False):
    if(deriv == True):
        return f(x) * (1 - f(x))
    return 1/(1 + np.exp(-x))
```

Также за счёт неё выходные значения будут ограничены диапазоном от 0 до 1. Далее следует прямое распространение нейросети.

Функция прямого распространения в Python:

```
l0 = X
l1 = nonlin(np.dot(l0, syn0))
```

Заключительным шагом в прямом проходе является оценка прогнозируемого выходного значения относительно ожидаемого выходного значения, то есть расчёт ошибки:

```
l1_error = y - l1
```

Теперь, на основе значения ошибки нейросети, мы перемножаем это с значение с наклоном сигмоиды, чтобы изменить параметр входного в нужном направлении (в положительную или отрицательную сторону), и минимизировать значение ошибки $l1_{error}$:

```
l1_delta = l1_error * nonlin(l1, True)
```

$l1$ представляет три этих точки, а код выдаёт наклон линий, показанных ниже. Заметим, что при больших значениях вроде $x = 2.0$ (зелёная точка) и очень малые, вроде $x = -1.0$ (фиолетовая) линии имеют небольшой уклон. Самый большой угол у точки $x = 0$ (голубая). Это имеет большое значение. Также отметим, что все производные лежат в пределах от 0 до 1.

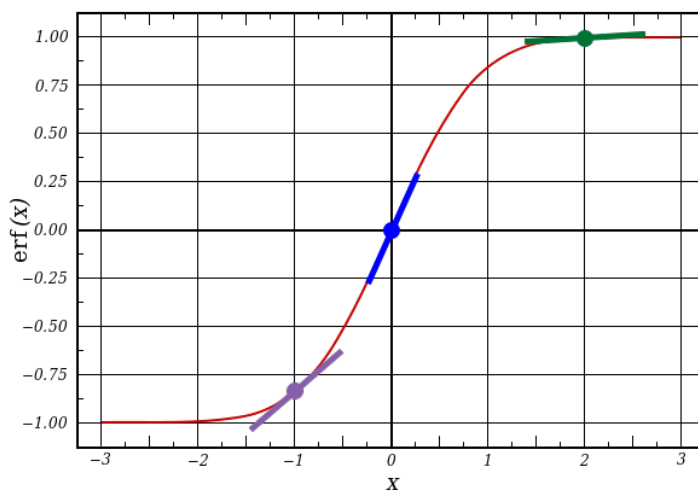


Рисунок 2 – Сигмоида с корректирующими линиями

Таким образом, мы уменьшаем ошибки предсказаний, сделанных с высокой вероятностью. Если наклон линии был небольшим, то в сети содержится либо очень большое, либо очень малое значение. Если догадка в сети близка к нулю ($x = 0$, $y = 0.5$), то она не особенно вероятная. Мы обновляем эти неуверенные предсказания и оставляем в покое предсказания с высокой вероятностью, умножая их на величины, близкие к нулю. Далее обновляем веса:

```
syn0 += np.dot(l0.T, l1_delta)
```

Цикл программы завершен. Понаблюдав за обновлением сети, вернёмся к нашим тренировочным данным. Когда и вход, и выход равны 1, мы увеличиваем вес между ними. Когда вход 1, а выход – 0, мы уменьшаем вес.

Выходные данные после тренировки:

```
[[0.00966449]
 [0.00786506]
 [0.99358898]
 [0.99211957]]
```

Изменение величины ошибки **l1_error**, как видим, её значение постепенно снижается:

```
Error:0.496410031903
Error:0.00858452565325
Error:0.00578945986251
Error:0.00462917677677
Error:0.00395876528027
Error:0.00351012256786
```

Таким образом, можно увидеть, что чем больше тренировочных циклов мы проводим, тем выше степень правильной классификации. А величина ошибки уменьшается. Так происходит обучение нейронной сети методом обратного распространения ошибки.

Список литературы

1. <https://habr.com/ru/post/271563>.
2. <https://python-scripts.com/intro-to-neural-networks>.
3. <https://www.youtube.com/watch?v=kUDOcI9anxU&t=167s>.
4. <https://mattmazur.com/2015/03/17/a-step-by-step-backpropagation-example>.

The work of the simplest neural network for the analysis of input digital data and its training by the method of back propagation of an error is considered. Backpropagation is probably the most fundamental part of a neural network.

Лукашевич Сергей Владимирович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

Воронко Александр Сергеевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Ассанович Борис Алиевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, bas@grsu.by.

УДК 536.8

Е. С. МОРОЗИК

УЧЕНИК КАК ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Работа посвящена изучению ученика учреждения общего среднего образования как физико-химической системы. Изучена структура энергозатрат школьника как тепловой машины, выполнен эксперимент по оценке величины расхода энергии. Составлен энергетический портрет ученика.

Ученик в школе сидит, перемещается шагом, бегает, бездельничает, иногда думает, иногда дерется. На все это организму требуется энергия. Как эта энергия распределяется между процессами по величинам? Разумеется, невозможно учесть все факторы, влияющие на функционирование данной системы, поэтому мы выбрали доступные нам по уровню понимания и интереса факторы.

В настоящем исследовании нас заинтересовал ученик как система с точки зрения физики. Между тем, даже с этой точки зрения ученик – сложнейшая физико-химическая система, изучение которой было, продолжается и никогда не закончится. Мы для исследования выбрали термодинамику.

Таким образом, целью работы стало исследование энергозатрат ученика как термодинамической системы.

Как известно, мощность суперкомпьютера, играющего в шахматы с гениальным шахматистом, – мегаватты, а мощность гроссмейстера, обыгрывающего этот компьютер, – не более двухсот ватт (яркая лампочка). И суперкомпьютер, и человек черпают энергию, преобразованную из теплоты. Поэтому работу и человека, и суперкомпьютера можно рассматривать с точки зрения тепловой машины.

Если поставить цель, то для суперкомпьютера можно рассчитать совершаемую им работу, поскольку все физические процессы в нем заложены разработчиками. Что же касается человека, то не у кого спросить, как действительно работает мозг и почему он так эргономичен?

Тем не менее поставленную перед собой задачу мы должны решать доступными средствами. Поэтому ученика рассмотрим как тепловую машину, совершающую механическую работу, потребляющую топливо в виде пищи.

Правильней сказать, что топливом являются углеводы и жиры, химическое разложение которых происходит с выделением теплоты. Теплота идет на изменение внутренней энергии и совершение работы.

Есть некоторое отличие технической тепловой машины от нашей. В нашем случае теплота появляется за счет уменьшения внутренней энергии в результате разложения жиров и углеводов:

$Q_1 = \Delta U'$, $\Delta U' = q \Delta M$, где q – удельная теплота реакции разложения жиров и углеводов, Дж/кг, а ΔM – изменение массы ученика.

Поэтому в нашем случае баланс энергии можно представить в следующем виде (принимаем, что внутреннюю энергию выделяемая теплота не изменяет, поскольку температура тела практически не изменяется – даже, когда человек реализует большие физические нагрузки, его температура не превышает 37 °С):

$Q_1 = Q_2 + A$, где $A = A_1 + A_2 + A_3$ – механическая работа (внешнее движение $A_{\text{н}}$, работа, связанная со всеми внутренними процессами в организме); Q_1 – энергия, выделяемая в результате разложения жиров и углеводов; Q_2 – это потери энергии (окружающая среда, трение, потери через дыхание и другие выделения).

На рисунке 1 представлена схема распределения мощности, генерируемой организмом.

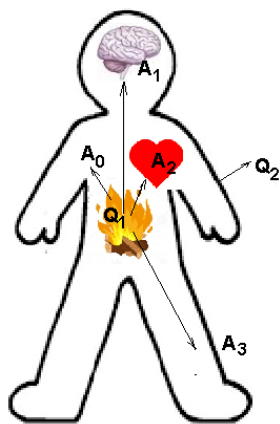


Рисунок 2 – Схема распределения мощности, генерируемой организмом

Нами была выполнена оценка величин Q_1 и Q_2 . Будем считать, что продолжительность цикла равна 1 с (примерное время вдоха-выдоха), поэтому все расчеты будем выполнять в единицах мощности.

По данным [1] на лекции по физике организм ученика вырабатывает мощность 150 Вт (соответствующая работа A), из них 80 Вт (A_0) – эта энергия в организме расходуется всегда, независимо от того ученик спит, бегает или сидит, 40 Вт (A_1) – работа мозга, 15 Вт (A_2) – работа сердца, 15 Вт (A_3) – работа, связанная с перемещением тела. Оттолкнемся от этих данных и введем для анализа соотношений энергий систему коэффициентов, которые назовем энергетическими коэффициентами ученика.

$$P_e = \frac{A}{Q_1}$$

Эта величина похожа на КПД цикла (работа к теплоте), где $A = A_0 + A_1 + A_2 + A_3$.

$$P_{e0} = \frac{A_0}{A}$$

Эта величина характеризует достаточно статичный параметр, который близок для всех учеников, и отражает внутренние трудно разделяемые затраты энергии.

$$P_{e1} = \frac{A_1}{A}$$

Эта величина характеризует долю энергии, приходящуюся на умственную работу ученика.

$$P_{e2} = \frac{A_2}{A}$$

Эта величина характеризует долю энергии, приходящуюся на внутреннюю механическую работу (сердце, кровеносная система) ученика.

$$P_{\text{вн}} = \frac{A_2}{A}$$

Эта величина характеризует долю энергии, приходящуюся на внешние механические системы.

С учетом введенных обозначений перепишем выражение:

$$Q_1 = Q_2 + A_0 + A_1 + A_2 + A_3 \quad (6)$$

Все дальнейшие расчеты будем выполнять в единицах энергии в расчете на единицу времени, т. е. в Вт.

Энергозатраты в организме ученика связаны с разложением жиров и углеводов с последующим выделением теплоты и продуктов реакции (в основном, вода и углекислый газ). Оценка энергии, выделяющейся при этих реакциях, может быть осуществлена по изменению массы тела ученика. Выделим в выражении (6) параметры, оценку величин которых мы сделали: Q_2, A_0, A_2, A_3 . Сосредоточимся на определении параметров Q_1 и A_1 .

С целью оценки величины, затрачиваемой энергии учеником на разные виды функционирования его энергопотребляющих подсистем, мы решили провести эксперимент над учениками ГУО «Лицей № 1 г. Гродно» и ГУО «Средняя школа № 7 г. Гродно». Энергетические затраты ученика мы условно разделили на два вида активности: умственную деятельность и физическую активность. Разумеется, может быть, и другая схема для анализа этих параметров, мы их выбрали с учетом наших возможностей и прозрачности эксперимента.

Всего в эксперименте были задействованы 60 учеников 10 и 9 классов ГУО «Лицей № 1 г. Гродно» и ГУО «Средняя школа № 7 г. Гродно». В общей сложности было выполнено 43 200 измерений.

Оценка параметра A_0 , характеризующего скорость основного обмена веществ в организме ученика в Вт, нами была выполнена в процессе ночного эксперимента. 53 лицеиста измеряли свой вес перед сном и после сна. Продолжительность сна принималась равной 12 часам.

Результаты ночного эксперимента привели нас к выводу о том, что выделенное тепло соизмеримо со скоростью обмена веществ в организме ученика: $A_0 = 80$ Вт с учетом потерь в окружающую среду.

Изучение энергозатрат ученика с учетом видов деятельности стало следующим этапом нашего эксперимента. Во время урока либо участия ученика в предметной олимпиаде двигательные функции минимальны, следовательно, затрачиваемая энергия идет на работу сердца и мозга ученика. Результаты изменения массы тела лицеистов в зависимости от их умственной деятельности на разных уроках, а также во время участия в предметной олимпиаде приведены в таблице 1.

Таблица 1

Урок	Изменение массы ученика, кг	Q1, Вт	Q2, Вт	A, Вт	Pe, %	A1, Вт	P1
Общее	0.019	139	40	99	71	22	0.20
Физкультура	0.022	161	40	121	75		
Олимпиада	0.022	162	40	122	75	48	0.38
Обществоведение	0.017	129	40	89	69	26	0.24
ЧЗС	0.016	120	40	80	67	28	0.26
Английский язык	0.021	154	40	114	74	26	0.25
Химия	0.019	137	40	97	71	11	0.12
Математика	0.017	129	40	89	69	29	0.27
Белорусская литература	0.019	141	40	101	72	23	0.22
Физика	0.018	131	40	91	70	12	0.13
Черчение	0.016	116	40	76	66	4	0.05
ДПО	0.019	143	40	103	72	2	0.02
Всемирная история	0.019	143	40	103	72	11	0.12

Нам было интересно также узнать существует ли разница затрат энергии от вида урока. Проведенные эксперименты привели нас к следующим выводам: 1) КПД (Pe) ученика велик по сравнению с термодинамическими циклами. По литературным данным доля энергетических затрат на внешнюю работу составляет от 10 до 20 %. Это значит, что преобразование тепловой энергии в организме ученика значительно эффективнее, чем в понятных нам термодинамических процессах; 2) умственная и механическая деятельности ученика по энергопотреблению соизмеримы; 3) для большинства предметов затраты энергии на интеллектуальную деятельность близки и это означает, что обычный урок соответствует среднему уровню затрат учеником энергии; 4) установлено, что резкое возрастание затрат энергии идет в случаях экстремального функционирования организма: олимпиада по физике и на уроках физкультуры; 5) не удалось выделить предмет, требующий наибольших затрат энергии на работу мозга.

Для оценки доли энергии приходящейся на внешнюю механическую работу мы выполнили эксперимент «лестница». Лицеист с помощью специального браслета измерял затраты калорий при подъеме по лестнице. Каждый эксперимент был выполнен в количестве 10 раз с учеником 10 класса, масса которого составляла на момент проведения эксперимента 71 кг. Подъем осуществлялся на высоту 9 м. Полученные данные привели нас к следующим выводам: 1) значение механического КПД согласуется с результатами других авторов; 2) согласуются потери теплоты в окружающую среду с учетом того, что и при движении ученика коэффициент теплоотдачи увеличивается.

Вместо заключения отметим, что нами исследована проблема энергетических затрат в организме ученика как тепловой машины. На основании термодинамических представлений предложена система энергетических коэффициентов, с учетом которых можно осуществить оценку умственной деятельности ученика с помощью физических параметров. Составлен энергетический портрет ученика (таблица 2).

Таблица 2

$Q_1 \text{ Вт}$	$Q_2 \text{ Вт}$	$A \text{ Вт}$	$P_e \%$
116–162	40–70	76–122	66–75
$A_0 \text{ Вт}$	$A_1 \text{ Вт}$	$A_2 \text{ Вт}$	$A_3 \text{ Вт}$
80–86	46	15	0
	$P_{e1} \%$	$P_{e2} \%$	$P_{e3} \%$
	38–60	12–20	0

На умственную деятельность ученика независимо от учебного предмета тратится примерно соизмеримая энергия. Однако в условиях экстремально-стрессовой ситуации в организме идет заметное превышение энергозатрат. При этом мы считаем, что данные затраты идут на умственную работу ученика.

Дальнейшие исследования энергетической эффективности работы головного мозга человека и организма в целом, по нашему мнению, могут открыть новые горизонты в технологической отрасли для повышения эффективности преобразования тепловой энергии.

Список литературы

- Орир, Дж. Физика / Дж. Орир. – М., 1981. – Т. 1. – 336 с.

In this work, the problem of energy consumption in the body of a student as a physicochemical system is investigated. The structure of energy consumption of a schoolchild as a heat engine was studied, an experiment was carried out to estimate the magnitude of energy consumption. Compiled energy portrait of the student.

Морозик Егор Сергеевич, учащийся ГУО «Лицей № 1 г. Гродно», Гродно, Республика Беларусь, egor.mrz04@gmail.com.

Научные руководители – Никитин Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nik@grsu.by.

Маслов Игорь Сергеевич, учитель физики высшей квалификационной категории, директор ГУО «Лицей № 1 г. Гродно», Гродно, Республика Беларусь, imaslov@mail.ru.

УДК 530.1

Д. А. ОШУРКО, Н. А. ПАВЛОВА

МЕТОДЫ МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАНОНИЧЕСКОГО АНСАМБЛЯ

Разработаны алгоритм и программа расчета статистической суммы неидеальных систем с использованием полуэмпирических потенциалов межмолекулярного взаимодействия. Для сравнения результатов расчета используются методы молекулярной динамики и Монте-Карло. Разработаны алгоритмы реализации этих методов, составлена программа и выполнены вычислительные эксперименты по определению параметров системы (координаты, скорости, энергия). На примере энергии показано, что оба метода дают аналогичные результаты.

Основная задача статистической физики – определение статистической суммы системы. Аналитические методы ее определения неприемлемы, поскольку связаны с непреодолимыми вычислительными трудностями. Методы Монте-Карло с появлением вычислительных машин становятся наиболее рациональным способом расчетов. В данной работе поставлена задача разработать алгоритм и программу расчета статистической суммы

систем, взаимодействие между частицами, в которых задается полуэмпирическими потенциалами. Полученные результаты сравниваются с результатами, полученными методом молекулярной динамики.

Основная роль статистической суммы заключается в определении средних значений параметров системы. В рамках молекулярной динамики – это простая задача, поскольку в любой момент времени известны координаты и импульсы частиц (атомы, молекулы) системы [1]. Кроме того, имеется возможность определения кинетических коэффициентов системы (процессы переноса). Метод Монте-Карло дает возможность только определить средние по ансамблю значения. Однако метод Монте-Карло достаточно прост и более производителен по сравнению с методами молекулярной динамики.

Сначала рассмотрим метод молекулярной динамики на примере неидеального газа. Уравнения атомов имеют вид:

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_i &= F_{xi} \\ m\ddot{y}_i &= F_{yi} \end{aligned}$$

где F_{xi}, F_{yi} – компоненты силы, действующей на i -й атом.

Начальные условия можно выбрать произвольно. Например, принять все скорости атомов равными нулю. Начальные координаты также можно выбрать произвольно.

Будем ориентироваться на потенциал Ленарда-Джонса:

$$u_{ij} = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r_{ij}} \right)^6 \right] \quad (1)$$

где ε, σ – табулированные для определенного вещества параметры потенциала.

Силу взаимодействия между частицами получим, взяв производную по координате от потенциала:

$$\frac{\partial u_{ij}}{\partial r_{ij}} = 24\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r_{ij}} \right)^6 \frac{1}{r_{ij}} - 2 \left(\frac{\sigma}{r_{ij}} \right)^{12} \frac{1}{r_{ij}} \right] \quad (2)$$

Используем новую систему единиц в соответствии с определениями массы, длины, энергии, времени, скорости, ускорения и силы.

$$\text{основные: } m_0 = m - \text{масса атома}, l_0 = \sigma, E_0 = \varepsilon,$$

$$\text{производные: } \tau_0 = (m_0 \cdot \sigma^2 / 2\varepsilon)^{0.5}, v_0 = \sigma / \tau_0, a_0 = \sigma / \tau_0^2.$$

Сделаем оценку этих величин, выразив их в системе СИ. Значения возьмем, ориентируясь на аргон.

основные:

$$m_0 = 74 \cdot 1.66054 \cdot 10^{-27} = 1.2287996 \cdot 10^{-25} \text{ кг};$$

$$l_0 = \sigma = 3.542 \cdot 10^{-10} \text{ м};$$

$$E_0 = \varepsilon = 93.3 \cdot 1.380685 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} = 1.288179105 \cdot 10^{-21} \text{ Дж};$$

производные:

$$\tau_0 = (m_0 \cdot \sigma^2 / 2\varepsilon)^{0.5} = 1.135 \cdot 10^{-12} \text{ с};$$

$$v_0 = \sigma / \tau_0 = 312 \text{ м/с};$$

$$a_0 = \sigma / \tau_0^2 = 3.6386 \cdot 10^{-15} \text{ м/с}^2$$

$$F_0 = \sigma m_0 / \tau_0^2 = 4.472 \cdot 10^{-40}$$

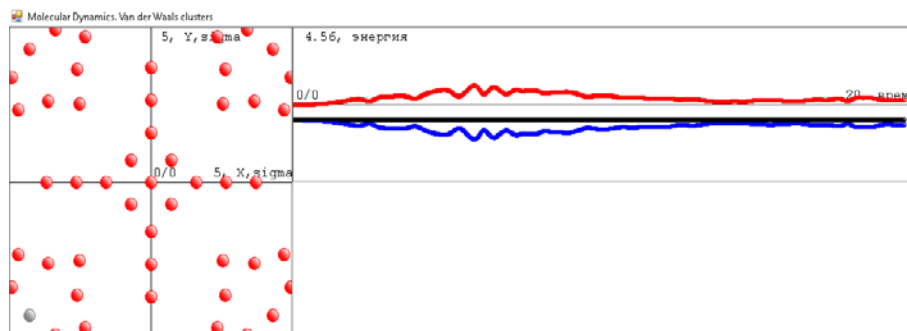
Введем относительные параметры в соответствии с принятыми единицами измерения:

$$m'_i = m_i / m_0; R_{ij} = r_{ij} / \sigma; U_{ij} = u_{ij} / \varepsilon; \tau' = \tau / \tau_0$$

Тогда силу взаимодействия двух атомов можно представить в виде:

$$\frac{\partial U_{ij}}{\partial R_{ij}} = \frac{24}{R_{ij}} \left[\left(\frac{1}{R_{ij}} \right)^6 - 2 \left(\frac{1}{R_{ij}} \right)^{12} \right]$$

Уравнения движения частиц решены численным методом Эйлера и реализованы в виде приложения. Исходными данными являются число атомов, вид потенциала взаимодействия, начальные дистанции между атомами, начальные скорости. Кроме того, можно задавать параметры интерфейса.



Черная линия – полная энергия системы, синяя – потенциальная энергия, красная – кинетическая энергия.

Рисунок 1 – Метод молекулярной динамики

На рис. 1 представлены результаты моделирования системы множества частиц методом молекулярной динамики. Начальная конфигурация частиц – регулярная решетка, начальные скорости равны нулю. Система по истечении некоторого времени приходит в равновесное состояние. Все параметры системы вычисляются в зависимости от времени. Этот метод удобен при небольшом числе атомов.

Рассмотрим аналогичную модель, реализуя ее методом Монте-Карло. Представим алгоритм реализации модели:

1. Задаем (произвольно) начальную конфигурацию атомов.
2. Определяем энергию системы E_s .
3. Случайным образом выбираем атом и смещаем его.
4. Вычисляем новое значение энергии системы E_{sm} .
5. Находим разность энергий $\Delta E = E_{sm} - E_s$.
6. Если $\Delta E \leq 0$, то конфигурация принимается, и переходим к шагу 10.
7. Если $\Delta E > 0$, вычисляем по Больцману вероятность изменения энергии системы: $W = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)$,

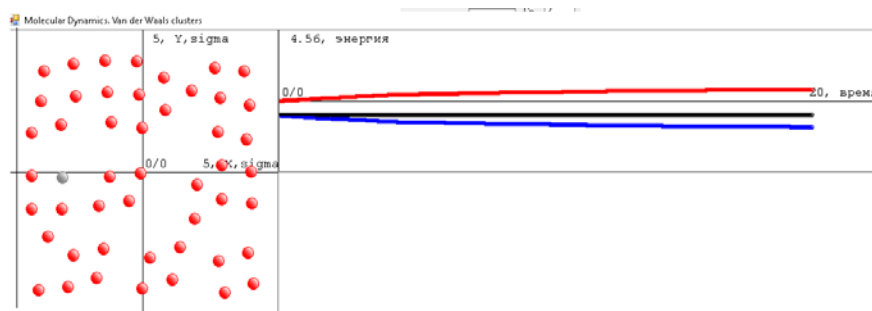
где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

8. Генерируем случайное число v .

9. Если $W \leq v$ и $\Delta E \leq E_d$, то конфигурация принимается, в противном случае конфигурация остается прежней.

10. Накапливаем значения энергии системы.
11. Переходим к пункту 3 (либо прерываем процесс)
12. Вычисляем средние значения энергии.

На рис. 2 представлены результаты моделирования системы частиц методом Монте-Карло. Начальная конфигурация частиц аналогична при использовании метода молекулярной динамики. Как видно из сравнения рис. 1 и рис. 2, для средних энергий системы получаются близкие результаты. Этот метод удобен при большом числе атомов.



Черная линия – полная энергия системы, синяя – потенциальная энергия, красная – кинетическая энергия.

Рисунок 2 – Метод молекулярной динамики

Список литературы

1. Никитин, А. В. Компьютерное моделирование физических процессов / А. В. Никитин, А. И. Слободянюк, М. Л. Шишаков. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2013. – 679 с.

An algorithm and a program for calculating the statistical sum of non-ideal systems using semi-empirical potentials of intermolecular interaction have been developed. To compare the results of the calculation, the methods of molecular dynamics and Monte Carlo are used. Algorithms for the implementation of these methods have been developed, a program has been drawn up and computational experiments have been carried out to determine the parameters of the system (coordinates, velocities, energy). The example of energy shows that both methods give similar results.

Оицурко Дарина Антоновна, студентка 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, dariutja@gmail.com.

Павлова Надежда Андреевна, студентка 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nadyusha.pavlova.02.02.02@mail.ru.

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nik@grsu.by.

УДК 537.8+541.67

Н. А. ПРУДНИКОВ, Н. Н. КРУК

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ДЛЯ АНАЛИЗА КОЛЬЦЕВЫХ ТОКОВ В МОЛЕКУЛЕ ПОРФИНА

При преобразовании макрогетероциклической молекулы порфина в соответствующую эквивалентную электрическую схему оценено перераспределение электронной плотности посредством анализа распределения кольцевых токов в пиррольных и пирролининовых кольцах. Проведены расчеты глобальных и локальных диаатропных и паратропных кольцевых токов посредством составления и решения системы линейных уравнений из интегрированных значений плотностей токов.

Анализ локальных и глобальных кольцевых токов представляет собой специфическую задачу, поскольку их нельзя измерить непосредственно. Однако известно, что локальные токи в разветвленных цепях можно рассчитать с помощью правил Кирхгофа [1]. Поэтому, если представить молекулу порфина в виде эквивалентной электрической схемы, то, составив в соответствии с правилами Кирхгофа систему линейных алгебраических уравнений и решив ее, возможно получить оценку ряда параметров и характеристик макрогетероциклических сопряженных молекул. Используя эквивалентную электрическую схему, возможно судить о локальных и глобальных кольцевых токах, ароматичности системы и степени делокализации электронов. В настоящей работе проводились испытания нового подхода к изучению ароматических кольцевых токов в макрогетероциклических молекулах, использующего разработку и анализ эквивалентной электрической схемы молекулы с привлечением результатов квантово-химических расчетов перераспределения электронной плотности.

Все взаимодействия в сопряженных молекулярных системах связаны с перераспределением электронной плотности, которое влияет на диаатропные и паратропные кольцевые токи в макрогетероциклических системах при воздействии внешнего магнитного поля. Поэтому можем представить макрогетероциклическую молекулу порфина в виде эквивалентной электрической схемы (рисунок 1).

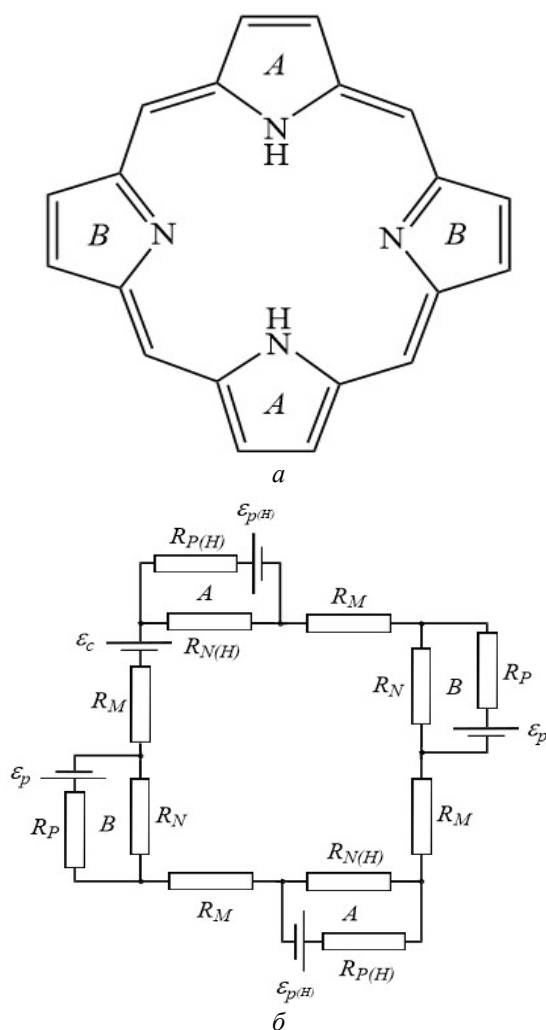


Рисунок 1 – Структурная формула свободного основания порфина (а) и эквивалентная электрическая схема (б)

Атомы и связи в молекуле представлены в качестве составных элементов. Совокупность элементов, вдоль которых течет единый ток, образует ветви, каждая из которых характеризуется своим значением сопротивления, зависящим от входящих в нее элементов. Как и «классическое» сопротивление, оно препятствует прохождению кольцевого тока через заданную ветвь молекулы. Под узлом будем понимать некий ограниченный в пространстве участок в молекуле, в котором соединяются три или более ветви.

Порфин является ароматической макрогетероциклической молекулой с 26 π -электронами, состоящей из четырех пиррольных колец, что соединены метиновыми мостиками. Для свободного основания порфина выполняется правило ароматичности Хюккеля, согласно которому молекула должна содержать в контуре ароматического сопряжения $(4n + 2)$ π -электронов [1]. Относительно недавно было показано, что атомы макроцикла вовлечены в формирование контура сопряжения в неравной степени и контуры могут включать 18 или 22 π -электронов [2, 3].

Анализируя расчеты порфина по методу GIMIC и ARCS [2–5], можно говорить о полном вкладе каждого из составляющих молекулу колец в макрогетероциклической системе, что позволяет разбить молекулу на отдельные замкнутые контуры сопряжения π -электронов.

Молекула свободного основания порфина имеет два пиррольных кольца А (рисунок 1). Идентичность в плане химического строения, результатов ^1H ЯМР спектров, длин связей, а также соответствие по величине и направлению как локальных, так и глобальных кольцевых токов прямо свидетельствует об их тождественности. Аналогичные доводы верны и для пирролениновых колец В (рисунок 1). Теоретические расчеты площади колец А и В показали расхождение менее чем на 0,3 % [3]. Вместе с малыми расхождениями в значениях локальных кольцевых токов это определяет равенство значений ЭДС индукции во всех локальных контурах А и В. Сравнивая внешние ветви (экзоциклические связи) пиррольных и пирролениновых колец на основании данных

^1H ЯМР, можно отметить отклонения химических сдвигов C_β -протонов не более чем на 0,6 %, а длин $\text{C}_\beta\text{C}_\beta$ связей – не более чем на 1,5 %.

Предполагая, что ток в пиррольных кольцах можно схематично изобразить, как показано на рисунке 2, имеем возможность после анализа получить дополнительную информацию о глобальных и локальных токах в пиррольных и пирролениновых кольцах.

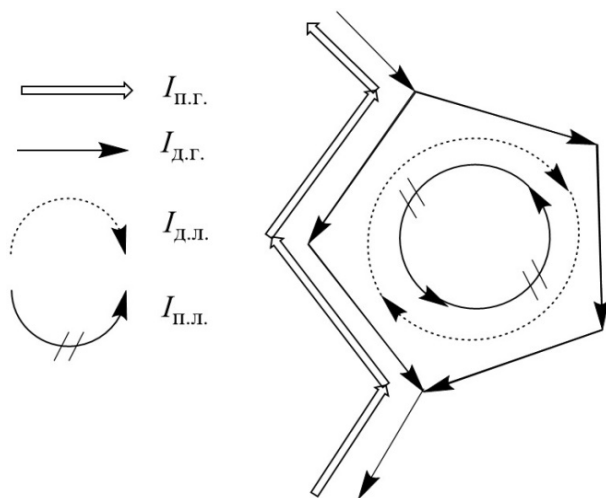


Рисунок 2 – Схема пиррольного кольца с предполагаемым распределением токов

Следует подчеркнуть изменение степени экранирования ядер, ЭДС индукции колец, сопротивлений ветвей и ряда других параметров эквивалентной электрической схемы за счет действия локальных и глобального паратропных токов, что позволяет дополнить вышеприведенную систему линейных уравнений с учетом действия локальных кольцевых токов каждого типа кольца.

Величина ЭДС индукции ε_c является расчетной величиной и связана с ЭДС индукции ε_p косвенно посредством интегрирования электронной плотности внутреннего замкнутого контура порфина и сравнения с таковым у его пиррольных колец. В результате интегрирования было замечено, что величина ε_c почти в 40 раз превышает модуль значения ε_p .

В результате система линейных уравнений имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} -I_{P(H)} \cdot R_{P(H)} + I_{N(H)} \cdot R_{N(H)} = \varepsilon_p, \\ -I_p \cdot R_p + I_N \cdot R_N = \varepsilon_p, \\ 4 \cdot I_M \cdot R_M + 2 \cdot I_N \cdot R_N + 2 \cdot I_{N(H)} \cdot R_{N(H)} = \varepsilon_c, \\ R_{P(H)} = R_p, \\ I_p + I_N = I_M, \\ I_{P(H)} + I_{N(H)} = I_M, \\ \varepsilon_p = 1,7 \cdot (R_b + R_N), \\ \varepsilon_p = 0,6 \cdot (R_b + R_{N(H)}), \\ \varepsilon_c = 40,4 \cdot \varepsilon_p. \end{array} \right. \quad (1)$$

Решение данной системы уравнений приведено в таблице 1.

Анализ представленных в таблице 1 данных показывает, что локализация большего кольцевого тока должна наблюдаться в случае меньшего сопротивления той или иной ветви. Так, сопротивление внутренней ветви пиррольного кольца почти в 2,9 раза выше сопротивления экзоциклических связей, что и обуславливает преимущественное протекание тока по внешней ветви. Сопротивления эндо- и экзоциклических связей в кольце В практически равны друг другу, в результате чего значительный вес приобретают локальные паратропные и диатропные кольцевые токи. Именно их действие оказывает большее протекание кольцевого тока через внутреннюю ветвь кольца, несмотря на большее значение сопротивления.

Таблица 1 – Величины кольцевых токов, сопротивлений и ЭДС индукции

Элемент в молекуле порфина	Величина	Значение, нА/Тл	Величина	Значение, нА/Тл	Величина	Значение, $\cdot 10^8$ Ом	Величина	Значение, $\cdot 10^{16}$ В
–	I_M	26,8	$I_{д.г.}$	30,2	R_M	2,305	ε_c	52,1
			$I_{п.г.}$	3,4				
Пиррол А	$I_{N(H)}$	7,9	$I_{(H)д.л.}$	2,9	$R_{N(H)}$	10,011	ε_p	1,29
	$I_{P(H)}$	18,9	$I_{(H)п.л.}$	3,5	R_P	3,503		
В	I_N	14,1	$I_{д.л.}$	2,5	$(R_{P(H)})$			
	I_P	12,7	$I_{п.л.}$	4,2	R_N	4,068		

В результате можно сделать вывод, что паратропные токи, противоположные по направлению токам по Кирхгофу, увеличивают сопротивления той или иной ветви, а одинаково направленные – уменьшают. Важной особенностью является преобладание паратропного тока над диатропным в кольцах А и В, характеризующее сами пиррольные и пирролениновые кольца в молекуле порфина как антиароматические составляющие.

Таким образом, в работе показано, что эквивалентная электрическая схема макрогетероциклических соединений позволяет адекватно описать перераспределение электронной плотности, найти действующие кольцевые токи и тем самым оценить степень ароматичности соединений, объяснить величину экранирующего и дезэкранирующего действия атомов. Показано, что немаловажную роль в формировании кольцевых токов играют паратропные локальные и глобальные токи. Обнаружены закономерности между протеканием циклических токов и структурными элементами ветвей, что позволит рассчитать более вероятные пути протекания циклических токов производных порфина. Найденные основные параметры эквивалентной электрической схемы свободного основания порфина позволят в дальнейшем использовать данную модель для приближенных расчетов ряда параметров его производных.

Список литературы

1. Крук, Н. Н. Строение и оптические свойства тетрапиррольных соединений / Н. Н. Крук. – Минск : БГТУ, 2019. – 216 с.
2. Fliegl, H. Aromatic Pathways of Porphins, Chlorins, and Bacteriochlorins / H. Fliegl, D. Sundholm // J. Org. Chem. – 2012. – Vol. 77, № 7. – P. 3408–3414.
3. The gauge including magnetically induced current method / H. Fliegl [et al.] // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2011. – Vol. 13, № 46. – P. 20500–20518.
4. Fliegl, H. Gauge-Origin Independent Calculations of the Anisotropy of the Magnetically Induced Current Densities / H. Fliegl, J. Juselius, D. Sundholm // J. Phys. Chem. A. – 2016. – Vol. 120, № 28. – P. 5658–5664.
5. Sundholm, D. Calculations of magnetically induced current densities: theory and applications: Calculations of magnetically induced current densities / D. Sundholm, H. Fliegl, R. Berger // Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Mol. Sci. – 2016. – Vol. 6, № 6. – P. 639–678.

By transforming the macroheterocyclic porphin molecule into the corresponding equivalent electrical circuit, the electron density redistribution was estimated by analyzing the distribution of ring currents in pyrrole and pyrrolenine rings. Calculations of global and local diatropic and paratropic ring currents were carried out by compiling and solving a system of linear algebraic equations from the integrated values of current densities.

Прудников Никита Андреевич, студент 5 курса факультета технологии органических веществ Белорусского государственного технологического университета, Минск, Республика Беларусь, mikita.prudnikov18@gmail.com.

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

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

УДК 539.2

А. В. САЗАНОВ

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И РОСТА В СИЛЬНО ПЕРЕОХЛАЖДЁННЫХ ГАЗОВЫХ ГИДРАТАХ

Газовые гидраты представляют собой пример молекулярного комплекса «хозяин–гость». Трехмерная решетка, построенная из молекул «хозяина», содержит в себе молекулы – «гости». Понимание механизмов образования подобных структур представляет важную задачу в физике конденсированного состояния.

В настоящий момент большое внимание исследователей привлекает изучение свойств газовых гидратов. Газовые гидраты представляют собой твердые растворы газов в воде, кристаллическая структура которых образована совокупностью соприкасающихся полостей-многогранников, в вершинах которых находятся молекулы воды, содержащих внутри одну или несколько молекул газа. Газовые гидраты образуются при низких температурах и высоких давлениях и в природе обнаруживаются в зонах вечной мерзлоты и на дне континентальных шельфов. Интерес к изучению данных соединений вызван перспективой их широкого практического применения в промышленности [1]. Так, предлагается использовать газовые гидраты для транспортировки и хранения газов, поскольку их плотность в составе гидратов близка к плотности газов в сжиженном состоянии. Кроме того, способность газовых гидратов в процессе своего роста вытеснять ионы из кристаллической решетки, может использоваться для очистки воды. Гидраты природных газов, в особенности, наиболее распространенный гидрат метана, играют большую роль в нефтегазовой промышленности по двум причинам. Во-первых, по имеющимся оценкам, запасы природного газа в форме гидрата, в энергетическом эквиваленте намного превышают запасы всех других типов углеводородов, однако еще не вполне развиты методы их извлечения. Во-вторых, термобарические условия на стенках газо- и нефтепроводов соответствуют условиям образования гидратов природных газов, которые нарастают на стенках труб, что ведет к снижению их пропускной способности и закупориванию. Природные газовые гидраты также могут рассматриваться как фактор возможного изменения климата, поскольку внезапная диссоциация гидрата метана на дне океана может привести к резкому выбросу метана в атмосферу, что вкупе с высокой парниковой активностью метана может внести большой вклад в глобальное потепление. Учитывая вышесказанное, является важным понимание процессов нуклеации, роста и диссоциации гидратов и условий, при которых они протекают. Метод классической молекулярной динамики хорошо применим для исследования процессов нуклеации, поскольку этот процесс имеет пространственные и временные масштабы порядка нанометров и сотен наносекунд, характерные для упомянутого метода.

В настоящей работе представлены результаты молекулярно-динамических исследований зарождения (нуклеации) и кристаллизации гидрата метана из двухфазной системы метан-вода при температуре 250 К и давлении 50 МПа. Исследуемая система состояла из 2944 молекул воды, моделируемых потенциалом межмолекулярного взаимодействия TIP4P/Ice [2] и 512 молекул метана, взаимодействие между которыми осуществлялось посредством потенциала OPLS United Atom [3]. Перекрестное взаимодействие между водой и метаном осуществлялось с использованием потенциала Леннард-Джонса, где параметры взаимодействия находились по правилу смещения Лоренца-Бертло [4, 5]. Сильное взаимодействие между водой и метаном в настоящей работе приводит к тому, что молекулы метана из газовой фазы могут быстро переходить в водную фазу с образованием пересыщенного раствора на начальной стадии, увеличивая вероятность зародышеобразования и скорость образования гидратов. Установлено, что в начальных конфигурациях с низким содержанием метана скорость зарождения и роста гидратов была низкой, что в большей степени способствовало образованию кристаллогидратов. В конфигурациях с низким содержанием метана кристаллические домены sI, кристаллические домены sII и поликристаллические структуры с сосуществованием sI-подобных и sII молекулярных комплексов-кластеров наблюдались явно. Результаты моделирования демонстрируют, что при достаточно высоких переохлаждениях в системе метан-вода все еще могут образовываться кристаллические формы гидрат метана⁵.

Список литературы

1. Michalis, V. K. Prediction of the phase equilibria of methane hydrates using the direct phase coexistence methodology / V. K. Michalis, J. Costandy, I. N. Tsimpanogiannis // J. Chem. Phys. – 2015. – № 142.
2. A potential model for the study of ices and amorphous water: TIP4P/Ice / J. L. F. Abascal [и др.] // J. Chem. Phys. – 2005. – № 122.
3. Jorgensen, W. L. Optimized Intermolecular Potential Functions for Liquid Hydrocarbons / W. L. Jorgensen, J. D. Madura, C. J. Swenson // J. Am. Chem. Soc. – 1984. – Т. 106, № 22. – С. 6638–6646.
4. Lorentz, H. A. Ueber die Anwendung des Satzes vom Virial in der kinetischen Theorie der Gase / H. A. Lorentz // Annalen der Physik. – 1881. – Т. 248, № 1. – С. 127–136.
5. Berthelot, D. Sur le mélange des gaz / D. Berthelot // Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences. – 1898. – № 126. – С. 1703–1855.

The class of solid compounds called gas hydrates are an example of so called «host-guest» molecular complexes. A three-dimensional lattice, formed by «host» molecules contains «guest» molecules within its volume. Understanding of the mechanisms laying behind forming of such structures represents an important problem in the field of condensed-matter physics.

Сазанов Андрей Владимирович, магистрант Института физики Казанского федерального университета, Казань, Российская Федерация, sazanov.andrei1998@gmail.com.

Научный руководитель – Хуснутдинов Рамиль Миннегазович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры вычислительной физики Казанского федерального университета, Казань, Российская Федерация, khrm@mail.ru.

⁵Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 22-22-00508).

Х. САПАРОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА САМОРАЗОГРЕВА В МОП ТРАНЗИСТОРЕ С РАЗЛИЧНЫМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ РАЗМЕРАМИ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО ДИХАЛЬКОГЕНИДА МОЛИБДЕНА

3D моделируется эффект саморазогрева в МОП транзисторах на основе двумерного дихалькогенида молибдена с различными длинами затвора. Показано, что с увеличением длины затвора температура в середине канала уменьшается. Наблюдаемое уменьшение температуры связывается с увеличением площади контакта канала с окружающим диэлектрическим слоем.

Одним из перспективных двумерных материалов, которые являются потенциально возможными для применения в полевых транзисторах с изолированным затвором, являются дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) [1, 2, 3]. Несмотря на то, что работы в этом направлении находятся на начальной стадии, к настоящему моменту уже есть как экспериментальные работы по изготовлению полевых транзисторов [4], так и работы, связанные с моделированием характеристик транзисторов на основе двумерных материалов [2].

В некоторых работах показано, что транзисторы на основе структур металл-оксид-полупроводник (МОП) с каналом из двумерных ДПМ проявляют сравнительно большую стойкость к короткоканальным эффектам, то есть имеют сравнительно малые величины DIBL-эффекта (уменьшение потенциального барьера, индуцированное стоком) и SS (наклон подпороговой передаточной характеристики) [2]. Но одним из недостатков таких транзисторов может быть то обстоятельство, что канал транзистора обычно как сверху, так и снизу граничит с оксидным слоем, имеющим сравнительно малые величины теплопроводности. Верхний оксидный слой представляет собой подзатворный оксидный слой, а нижний является обратным оксидным слоем. Это обстоятельство может привести к уменьшению теплоотвода из канала, выделяющегося при прохождении тока, которое может привести к локализации фононов в канале. Это обстоятельство может вызвать эффект саморазогрева, который будет влиять на токовые характеристики транзистора. Поэтому одной из важных задач нанoeлектроники является исследование эффекта саморазогрева в МОП транзисторах на основе двумерных материалов (2D МОПТ).

Одним из наиболее исследованных двумерных материалов являются дихалькогениды переходных металлов, в частности дихалькогенид молибдена, поэтому в данной работе проводится двумерное моделирование эффекта саморазогрева в МОПТ на основе двумерного MoS_2 (рис. 1а). Рассматривается зависимость эффекта саморазогрева от длины затвора.

Канал моделируемого транзистора, состоящий из монослойного MoS_2 , имеет толщину 0.65 нм. Рассматривался алюминиевый затвор толщиной 2 нм и длинами $L_g = 20, 30, 50$ и 100 нм при длинах всего канала 60, 90, 150 и 300 нм соответственно. Толщина обратного оксидного слоя SiO_2 равна 80 нм.

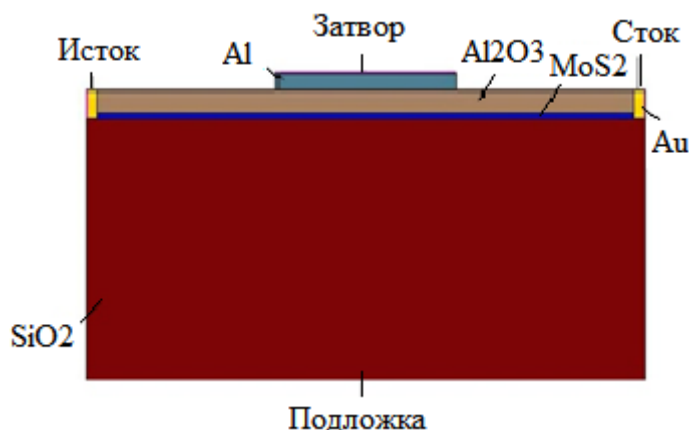


Рисунок 1 – Структура моделируемого МОП транзистора на основе двумерного MoS_2

Двумерное моделирование проводилось с использованием программы TCADSynopsysSentaurus. При этом были использованы параметры материала и моделирования, показанные в таблице 1, взятые из работ [5, 2]. В транспорте рассматриваемой структуры не учитывалось прямое туннелирование носителей от истока к стоку, потому что квантово-механическое моделирование, проведенное в работе [6], показывает, что в транспорте носителей от истока к стоку этот механизм не является доминирующим.

Таблица 1 – Параметры двумерного MoS_2 и параметры моделирования, использованные при моделировании переходной характеристики МОП транзистора на основе двумерного MoS_2

Ширина запрещенной зоны (эВ)	Относительная диэлектрическая проницаемость	Подвижность электрона при низком поле, ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	β , параметр в зависимости подвижности от поля	Работа выхода электрона, (эВ)	V_{sat} , скорость насыщения носителей, (cm/s)	Эффективная масса (m_0)
1.8	3	125	1.6	4.18	1.075×10^7	0.463

Учитывая, что длина транзистора (расстояние от истока до стока) и длина затвора достаточно большие, для рассмотрения эффекта саморазогрева использовалась термодинамическая модель транспорта. При этом за основу взяты как параметры, использованные при калибровке переходной характеристики, так и термодинамические параметры двумерного MoS_2 . Предполагая, что температура транзистора при работе имеет значения большие, чем 300 К и учитывая, что согласно результатам работы [7] в диапазоне температур выше 300 К, теплопроводность и теплоемкость изменяются очень слабо, в термодинамической модели использованы их значения, равные соответственно $34 \frac{\text{W}}{\text{K} \cdot \text{m}}$ [10, 11] и $24 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [7].

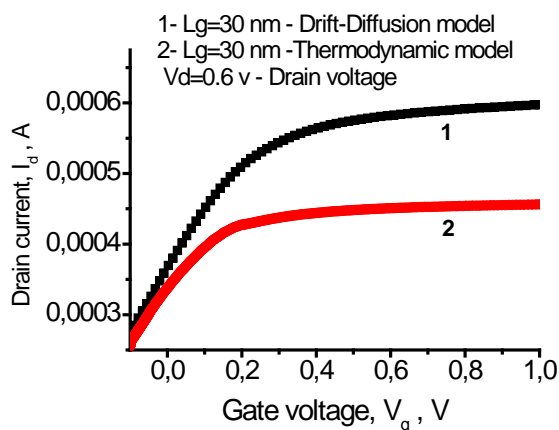


Рисунок 2 – Переходная характеристика МОП транзистора на основе 2D MoS_2 , полученная без учёта (кривая 1) и с учётом эффекта саморазогрева с использованием термодинамической модели транспорта (кривая 2)

На рисунке 2 приведены типичные переходные вольтамперные характеристики транзистора без учета и с учетом саморазогрева для транзистора с длиной затвора 30 нм. Наблюдаемое изменение ВАХ, согласно [8], связано с изменением подвижности носителей и емкости связи затвор-исток, вызванного повышением температуры канала. На рисунке 3 приведено распределение температуры вдоль канала транзистора.

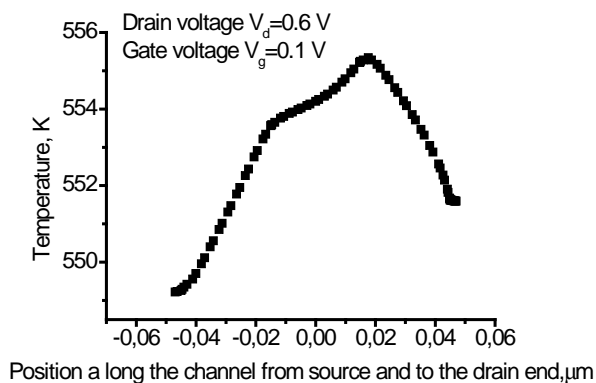


Рисунок 3 – Распределение температуры в центре вдоль канала при полном покрытии канала слоем Al_2O_3

Разница температур около истока и стока связана с увеличением кинетической энергии электронов около стока при их транспорте от истока к стоку под действием поля между истоком и стоком. Горизонтальная ступенька, проявляющаяся в середине канала, соответствующая подзатворной области, связана с большей скоростью отвода тепла через затвор в середине канала.

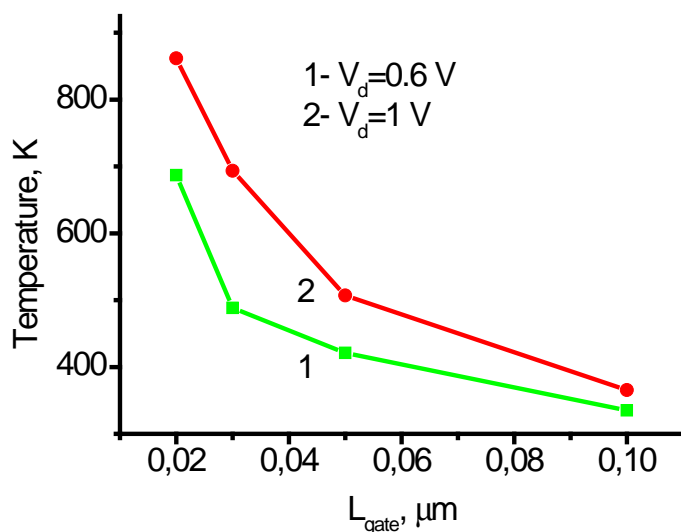


Рисунок 4 – Зависимость температуры в середине канала от длины затвора, при напряжениях на стоке 0.6 и 1.0 В

Зависимость температуры в середине канала от длины затвора приведена на рисунке 4.

Видно, что с увеличением длины затвора температура в середине канала уменьшается. Величина напряжения сток-исток в этих случаях не изменялась, и поэтому кинетическая энергия электронов, ответственная за генерацию тепла, не изменяется при увеличении длины канала. Следовательно, основным фактором, приводящим к уменьшению температуры в канале, является увеличение площади контакта канала с диэлектрическими слоями, через которые рассеивается тепло.

Список литературы

1. Jiahao Kang, Wei Liu, and Kaustav Banerjee. Appl. Phys. Lett. High-performance MoS₂ transistors with low-resistance molybdenum contacts. (2014) 104, pp. 093106 – 1–5.
2. Zhansong Geng. Simulation von Grafen-Nanoribbon-und MoS₂ Transistoren. Masterarbeit. TU Ilmenau, 2016, pp. 3–84.
3. Gianluca Fiori, Francesco Bonaccorso, Giuseppe Iannaccone, Tomás Palacios, Daniel Neumaier, Alan Seabaugh, Sanjay K. Banerjee and Luigi Colombo. Nature nanotechnology. Electronics based on two-dimensional materials, october 2014, vol. 9, pp. 768–779.
4. H. Fang, S. Chuang, T. C. Chang, K. Takei, T. Takahashi, and A. Javey. Nano Letters. High-Performance Single Layered WSe₂ p-FETs with Chemically Doped Contacts, 2012, vol. 12, pp. 3788–3792.
5. Cedric Nanmeni Bondja, Zhansong Geng, Ralf Granzner, Jörg Pezoldt and Frank Schwier. Electronics. Simulation of 50-nm Gate Graphene Nanoribbon Transistors. 2016, 5,3, pp.1–17; doi:10.3390/electronics5010003.
6. S. Thiele, W. Kinberger, R. Granzner, G. Fiori, F. Schwier, Solid State Electronics. The prospects of transition metal dichalcogenides for ultimately scaled CMOS. (2018), 143, pp. 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2017.11.004>.
7. Dipankar Sahan, Santanu Mahapatra. Analytical insight into the lattice thermal conductivity and heat capacity of monolayer MoS₂. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physe.2016.01.013>. September 2016. Vol. 83. P. 455–460.
8. Rajeev Pankaj Nelapati, Sivasankaran K. Microelectronics Journal. Impact of self-heating effect on the performance of hybrid FinFET. (2018), 76, pp. 63–68.

In this paper it is considered simulation of the self heating effect in the transistors based on two dimensional molybdenum dichalcogenides with different gate length. It is shown that with increasing the gate length the temperature of the center of the channel is increased. It is connected with increasing the contact area of the channel with gate and back oxide layers.

Сапаров Хушнуд, докторант Ургенчского государственного университета, Ургенч, Узбекистан, xushnodbek.saparov@gmail.com.

Научный руководитель – Атамуратов Атабек Эгамбердиевич, доктор физико-математических наук, доцент, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, atabek.atamuratov@urdu.uz.

А. О. СТРЕЧКО

РАДИАЦИОННОЕ РАСПУХАНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ И ЕГО КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Данная работа посвящена анализу пористости, размеров пор и их распределения в облученных многокомпонентных сплавах HfNbTiZr и V-4Cr-4Ti по серии изображений с помощью алгоритмов компьютерного зрения. Результаты обнаруживают, что величины распухания и среднего размера пор для сплавов V-4Cr-4Ti и HfNbZrTi составили 6,8 и 13,8 % и ~2,2 и ~3 нм, соответственно. Последнее предполагает, что сплав HfNbTiZr может быть подвержен большему радиационному распуханию, чем сплав V-4Cr-4Ti.

Оценка пористости материалов играет очень важную роль в изучении механизмов радиационного распухания и порообразования [1, 2]. Современные инструменты и информационные технологии позволяют проводить качественный и количественный анализ с очень большой точностью, благодаря чему мы можем получить больше информации для лучшего понимания радиационной физики материалов. Создание и совершенствование инструментария для радиационной физики твёрдого тела может помочь продвинуться в решении актуальных проблем, а также открыть горизонты для новых. Важную роль в этом направлении играют технологии искусственного интеллекта, которые позволяют компьютерным системам повторять некоторые функции, свойственные мышлению человека. В данной работе практическая применимость искусственного интеллекта заключалась в распознавании и выделении объектов, сборе статистики, распределении объектов по групповым диапазонам. В качестве объекта исследований выбраны перспективный тугоплавкий сплав HfNbTiZr [3] и эталонный ванадиевый сплав V-4Cr-4Ti для реакторного применения. Целью настоящей работы являлась разработка программы для анализа изображений и последующее сравнительное исследование радиационной стойкости рассматриваемых сплавов HfNbTiZr и V-4Cr-4Ti.

Образцы сплавов облучались при одинаковых условиях: ионы He, энергия 40 кэВ, флюенс 10^{17} см⁻², комнатная температура. Для анализа использовались изображения просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ-изображения). Программа для анализа изображений разработана на основе библиотеки компьютерного зрения OpenCV [4]. Преимущество разработанной программы заключается в возможности выводить статистику объектов по групповым размерным диапазонам в зависимости от выбранного канала порогового изображения. Основные этапы обработки изображений включают:

1. Установление размерной величины.
2. Установление порогового изображения.
3. Фильтрация изображения с помощью медианной функции сглаживания.
4. Использование собственного алгоритма фильтрации изображения от шума при необходимости. В данном случае создается специальная сканирующая маска для поиска шумовых точек.
5. Нахождение границ и выделение объектов на изображении.
6. Формирование массива размеров объектов и их графическая интерпретация.

На рисунках 1 и 2 показаны ПЭМ-изображения, а также гистограммы распределений пор по размерным группам, полученных с помощью разработанной программы, для рассматриваемых сплавов V-4Cr-4Ti и HfNbTiZr, соответственно.

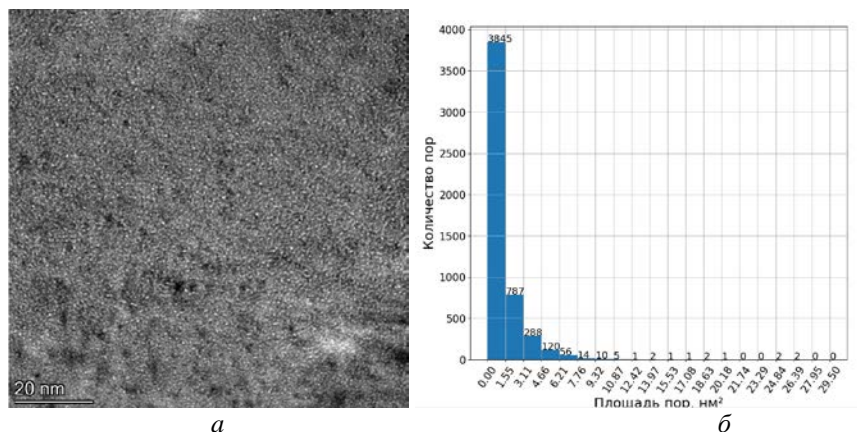


Рисунок 1 – ПЭМ-изображение сплава V-4Cr-4Ti (а) и групповое распределение пор по размерам для данного ПЭМ-изображения (б)

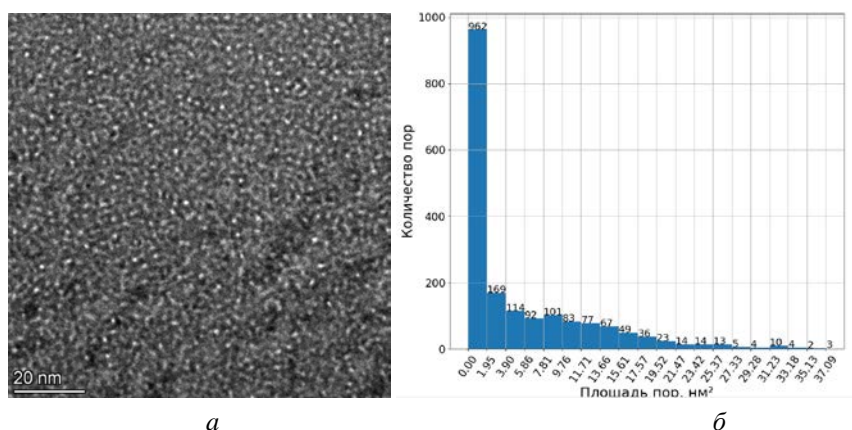


Рисунок 2 – ПЭМ-изображение сплава HfNbTiZr (а) и групповое распределение пор по размерам для данного ПЭМ-изображения (б)

На основании полученных данных были оценены величины распухания и среднего размера пор для сплавов V-4Cr-4Ti и HfNbZrTi, которые составили соответственно 6,8 и 13,8 % и ~1,1 и ~1,5 нм. Последнее свидетельствует о большей предрасположенности сплава HfNbZrTi к радиационному распуханию. Предметом дальнейших исследований являются кинетические и температурные зависимости параметров пор в рассматриваемых сплавах.

Список литературы

1. Effects of compositional complexity on the ion-irradiation induced swelling and hardening in Ni-containing equiatomic alloys / K. Jin [et al.] // Scripta Materialia. – 2016. – № 119. – P. 65–70.
2. Jin K. and Bei. Single-Phase Concentrated Solid-Solution Alloys: Bridging Intrinsic Transport Properties and Irradiation Resistance. Front. Mater. 5:26 (2018).
3. Miracle, D. B. A critical review of high entropy alloys and related concepts / D. B. Miracle, O. N. Senkov // Acta Materialia. – 2017. – № 122. – P. 448–511.
4. OpenCV Documentation [Electronic resource]. – Mode of access: <https://docs.opencv.org/>.

This work is devoted to the analysis of porosity, pore sizes and their distribution in irradiated HfNbTiZr and V-4Cr-4Ti multicomponent alloys from a series of images using computer vision algorithms. The results show that the values of swelling and average pore size for V-4Cr-4Ti and HfNbZrTi alloys were 6,8 and 13,8 % and ~1,1 and ~1,5 nm, respectively. The latter suggests that the HfNbTiZr alloy may be subject to more radiation swelling than the V-4Cr-4Ti alloy.

Стречко Артём Олегович, студент 5 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, grontgront@gmail.com.

Научный руководитель – Углов Владимир Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твёрдого тела Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, Uglov@bsu.by.

УДК 538.913

А. Р. ФАРХУТДИНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ЛЕННАРД-ДЖОНСА ПРИ НИЗКИХ СКОРОСТЯХ ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ И РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

Разработаны алгоритмы получения функций радиального распределения частиц в случае охлаждения системы Леннард-Джонса при низких скоростях охлаждения методами регрессионного анализа.

Скорость охлаждения γ , используемая при моделировании процессов охлаждения системы классическими методами молекулярной динамики, обычно составляет $\sim 10^{12}$ К/с. Однако, максимальные экспериментально измеренные скорости охлаждения γ не превышают значений $\sim 10^8$ К/с. Таким образом, классические методы оказываются неэффективными при моделировании системы в условиях эксперимента. Целью данной работы является разработка методики, позволяющей предсказать характеристики системы в будущие моменты времени на основе результатов относительно небольшого числа итераций моделирования процесса охлаждения при условиях, близких к реальным.

Рассматривается система из $N = 1372$ частиц, взаимодействие между которыми описывается потенциалом Леннарда-Джонса [1]:

$$U(r_{ij}) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r_{ij}} \right)^6 \right], \quad (1)$$

где r_{ij} – расстояние между частицами i и j . Температура системы меняется в диапазоне от $1.3\epsilon/k_B$ до $10^{-4}\epsilon/k_B$. Плотность системы $\rho \approx 0.75\sigma^{-3}$ поддерживается постоянной. Интегрирование уравнений движения осуществляется с помощью скоростного алгоритма Верле [2] с временным шагом $\Delta t = 0.005\tau = 0.005\sigma(m/\epsilon)^{1/2}$, где m – масса частицы. Скорость охлаждения γ принимает значение $\gamma = 4 \cdot 10^{-4} \epsilon/k_B \tau \sim 10^{10} \text{ K/с}$.

Для некоторых температур из указанного диапазона вычислялась функция радиального распределения частиц [3]:

$$g(\mathbf{r}) = \frac{2V}{N^2} (\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j>i}^N \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{ij})). \quad (2)$$

Полученные результаты использовались в качестве тренировочных данных при обучении различных регрессионных моделей.

Обученная модель позволяет получить функцию радиального распределения частиц для заданной температуры, не прибегая к моделированию классическими методами молекулярной динамики⁶.

Список литературы

1. Jones, J. E. On the Determination of Molecular Fields. I. From the Variation of the Viscosity of a Gas with Temperature / J. E. Jones // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1924. – Vol. 106. – P. 441.
2. A computer simulation method for the calculation of equilibrium constants for the formation of physical clusters of molecules: Application to small water clusters / W. C. Swope [et al.] // J. Chem. Phys. – 1982. – Vol. 76. – P. 637.
3. Rapaport, D. C. The Art of Molecular Dynamics Simulation / D. C. Rapaport. – Cambridge : Cambridge University Press, 2004. – 549 p.

Radial distribution function calculation algorithms in the case of the Lennard-Jones system cooling at low rates are developed using regression analysis methods.

Фархутдинов Альберт Ришатович, Казанский федеральный университет, Казань, Российская Федерация, farhutdinov.albert@yandex.ru.

Научный руководитель – Мошкин Анатолий Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, Казанский федеральный университет, Казань, Российская Федерация, anatolii.mokshin@mail.ru.

УДК 539.19

Р. Р. ХАЙРУЛЛИНА

ЛОКАЛЬНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАВНОВЕСНОГО И ПЕРЕОХЛАЖДЁННОГО РАСПЛАВА НИКЕЛЯ

Для переохлажденных переходных металлов характерно отсутствие дальнего порядка и наличие специфического ближнего порядка в расположении атомов. Так, наличие плеч и уширений во втором максимуме экспериментально измеряемой величины – в статическом структурном факторе $S(k)$ – обычно интерпретируется как проявление икосаэдрического (идеального или искаженного) ближнего порядка. Икосаэдрический ближний порядок представляет собой структуру с пятилучевой симметрией в расположении атомов, что может привести к возможности достижения глубокого переохлаждения. В данной работе мы изучаем локальные структурные особенности равновесных и переохлажденных расплавов никеля при различных режимах охлаждения с целью выяснения механизма формирования икосаэдрического ближнего порядка в чистых $3d$ переходных металлах. Комплексные исследования свойства расплавов никеля проводились с помощью крупномасштабного молекулярно-динамического моделирования с последующим структурным и кластерным анализом. Установлено, что для расплава никеля характерен ближний порядок, образованный фрагментами икосаэдров и искаженными икосаэдрическими кластерами. Выявлено, что переход «жидкость-кристалл» в никеле сопровождается трансформацией искаженных икосаэдрических кластеров в кластеры с ГЦК/ГПУ-симметрией.

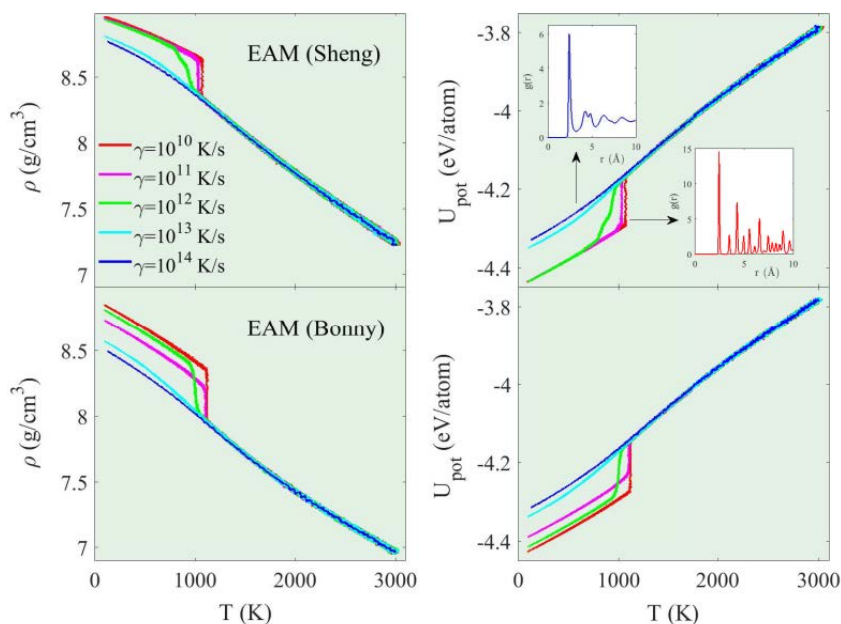
Никель является типичным $3d$ переходным металлом, который при температурах выше точки плавления T_m и атмосферном давлении характеризуется высокоплотной жидкой фазой. Расплав никеля, как и другие высокоплотные жидкости при температурах ниже T_m и достаточно высоких скоростях охлаждения ($\gamma \geq 1.5 \cdot 10^{13} \text{ K/с}$) формирует метастабильные переохлажденные состояния. Эксперименты с использованием методов бесконтейнерного охлаждения установили возможность глубокого переохлаждения никеля до $\Delta T_s = 341$ и

⁶Работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «Базис» (проект № 20-1-2-38).

480 К. Принимая во внимание температуру плавления никеля $T_m = 1728$ К, последнее значение дает переохлаждение $\Delta T_s / T_m$ около 0.28, что довольно велико для чистых металлов с относительно высокой температурой плавления. Особенности ближнего структурного порядка в переохлажденных переходных металлах, а также кристаллизация никеля широко изучались теоретическими и численными методами классического и квантово-механического молекулярно-динамического (МД) моделирования. В отличие от жидких щелочных металлов, в которых межатомные взаимодействия достаточно корректно воспроизводятся простыми сферически-симметричными псевдопотенциалами, жидкие переходные металлы характеризуются сложными многочастичными взаимодействиями. Так, природа межатомного взаимодействия в переходных металлах обусловлена наличием d -орбитальных электронов, которые гибридизуются с s -орбитальными электронами. В результате ближний структурный порядок в жидких переходных металлах характеризуется рядом особенностей и сложным набором корреляционных длин. Недавние исследования методом МД показали наличие так называемых искаженных икосаэдрических структур в переохлажденных расплавах и аморфных металлических сплавах. Установлено, что структура переохлажденных переходных металлов характеризуется сложными многогранниками Франка-Каспера с координационными числами $z = 14-16$. Ближний структурный порядок таких расплавов представляет научный интерес, поскольку считается, что локальная структура расплавов оказывает сильное влияние на его микроскопическую коллективную динамику, транспортные свойства и стеклообразующую способность.

Детали моделирования. Молекулярно-динамическое (МД) моделирование расплава никеля проводилось в NpT-ансамбле при давлении $p = 1.0$ бар для диапазона температур $T = [100; 3000]$ К. Рассматривались две системы, взаимодействие между атомами осуществлялось посредством EAM-потенциалов, обозначенных в тексте и на рисунках как EAM (Sheng) и EAM (Bonny). Моделируемые системы состояли из $N = 32\,000$ атомов, заключенных в кубическую ячейку с периодическими граничными условиями. Расплавы при данных температурах были получены быстрым охлаждением из высокотемпературного равновесного состояния при температуре $T = 3000$ К. Скорость охлаждения систем составляла $\gamma = 10^{10}, 10^{11}, 10^{12}, 10^{13}$ и 10^{14} К/с. Интегрирование уравнений движения атомов осуществлялось на основе скоростного алгоритма Верле с временным шагом 1.0 фс. Для приведения системы в состояние термодинамического равновесия программой было выполнено $1.5 \cdot 10^7$ временных шагов и $2 \cdot 10^6$ шагов для вычисления структурных характеристик и функций распределения, а также для выполнения кластерного анализа.

Результаты и обсуждение. Для выявления процесса стеклообразования в жидких переходных металлах были рассчитаны температурные зависимости термодинамических параметров и характеристик исследуемой системы с различными протоколами охлаждения. В частности, охлаждение равновесного расплава никеля проводилось со скоростями: $\gamma = 10^{10}, 10^{11}, 10^{12}, 10^{13}$ и 10^{14} К/с.



На вставке: функции радиального распределения атомов $g(r)$ для переохлаждённого расплава и кристаллического никеля.

Рисунок 1 – Плотность и потенциальная энергия как функции температуры для расплава никеля, полученные с помощью моделирования молекулярной динамики с потенциалами погруженного атома EAM (Sheng) (верхняя панель) и EAM (Bonny) (нижняя панель)

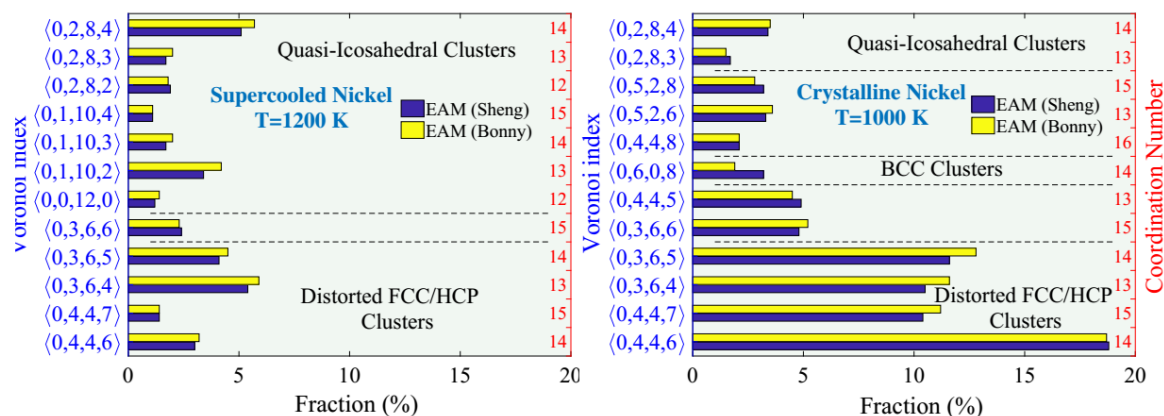


Рисунок 2 – Распределение основных кластеров Вороного в переохлаждённом и кристаллическом никеле при температуре $T = 1200$ К и $T = 1000$ К соответственно

На рис. 1 представлены температурные зависимости массовой плотности и потенциальной энергии на атом, полученные в результате моделирования методом МД. При скоростях охлаждения выше $\gamma > 10^{12}$ К/с наблюдается монотонное изменение наклона плотности и энергии с температурой, что демонстрирует характеристики кинетического перехода «жидкость-стекло». При достаточно низких скоростях охлаждения в диапазоне температур $T = [1000; 3000]$ К значения $\rho(T)$ и $U_{\text{pot}}(T)$ демонстрируют резкие изменения, которые могут указывать на фазовый переход «жидкость-кристалл». Как видно из рисунка, для обеих рассмотренных систем температура кристаллизации никеля имеет некоторую зависимость от скорости охлаждения. Так, при самой низкой скорости охлаждения $\gamma = 10^{10}$ К/с кристаллизация никеля при моделировании с потенциалами EAM (Sheng) и EAM (Bonny) осуществляется при температурах $T_m \approx 1081 \pm 7$ К и 1133 ± 5 К соответственно. Следует отметить, что для обеих систем, моделируемых EAM-потенциалами, переохлаждение достигает $\Delta T_s \approx 600$ К (или $\Delta T_s / T_m \approx 0.347$), что значительно превышает экспериментально достигнутые значения $\Delta T_s = 341$ и 480 К $\Delta T_s / T_m \approx 0.20$ и 0.28 соответственно.

Детальный анализ ближнего порядка в жидкостях был выполнен в рамках метода многогранников Вороного. Многогранник Вороного описывается индексами $\langle n_3, n_4, n_5, n_6 \rangle$, где n_i обозначает количество граней с i ребрами, а сумма значений n_i определяет координационное число системы, т. е. $CN = \sum n_i$. Так, например, индекс Вороного $\langle 0,0,12,0 \rangle$ обозначает идеальный *ico*-кластер с пятилучевой симметрией, в то время как кластеры с индексами $\langle 0,1,10,x \rangle$, $\langle 0,2,8,x \rangle$ (где $x = 1, 2, 3, 4$) можно рассматривать как искаженные *ico*-кластеры. Кластеры с *bcc*-симметрией характеризуется индексом $\langle 0,6,0,8 \rangle$. Индекс Вороного $\langle 0,0,12,2 \rangle$ обозначает 14-координированный (Z14) атом, а $\langle 0,0,12,2 \rangle$ характеризует *tcp* (тетрагональную плотноупакованную) структуру типа Франка-Каспера. В то же время традиционный метод Вороного не может различить идеальные или почти идеальные кристаллические структуры с *fcc* и *hcp* симметриями. Например, *fcc* / *hcp* кластеры имеют индекс $\langle 0,12,0,0 \rangle$. С целью детального исследования ближнего порядка в никеле, выполнен анализ распределения основных видов кластеров. На рис. 2 показано содержание кластеров Вороного в переохлажденном (левый столбец) и кристаллическом (правый столбец) никеле при температуре $T = 1200$ К и $T = 1000$ К соответственно. Как видно из рисунка, в переохлажденных и кристаллических фазах никеля наблюдаются некоторое число искаженных икосаэдрических кластеров, которые не были обнаружены ранее в рамках метода вращательных инвариант. В переохлажденном никеле ближний икосаэдрический порядок образован незначительным количеством идеальных икосаэдрических кластеров ($\sim 1.3\%$) и некоторым набором искаженных икосаэдрических кластеров ($\sim 16\%$), обозначенных индексами Вороного: $\langle 0,1,10,x \rangle$ и $\langle 0,2,8,x \rangle$, где $x = 2, 3$ и 4 . При этом в системе обнаруживаются искаженные кластеры с ГЦК и ГПУ-симметриями. Доля таких кластеров составляет порядка 14.5% . Следует отметить, что приведенные выше индексы демонстрируют наличие в рассматриваемых системах фрагментов икосаэдров. Такое образование икосаэдрических структур в расплавах обозначается термином *икосаэдрическое упорядочение*, которое часто используется для описания локального топологического ближнего порядка в переохлажденных жидкостях и стеклах. Структура никеля при температуре $T = 1000$ К в основном образована искаженными *fcc/hcp* кластерами ($\sim 53\%$) и квази-икосаэдрическими кластерами ($\sim 5\%$), обозначаемые индексами Вороного: $\langle 0,2,8,3 \rangle$ и $\langle 0,2,8,4 \rangle$. В то же время, метод тесселяций Вороного обнаруживает незначительную часть кластеров с *bcc*-симметрией ($\sim 3\%$), которые не были обнаружены в рамках метода вращательных инвариант. Следует отметить, что переход «жидкость-кристалл» в никеле сопровождается превращением искаженных икосаэдрических кластеров в кластеры с *fcc* / *hcp*-симметриями⁷.

⁷Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 22-22-00508).

Supercooled transition metals are characterized by the absence of long-range order and the presence of a specific short-range order in the arrangement of atoms. So, the presence of shoulders and broadenings at the second maximum in the experimentally measured quantity – in the static structure factor $S(k)$ – is usually interpreted as a manifestation of the icosahedral (ideal or distorted) short-range order. Icosahedral short-range order is a structure with fivefold symmetry in the arrangement of atoms, which can lead to the possibility of achieving deep supercooling. In this work, we study the local structural features of equilibrium and supercooled nickel melts under various cooling protocols in order to clarify the mechanism of formation of the icosahedral short-range order in pure 3d transition metals. Comprehensive studies of the properties of nickel melts were carried out using the large-scale molecular dynamics simulations with subsequent structural and cluster analysis. It was found that the nickel melt is characterized by a short-range order, formed by fragments of icosahedra and distorted icosahedral clusters. It was revealed that the «liquid-crystal» phase transition in nickel is accompanied by the transformation of distorted icosahedral clusters into clusters with the *fcc/hcp*-symmetry.

Хайруллина Рания Рустамовна, аспирант Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета, Казань, Российская Федерация, ganiya-art@mail.ru.

Научный руководитель – *Мокишин Анатолий Васильевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Институт физики Казанского (Приволжского) федерального университета, Казань, Российская Федерация, anatolii.mokshin@mail.ru.

УДК 53.04

М. ХАЛИЛЛОЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ АМПЛИТУДЫ СЛУЧАЙНОГО ТЕЛЕГРАФНОГО ШУМА В БЕСПЕРЕХОДНЫХ FINFET ТРАНЗИСТОРАХ С РАЗЛИЧНОЙ ФОРМОЙ КАНАЛА

3D моделированием рассматривается зависимость амплитуды случайного телеграфного шума в кремниевых полевых вертикальных беспереходных транзисторах с изолированным затвором, вызванного локализацией единичного ловушечного заряда, захваченного на боковой границе диэлектрик-полупроводник. Рассматриваются транзисторы с сечением канала в форме треугольника, трапеции и прямоугольника. Показано, что наименьшая амплитуда случайного телеграфного шума наблюдается в транзисторе с треугольным сечением канала.

При уменьшении размеров МОП транзисторов, в частности беспереходных MOSFET транзисторов (JLMOSFET) [1], наблюдается усиление чувствительности различных характеристик к встраиванию единичного заряда в подзатворном диэлектрическом слое или на границе подзатворного диэлектрика с каналом, приводящего к проявлению случайных телеграфных шумов (СТШ) в токе стока [2]. JLMOSFET транзисторы представляют собой сильнолегированный (обычно в пределах 10^{18} – 10^{19} см⁻³) однородный тонкий полупроводниковый резистор с изолированным затвором, который управляет потоком носителей заряда в резисторе между стоком и истоком. В отличие от традиционных МОП транзисторов, работающих в режиме инверсии, JLMOSFET транзисторы работают в режиме аккумуляции.

Короткоканальные эффекты в JLMOSFET транзисторах изучаются достаточно широко, в то время как исследования влияния единичных оксидных или граничных ловушечных зарядов на ток стока, вызывающих СТШ сигналы в этих транзисторах, находятся на начальной стадии.

Есть работы, в которых основное внимание уделяется зависимости амплитуды СТШ сигнала от технологии транзистора, температуры, напряжения на затворе и стоке в режиме аккумуляции, зависимости показателей эффективности работы беспереходного транзистора в логике ультранизкой мощности от уровня легирования канала, диэлектрической постоянной материала спейсера, сопротивления канала.

Однако очень мало работ, в которых исследуется влияние технологических флуктуаций геометрических размеров и отклонений от предполагаемых форм при изготовлении наноразмерных JLMOSFET на их шумовые характеристики. В то же время технологические флуктуации геометрических размеров могут приводить к заметному изменению ожидаемых параметров и характеристик транзистора. Так, в работе [3] показана зависимость изменения характеристик, параметров и короткоканальных эффектов от изменения формы канала и размеров FinFET транзистора, работающего в инверсной моде.

В данной работе в трехмерной области моделируется зависимость амплитуды СТШ сигнала, индуцированного единичным ловушечным зарядом, захваченным на граничном дефекте в центре боковой стороны канала JLMOSFET транзистора.

Транзистор основан на технологии кремний на изоляторе (КНИ) с различной формой канала, структуры которых представлены на рис. 1. Рассматривались каналы с поперечным сечением в форме треугольника, трапеции и прямоугольника.

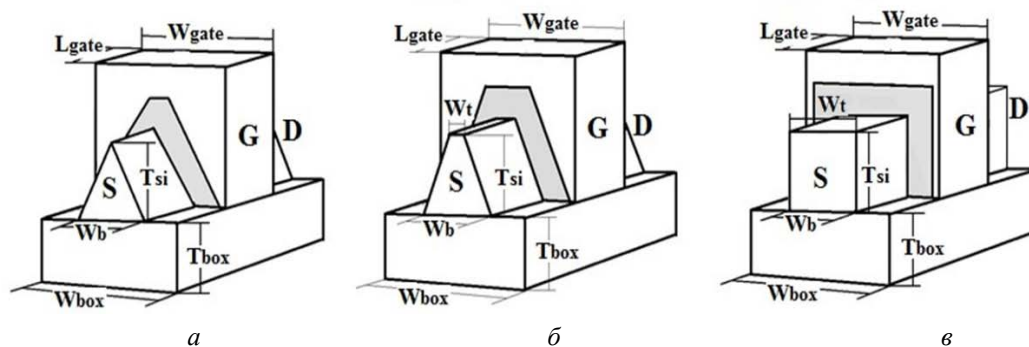


Рисунок 1 – Структура моделируемого транзистора JLMOSFET с треугольным (а), трапецидальным (б), прямоугольным (в) и сечением

3D моделирование проводилось с использованием программы Advanced TCAD Sentaurus. При моделировании использовалась диффузионно-дрейфовая модель. В модели учитывалась зависимость подвижности от концентрации легирования и насыщение скорости носителей, а также влияние нормальной составляющей поля на ток стока. Так как размеры транзистора имеют нанометровые масштабы, необходимо принимать во внимание и квантовые эффекты. Наиболее предпочтительной квантовой корректировкой при диффузионно-дрейфовом моделировании является квантовая корректировка по градиенту плотности, которая использовалась в данной работе. Для калибровки используемая модель калибровалась с экспериментальными результатами работы [4]. При моделировании использовались следующие параметры структуры. Длина TiN затвора (G) равна $L_{gate} = 22$ nm. В качестве подзатворного оксидного слоя взят HfO_2 , эквивалентная толщина составляла $t_{eff} = 1.2$ nm. Ширина и толщина скрытого оксидного слоя равны соответственно $W_{box} = 48$ nm и $T_{box} = 145$ nm. Параметром, отражающим форму канала, является ширина его потолка W_t , которая для усеченной треугольной призмы равна 5 nm. Канал транзистора легирован фосфором с концентрацией $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и имеет ширину у основания $W_{finb} = 10$ nm.

Результаты моделирования зависимости амплитуды СТШ сигнала от прироста напряжения на затворе над пороговым напряжением при различных формах сечения канала транзистора представлены на рис. 2.

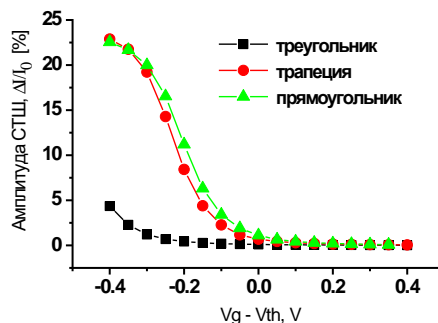


Рисунок 2 – Зависимость амплитуды СТШ сигнала от прироста напряжения на затворе над пороговым напряжением при различных формах сечения канала

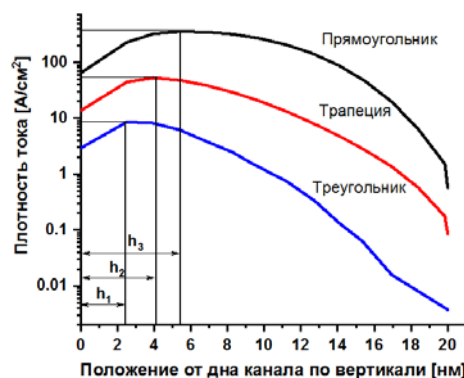


Рисунок 3 – Распределение плотности тока по высоте в середине канала JLMOSFET

Из рисунка видно, что амплитуда СТШ заметно увеличивается при подпороговых значениях напряжения на затворе и наименьшее значение амплитуды СТШ проявляется для треугольного сечения канала. Причина такой разницы в амплитуде СТШ объясняется расстоянием между единичным ловушечным зарядом и положением центра области максимальной плотности тока в сечении канала. На рисунке 3, полученном из результатов моделирования распределения плотности тока, видно, что расстояние от основания канала до центра области максимальной плотности тока, h наименьшее для треугольного сечения и наибольшее для прямоугольного сечения. На основании полученных значений h оценены расстояния от единичного заряда до центра области максимальной плотности тока (рис. 4). Известно, что напряженность поля единичного заряда зависит обратно пропорционально от квадрата расстояния от заряда. Так как расстояние от единичного заряда до центра максимальной плотности тока наибольшее для треугольного сечения, то и его влияние на ток в канале меньше для треугольного сечения, что приводит к меньшей амплитуде телеграфного шума.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что наименьшая амплитуда СТШ наблюдается для треугольного сечения канала транзистора, что связано с расстоянием от единичного ловушечного заряда до центра области максимальной плотности тока.

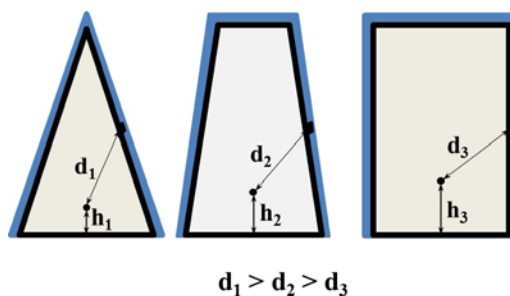


Рисунок 4 – Расстояния от центра области максимальной плотности тока до основания канала h и до единичного ловушечного заряда d

Список литературы

1. Ferain I., Coling C.A. and Coling J.-P. // Nature. 2011. 479(7373):310-6.
2. Campbell J. P., Yul L. C., Cheung K. P., Qin J., Suehle J. S., Oates A., Sheng K. Large Random Telegraph Noise in Sub-Threshold Operation of Nano-Scale nMOSFETs//Proc. IEEE Int. Conf. IC Design and Technology ICICDT. – 2009. – P. 17–20.
3. Абдикаримов А. Э., Юсупов А., Атамуратов А. Э. // Журнал технической физики. – 2018. – Т. 44, вып. 21. – С. 22–29.
4. Barraud S., Berthomé M., Coquand R., Cassé M., Ernst T., Samson M.-P., Perreau P., Bourdelle K. K., Faynot O., and Poiroux T. // IEEE Electron Device Letters. – 2012. – Vol. 33, No. 9. – P. 1225–1227.

In this paper is considered simulation of the amplitude of random telegraph noise in the silicon based Junctionless MOSFET. Random telegraph noise is generated by single charge trapped at side wall of the channel. The transistors with cross sections in the form of triangle, trapeze and rectangle is considered. It was shown, that minimal amplitude of the noise correspond to the transistor with triangle cross section.

Халиллоев Махкам, докторант Ургенчского государственного университета, Ургенч, Узбекистан, x-mahkam@mail.ru.

Научный руководитель – *Атамуратов Атабек Эгамбердиевич*, доктор физико-математических наук, доцент, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, atabek.atamuratov@urdu.uz.

УДК 530.1

А. В. ЧЕРНЯВСКАЯ

ЗНАЧИМЫЕ ФАКТОРЫ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БИНАРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Модельными методами исследована эффективная теплопроводность композитов на основе полиэтилена и поликарбоната с наполнителем из карбида кремния. Работа выполнялась с помощью компьютерного моделирования с использованием численных моделей, экспериментальных исследований. Решены следующие задачи: на основе эксперимента и моделирования проведена оценка теплового сопротивления межфазного слоя, разработаны алгоритмы получения распределения наполнителя в матрице и численная модель эффективной теплопроводности композита, определены факторы, влияющие на эффективную теплопроводность композиционных систем в зависимости от концентрации наполнителя в матрице: распределение наполнителя в матрице.

Рассмотрим факторы, определяющие теплопроводность композиционных систем: теплопроводность матрицы, теплопроводность наполнителя, модифицирование приграничных слоев, кластеризация наполнителя, межфазное тепловое сопротивление, сопротивление контакта частиц наполнителя [1]. Теплопроводность аморфных полимеров определяется ковалентной связью между атомами в цепи (высокая теплопроводность) и ван-дер-ваальсовым взаимодействием между цепями (низкая теплопроводность). Поскольку конфигурация цепей имеет стохастический характер, влияние ван-дер-ваальсова взаимодействия является определяющим для теплопроводности [1]. Теплопроводность ван-дер-ваальсовой связи с использованием потенциала Леннарда-Джонса для политетрафторэтилена была рассчитана в работе [2]. Диапазон коэффициента теплопроводности для различных межатомных расстояний составил от 0.35 W/mK до 0.21 W/mK. В этом диапазоне находятся и наши экспериментальные данные. Фактическое увеличение средней теплопроводности композиционных систем означает, что для аморфных полимеров в зоне модифицирования в большей или меньшей степени начинает проявляться теплопроводность ковалентной связи. Учитывая, что величина и диапазон ван-дер-ваальсовой теплопроводности небольшие, модифицирование приграничного слоя с точки зрения увеличения теплопроводности не является определяющим фактором.

Известно, что даже при идеальном контакте разнородных кристаллов имеет место скачек температуры на их поверхностях [3]. Это связано с тепловым сопротивлением в зоне контакта. Непосредственно размер межфазной области и ее контактное сопротивление определить сложно [2, 3]. В работе [2] приводится порядок этой величины для межфазной границы SiC-Al: $1,46 \cdot 10^{(-8)} \text{ m}^2 \text{ K/W}$. Механизмы переноса энергии при этом фононный и электронный. В нашем случае преобладающий механизм обмена – это фонон-фононное взаимодействие. Тем не менее, воспользуемся этими данными для оценки эффективной теплопроводности в межфазной области. Если толщину межфазной границы принять в диапазоне от 10 до 100 нм, то эквивалентный коэффициент теплопроводности межфазной границы приблизительно будет в диапазоне от 0.6 до 6 W/mK. Таким образом, термическое сопротивление фазового контакта также не является определяющим при определении эффективной теплопроводности композита в целом. Однако при малых массовых концентрациях наполнителя большинство частиц контактирует с матрицей. В этом случае изменение теплопроводности матрицы обусловлено модифицирующим действием наполнителя. При малых концентрациях наполнителя (пока не образуются кластеры) эффективная теплопроводность полностью определяется свойствами матрицы. Модификатор воздействует на матрицу через активную поверхность [4, 5]. Это значит, что эффект воздействия пропорционален межфазной площади контакта наполнителя и матрицы F_{ph} . Это иллюстрируется таблицами 1 и 2. Фактически при малых концентрациях отношение эффективной теплопроводности к теплопроводности матрицы $K = \lambda_{eff}/\lambda_m$ является характеристикой модификатора.

Таблица 1 – Теплопроводность композиции ПЭ при малых концентрациях, W/mK

t, °C	Эксперимент, λ_m	Эксперимент, λ_{eff}	Расчет, λ_m	K	ρ_c , %	Размер частиц, мкм
25	0,240	0,269	0,267	1,113	0,5	50–63
80	0,167	0,181	0,180	1,078	0,5	50–63
25	0,240	0,275	0,272	1,133	0,5	0,9–1,5
80	0,167	0,204	0,203	1,215	0,5	0,9–1,5

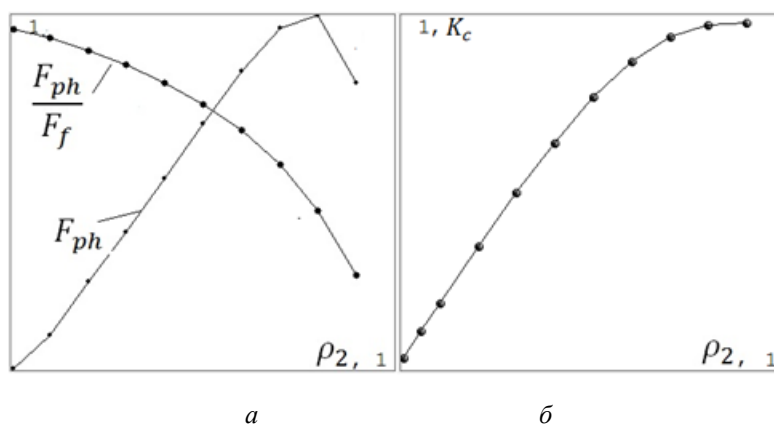
Таблица 2 – Теплопроводность композиции ПА при малых концентрациях, W/mK

t, °C	Эксперимент, λ_m	Эксперимент, λ_{eff}	Расчет, λ_m	K	ρ_c , %	Размер частиц, мкм
25	0,270	0,367	0,366	1,35	0,5	50–63
75	0,252	0,309	0,308	1,22	0,5	50–63
25	0,270	0,416	0,416	1,54	0,5	0,9–1,5
75	0,252	0,354	0,352	1,39	0,5	0,9–1,5

На рисунке 1а представлены расчетные данные зависимости F_{ph} и F_{ph}/F_f (F_f – полная поверхность частиц наполнителя) от массовой концентрации наполнителя ρ_z . С увеличением концентрации частиц их суммарная поверхность увеличивается. С увеличением концентрации частиц увеличивается и вероятность образования кластеров (рисунок 1б), при этом зона контакта наполнителя с матрицей, начиная с некоторой концентрации должна уменьшаться. Выясним влияние кластеризации на эффективный коэффициент теплопроводности композиционных систем. Резкий подъем кривой (рисунок 2) эффективной теплопроводности после концентрации $\rho_z = 20\%$ связан с образованием кластеров. Эта тенденция сохраняется и для массовых концентраций вплоть до 70 %. Массовые концентрации 60 % – 70 % соответствуют объемным концентрациям в пределах 0,3 % – 0,4 %. Эти объемные концентрации близки по значению к порогу перколяции для трехмерных объектов, когда случайное распределение частиц формирует перколяционный кластер на бесконечной решетке.

На конечных объектах это правило выполняется нестрогое. После порога перколяции эффективная теплопроводность зависит только от свойств наполнителя.

В таблице 3 показаны наиболее важные факторы, влияющие на эффективную теплопроводность композиционных систем.



а – зависимость F_{ph} и F_{ph}/F_f от массовой концентрации наполнителя ρ_2 .

Величина F_{ph} нормирована относительно значения межфазной поверхности при $\rho_2 = 80\%$;

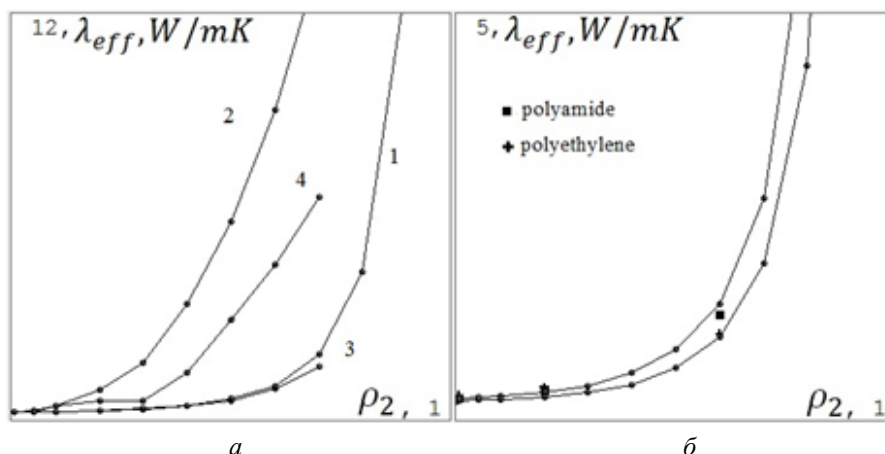
б – коэффициент кластеризации $K_c = N_c/N$ и N – число частиц наполнителя в кластерах и всего частиц

Рисунок 1 – Расчётные зависимости

На рисунке 2 приведены результаты численных расчетов эффективной теплопроводности для различных вариантов распределения частиц наполнителя при одинаковых прочих условиях. Наиболее выгодное расположение частиц – ориентация на поток и фрактальная структура распределения наполнителя. Фрактальная размерность при выбранных концентрациях наполнителя находилась в диапазоне от 1,62 до 2,75.

Таблица 3 – Значимые факторы, определяющие эффективную теплопроводность

Фактор	$\rho_c = 0.5\%$	$\rho_c = 20\%$	$\rho_c = 60\%$
Теплопроводность матрицы	+	+	-
Теплопроводность наполнителя	-	+	+
Модифицирование	+	-	-
Кластеризация наполнителя	-	+	+
Межфазное сопротивление	+	-	-
Сопротивление контакта частиц наполнителя	-	+	+



1 – случайное, 2 – продольное, 3 – поперечное, 4 – фрактальное

Рисунок 2 – Расчётные (а) и экспериментальные (б) данные композиционных систем «полиэтилен – карбамид кремния» и «полиамид 6 – карбамид кремния» при температуре $t = 25^\circ\text{C}$ и размере частиц наполнителя от 50 до 60 мкм

Список литературы

1. Modelling of the thermal conductivity in polymer nanocomposites and the impact of the interface between filler and matrix / R. Kochetov [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2011. – Vol. 44.
2. Абызов, А. М. Термическое сопротивление границы раздела фаз композита алмаз–медь с высокой теплопроводностью / А. М. Абызов, С. В. Кидалов, Ф. М. Шахов // Физика твердого тела. – 2012. – Т. 54, вып. 1. – С. 27–38.
3. Никитин, Д. А. Моделирование структуры композиционных систем и расчет их коэффициента теплопроводности / Д. А. Никитин // Материалы, технологии, инструменты. – 2004. – Т. 9, № 2. – С. 11–15.
4. 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 // Вестн. Гродн. гос. ун-та им. Янки Купалы. Сер. 2, Математика. Физика. Информатика. Вычислительная техника и управление. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 68–77.
5. Experiment and simulation of the effective thermal conductivity of composite systems based on polymers / A. V. Nikitin [и др.] // Вестн. Гродн. гос. ун-та им. Янки Купалы. Сер. 2, Математика. Физика. Информатика. Вычислительная техника и управление. – 2019. – Т. 9, № 3. – С. 94–103.

Model methods investigated the effective thermal conductivity of composites based on polyethylene and polycarbonate with a filler of silicon carbide. The work was carried out with the help of computer modeling using numerical models, experimental studies. The following tasks were solved – on the basis of the experiment and modeling, the thermal resistance of the interphase layer was evaluated, algorithms for obtaining the distribution of the filler in the matrix and a numerical model of the effective thermal conductivity of the composite were developed, factors affecting the effective thermal conductivity of composite systems depending on the concentration of the filler in the matrix were determined: the distribution of the filler in the matrix.

Чернявская Аlesia Владимировна – магистрант 1 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, aonezhinal@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 539.21, 537.9

М. Б. ЮНУСОВ, Р. М. ХУСНУТДИНОВ

ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ: РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ

Представлены результаты *ab-initio* исследования электронных и теплофизических свойств газовых гидратов. Для гидратов метана была рассчитана теплоемкость при постоянном объеме. Для заполненных и незаполненных конфигураций sI и sH гидратов исследованы плотности электронных состояний. Для гидрата sI с пустыми молекулярными полостями были вычислены энергетические спектры электронов $E(\mathbf{k})$. Также, для гидратов метана и этана с конфигурацией sI вычислены энергии связи между каркасом и молекулой газа, находящейся в молекулярной полости.

В настоящее время структурные особенности и теплофизические свойства газовых гидратов вызывают большой интерес у исследователей. Этот интерес объясняется, во-первых, тем, что существует перспектива использования гидратов природного газа в качестве нового источника углеводородного топлива. По оценкам ученых, запасы газа в гидратах составляют $\sim 2 \cdot 10^{16} \text{ м}^3$, что намного больше запасов обычного природного газа [1, 2]. Во-вторых, этот интерес обусловлен тем, что в газовой отрасли остро стоит проблема гидратообразования.

Газовые гидраты являются соединениями переменного состава и описываются формулой $M \cdot nH_2O$ (M – молекула гидратообразователя, n – гидратное число, среднее число молекул воды на одну молекулу газа). Каркас гидрата образован молекулами воды, которые связаны водородной связью. Кристаллическая решетка воды имеет полости, в которые могут быть заключены низкомолекулярные соединения. Гидраты с содержанием природных газов преимущественно образуются в зонах вечной мерзлоты и на океанических шельфах. Ван-дер-ваальсовские взаимодействия между каркасом и молекулой-гостем обеспечивают энергетическую устойчивость гидратов [1]. Самым распространенным газом в гидратах является метан. Он преимущественно кристаллизуется в кубическую структуру sI при термобарических условиях $T \sim 300 \text{ K}$ и $p \geq 0.6 \text{ MPa}$ [3]. Структура sI состоит из больших кластеров воды с диаметром $\sim 5.86 \text{ \AA}$ и малых кластеров с диаметром $\sim 5.10 \text{ \AA}$, в которых могут быть заключены молекулы метана, этана и других газов.

Детали моделирования. Выполнено крупномасштабное молекулярно-динамическое *ab-initio* моделирование в рамках теории функционала плотности с использованием программного комплекса VASP [4]. Модели гидратов метана и этана получены путем включения молекул CH_4 и C_2H_6 в свободные молекулярные полости каркаса. Конфигурации sI и sH были получены на основе данных по дифракции рентгеновских лучей

[5, 6] с учетом правила льда Бернала–Фаулера и равенством нулю полного дипольного момента. Моделирование выполнялось в изотермически-изохорическом (NVT)-ансамбле, температура варьировалась в диапазоне $T = [180; 260]$ К с шагом $\Delta T = 20$ К. Для установления состояния термодинамического равновесия применялся термостат Нозе–Гувера. Во избежание поверхностных явлений на ячейку моделирования были наложены периодические граничные условия. Первопринципные расчеты проводились в рамках теории функционала плотности, где межэлектронное взаимодействие рассчитывалось в рамках обобщенно-градиентного приближения GGA [4]. Для учета обменно-корреляционных поправок использовался функционал PBE [7]. Взаимодействие электронов с ионами описывалось с помощью сглаженных псевдопотенциалов (PAW-потенциалов). Базисный набор состоял из плоских волн с энергией отсечки 245 эВ. Так как изначальная конфигурация системы была оптимизирована по энергии и дипольному моменту, для полной релаксации потребовалось небольшое количество ионных шагов. Длительность ионного шага составляла 1 фс. В пределах одного ионного шага осуществляется, по крайней мере, 5 электронных шагов оптимизации с энергией сходимости 10^{-4} эВ.

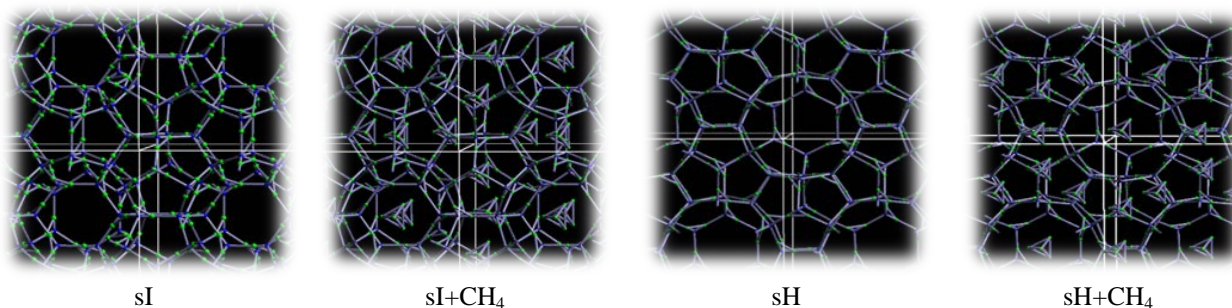


Рисунок 1 – Пустые и заполненные метаном молекулярные полости гидратов с конфигурациями sI и sH

Результаты и обсуждение. Во-первых, была рассчитана средняя теплоемкость пустых клатратных каркасов sI и sH, а также гидратов метана при постоянном объеме для температурной области $T = [180; 260]$ К (см. табл. 1). Так же, на основе равновесных параметров решетки оценены плотности гидрата метана sI (912 кг/м^3) и sH (898 кг/м^3), которые хорошо согласуются с экспериментальными данными [8].

Таблица 1 – Расчётные и экспериментальные значения теплоёмкости

	Парам. решетки (Å)	Ионов в ячейке	$C_{V,CALC}$ (Дж/кг·К)	$C_{V,EXP}$ (Дж/кг·К)
sI	$a = 12$	138	3007 ± 152	3300 [11]
sH	$a = 12, b = 21, c = 10$	204	3093 ± 12	
sI+CH ₄	$a = 12$	178	2362	2160 \pm 100 [9], 2306 [10]
sH+CH ₄	$a = 12, b = 21, c = 10$	264	2569 ± 77	

Во-вторых, для пустой конфигурации sI получена плотность электронных состояний $N(E)$ (см. рис. 2). Полученные спектры $N(E)$ имеют хорошее согласие с данными, представленными в работе [12], где авторами был проведен квантово-механический расчет для различных газовых гидратов (CO_2 , CO , CH_4 и H_2). Так же в настоящей работе получена зонная структура в пределах первой зоны Бриллюэна (см. рис. 3). Энергетическая зонная структура дает информацию о характере изменения энергии электрона при движении вдоль определенного направления в пространстве k -векторов. Как видно из рисунка 3, электроны нижних энергетических уровней ($-20 \div -17$ эВ) и валентной зоны ($-8 \div 0$ эВ) с большой точностью имеют прямую зависимость $E(\mathbf{k})$. Спектр $E(\mathbf{k})$ в области энергий 5–10 эВ, что соответствует зоне проводимости, имеет локальные максимумы и минимумы в точках W, M, X и R. Верхняя и нижняя границы зоны проводимости имеют максимумы в точке R и минимумы в точке W. Запрещенная зона в кристалле гидрата sI имеет ширину порядка 5.0 эВ, что говорит о выраженных диэлектрических свойствах соединения.

В-третьих, для гидратов с конфигурацией sI, содержащих метан и этан, были рассчитаны энергии связей между молекулой-гостем и окружающей молекулярной полостью. Молекула метана заполняет все 8 полостей в структуре sI и рассчитанная для нее энергия связи с каркасом составила -0.25 эВ. Молекула этана заполняет только 6 больших полостей в конфигурации sI и рассчитанная для нее энергия связи с каркасом составила -0.27 эВ. Как уже говорилось ранее, нахождение молекул газа в полостях стабилизирует каркас, уменьшая полную энергию системы. Это подтверждается отрицательным значением энергии связи молекулы газа в гидрате. При сравнении плотности электронных состояний $N(E)$ для пустого и заполненного каркасов гидрата (см. рис. 4), во втором случае обнаруживается пик электронной плотности при энергии -10 эВ. Наблюдаемое смещение электронной плотности в область низких энергий при включении молекул газа в полости указывает на снижение энергии ячейки, что приводит к стабилизации каркаса газогидрата.

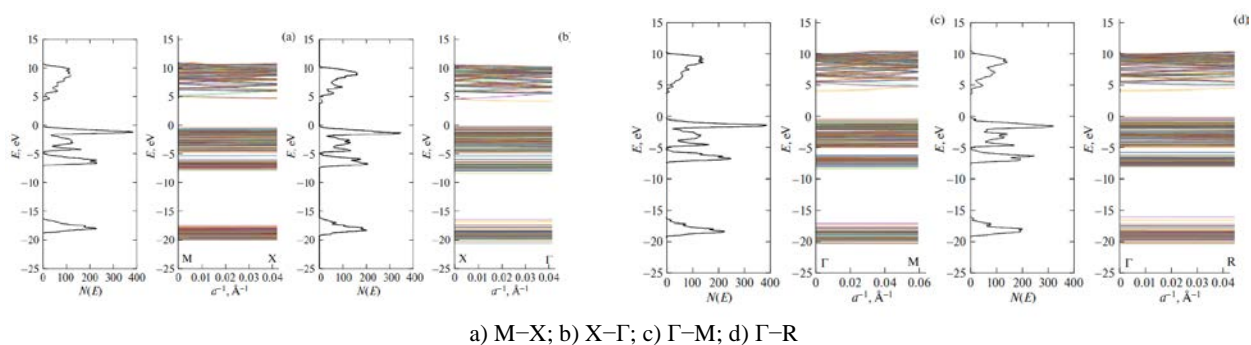


Рисунок 2 – Плотность электронных состояний и спектр энергии электронов $E(\mathbf{k})$ вдоль направлений

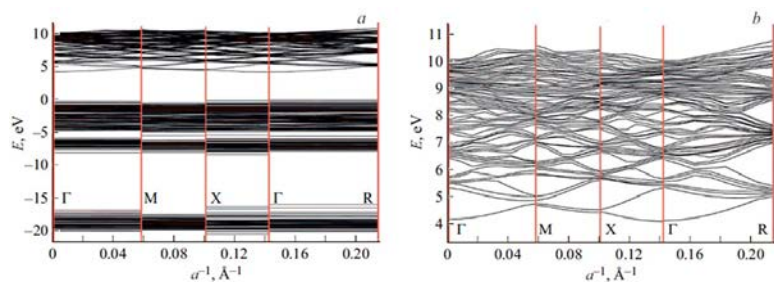


Рисунок 3 – Полная энергетическая зонная структура $E(\mathbf{k})$ кристалла sI (a) и зонная структура в диапазоне энергий 4–11 eV (зона проводимости) вдоль направлений M-X; X-Γ; Γ-M и Γ-R

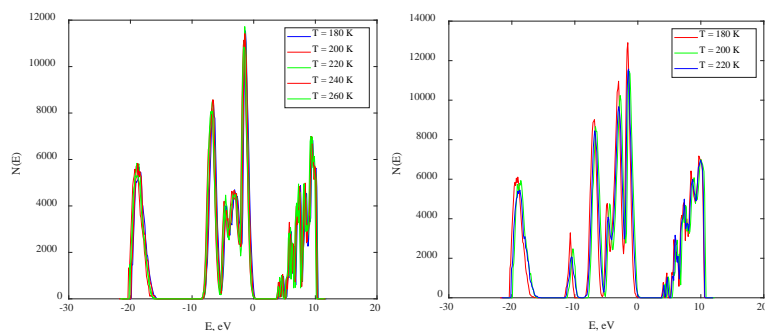


Рисунок 4 – Плотность электронных состояний $N(E)$ гидратов с пустыми полостями (слева) и полостями, заполненными метаном (справа)

В настоящей работе для широкой области температур $T = [180; 260]$ К проведено крупномасштабное *ab-initio* моделирование различных конфигураций гидратов, в том числе содержащих метан и этан. Во-первых, обнаружено хорошее согласие результатов моделирования для плотности и теплоемкости при постоянном объеме с экспериментальными данными [8–11]. Во-вторых, для кубической структуры sI с пустыми молекулярными полостями получены плотность электронных состояний $N(E)$ и энергетическая зонная структура $E(\mathbf{k})$. В-третьих, рассчитана энергия связи молекул метана и этана с решеткой гидрата sI, значения составили -0.27 eV и -0.27 eV соответственно. На основе сравнения плотности электронных состояний заполненного и незаполненного гидратов метана подтверждено, что включение молекул газа в полости повышает энергетическую стабильность системы⁸.

Список литературы

1. Sloan E. D., Koh C. A. Clathrate Hydrates of Natural Gases. 3rd rev. / ed. CRC Press, Taylor&Francis USA (2007).
2. English N. J., MacElroy J.M.D. Chem. Eng. Sci. 121, 133 (2015).
3. Casco M. E., Silvestre-Albero J. [et al.]. Nature Commun. 6, 6432 (2015).
4. Kresse G., Furthmüller J. Phys. Rev. B 54, 11169 (1996).
5. Stackelberg M., Müller H. R. Elektrochem. 58, 25 (1954).
6. Pauling L., Marsh R. E. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 38, 112 (1952).

⁸Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 22-22-00508).

7. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Phys. Rev. Lett. 77, 3865 (1996).
8. Макогон, Ю. Ф. Геология и полезные ископаемые Мирового океана / Ю. Ф. Макогон. – 2010. – № 2, 5.
9. Waite W. F., Stern L. A., Kirby S. H., Winters W. J., Mason D. H. Geophys. J. Int. 169, 767 (2007).
10. Истомин, В. И. Газовые гидраты в природных условиях / В. И. Истомин, В. С. Якушев. – М. : Недра, 1992.
11. Gabitto J. F., Tsouris C. Journal of Thermodynamics. 2010, 12 (2010).
12. Guo P., Qiu Y.-L., Li L.-L., Luo Q., Zhao J.-F., Pan Y.-K. Chin. Phys. B 27, 043103 (2018).

This paper presents the results of an ab-initio study of the electronic and thermophysical properties of gas hydrates. For methane hydrates, the heat capacity at constant volume was calculated. For filled and unfilled configurations of sI and sH hydrates, the densities of electronic states were studied. For the sI hydrate with empty molecular cavities, the electron energy spectra $E(k)$ were calculated. Also, for methane and ethane hydrates with the sI configuration, the binding energies between the framework and the gas molecule located in the molecular cavity are calculated.

Юнусов Мухаммадбек Бехзодович, магистрант Института физики Казанского федерального университета, Казань, Российская Федерация, mukhammadbek@mail.ru.

Хуснутдинов Рамиль Миннегаязович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной физики Казанского федерального университета, Казань, Российская Федерация, khrm@mail.ru.

Научный руководитель – *Хуснутдинов Рамиль Миннегаязович*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной физики Казанского федерального университета, Казань, Российская Федерация, khrm@mail.ru.

УДК 378.016.53

Я. С. ЯРОШЕВИЧ, В. А. ХОХЛЁНОК, В. А. РАПЧИНСКИЙ, Н. И. МИРОН, В. А. ГРЕМЧУК

АМБИГРАММЫ – ОПТИЧЕСКИЕ ИЛЛЮЗИИ

Рассматривается возможность использования амбиграмм для создания на 3D-принтере объектов, позволяющих наглядно объяснять оптические иллюзии в курсе школьной физики.

В последние несколько лет печать 3D-объектов стала общедоступна. В данной работе рассматривается возможность использования 3D-печати в образовательном процессе, в частности, в качестве демонстрационного эксперимента по оптике. Известно, что 3D-печать позволяет создавать объекты, демонстрирующие выполнение основных физических законов, в том числе и законов оптики. Особый интерес представляет печать объектов, визуализирующих оптические иллюзии. Для примера объяснения и визуализации оптических иллюзий была выбрана модель амбиграммы.

Амбиграммы – это каллиграфический узор, позволяющий совместить два различных прочтения из одного и того же набора линий. Литературным прообразом амбиграмм можно считать палиндромы – слова или наборы слов, которые читаются одинаково как слева направо, так и справа налево.

В данной работе для амбиграммы были подобраны слова: физика и химия. Создание 3D-амбиграммы было выполнено в программе Autodesk Fusion 360.

Fusion 360 – это профессиональная многофункциональная программа, предназначенная в том числе для создания 3D-моделей для 3D-принтера. Несмотря на обширные возможности, интерфейс программы достаточно понятный. Более того, многие функции меню имеют визуальные подсказки, по которым легко ориентироваться. Программа Fusion 360 позволяет сразу конвертировать разработанную для 3D-печати модель в формат .STL, то есть получить готовый файл для печати.

При создании модели необходимо выбрать ось и написать первое слово. Затем его нужно выдавить – EXTRUDE. Таким образом, получим трёхмерные буквы.

Второе слово создается на второй вертикальной плоскости. После этого необходимо вырезать первое слово из второго. Вырезать нужно не сами буквы, а все то, что находится снаружи от них. Для этого существует 2 способа:

- использование функции «combine» с параметром «intersect»;
- в прямоугольнике вырезается второе слово, и затем он выдавливается из первого.

В результате получается матрица, из которой нужно оставить только одну линию, находящуюся по диагонали.

К уже готовой амбиграмме добавляется подставка для скрепления букв.



Рисунок 1 – Амбиграммы

Известно, что обязательным условием для 3D-печати является наличие 3D-модели, по которой принтер будет выращивать трехмерный объект. Поэтому, смоделировав амбиграмму, необходимо соблюсти требования к размеру, толщине и дизайну, чтобы избежать непредвиденных затруднений в процессе печати, следует тщательно проработать 3D-модель до загрузки файла на 3D-принтер.

Печать на 3D-принтере – процесс достаточно простой, если соблюдать правила работы с разными типами материалов и с конкретными моделями принтеров, но со своими тонкостями.

Большинство фотополимерных 3D-принтеров распознают STL-файлы. STL – это формат файла, предназначенный для печати предметов методом стереолитографии. STL-файлы описывают только геометрию поверхности трехмерного объекта без какого-либо представления о цвете, текстуре или других атрибутах модели. Слайсеры различных моделей 3D-принтеров поддерживают файлы распространенных форматов OBJ, 3DS, а также проприетарные (FORM, PLG).

Качество печати зависит от очень многих факторов: от принтера, вида пластика, как именно расположена модель на столе печати, даже от температуры в комнате. Чтобы модель была распечатана успешно, необходимо придерживаться определенных правил моделирования и предпечатной подготовки.

Можно выделить такие основные требования к модели:

- Целостность, или водонепроницаемость модели (*монолит*).
- Отсутствие *поднутрений*.
- *Размер* печатаемого файла в Мегабайтах.
- Правильный *масштаб и детализация* модели.
- Способность пройти предпечатную программную проверку (*STL Check*).
- Целостность, или водонепроницаемость модели (*монолит*).

Это означает, что в модели нет пустот, что все ее детали объединены между собой в единый монолит. После моделирования разных элементов модели необходимо их объединить вместе.

Размер печатаемого файла в Мегабайтах. Немаловажным вопросом является размера файла, который собираемся печатать. Модель должна быть легкой в работе, не должна загружать компьютер и принтер.

Способность пройти предпечатную программную проверку (STL Check). Этот принцип назвать «чистотой геометрии». Термин «Вылеченный файл» используется для модели, которая:

- состоит из единого объекта (*монолит*);
- не имеет дыр (незакрытых треугольников);
- не имеет треугольников, которые пересекаются или накладываются друг на друга, создавая двойную поверхность. Все эти дефекты геометрии образуются как во время моделирования (нахлесты сетки, незакрытые дыры), так и во время булевских операций и экспорта файла. Модель перед печатью должна быть проверена в таких программах, как, например, Materialize Magics, Netfabb или их аналогах.

Таким образом, результатом данной работы стала разработка амбиграмм слов «Физика» и «Химия» для создания объектов на 3D-принтере для изучения оптических иллюзий в разделе физики «Оптика». Подобные амбиграммы можно применять как в учебном процессе, так и в качестве архитектурных решений.

Список литературы

1. Forums Fusion 360 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://forums.autodesk.com/t5/fusion-360/ct-p/1234>.
2. Product documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=GUID-1C665B4D7BF7-4FDF-98B0-AA7EE12B5AC2>.
3. Getting started for absolute beginners [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/courses/>.

The paper considers the possibility of using ambigrams, creating objects on a 3D printer that allow visually explaining optical illusions.

Ярошевич Янина Сергеевна, студентка 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, yanina_yaroshevich@mail.ru.

Хохлёнок Вероника Александровна, студентка 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, webprint2675@gmail.com.

Рапчинский Владислав Александрович, учащийся 10 класса ФТ-1 ГУО «Лицей № 1 г. Гродно», Гродно, Республика Беларусь, vlad.rachinskij@gmail.com.

Мирон Никита Иванович, учащийся 10 класса ФТ-1 ГУО «Лицей № 1 г. Гродно», Гродно, Республика Беларусь.

Гремчук Владислав Алексеевич, студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, vlad.gremchuk@mail.ru.

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

Маслов Игорь Сергеевич, директор ГУО «Лицей № 1 г. Гродно», Гродно, Республика Беларусь, imaslov@mail.ru.

СЕКЦИЯ 3. ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 681.3

AYAD MERAWIY ABDULLAH

BIOMETRIC SYSTEM WITH CODE-OFFSET CONSTRUCTION

An implementation of a fuzzy commitment biometric system using non-binary turbo codes is proposed and its performance in case of face verification is evaluated.

Human face is the front part of the head of a person from the forehead to the chin, between which the mouth, nose, cheeks and eyes are included. Face recognition uses the spatial geometry of distinguishing features from the face image and is a topic of visual pattern recognition. Here, a face, as a three-dimensional object affected by different illumination, pose, expression, etc., is to be recognized based on its image. Face recognition has become increasingly popular due to the rapid development in the areas of smart cameras and mobile devices and demands for security and convenience [1]. A practical face recognition system is expected to recognize faces presented in images and videos in the model of verification or identification. A biometric-based authentication system offers convenience and strong security compared to conventional password-based authentication. However, the arising noise caused by the fuzziness of the biometric data leads to substitution errors in the data processed.

One of the known approaches to creating such a system is to use an error-correcting code and the code-offset construction [2], which forms a Secure Sketch, stored in the database. It is applied together with the error correcting code (n, k, d) and represents the offset D that «shifts» the code vector X of the applied noise-proof code containing the user's password S by the biometric measurement value B , i. e. $D = B - X$. In the subsequent biometric measurement B' , subtraction $D - B' = Y$, decoding Y and obtaining the password S' , generally coinciding with S , is performed. To achieve the necessary efficiency (to minimize the probability of FAR and FRR), it is necessary to apply the «powerful» error-correction codes, for example BCH, increasing the Hamming distance to correct multiple errors, or exploit and the non-binary codes (Reed-Solomon, Turbo codes) [4], where their effectiveness can be estimated by the Euclidian distance.

In this paper, we propose the implementation of a fuzzy extractor based on the scheme of the so-called fuzzy commitment [2] using non-binary turbo codes. The proposed scheme has better biometric performance and implementation flexibility compared to [3] and has the ability to choose the type of non-binary code, arbitrary its block length and the distortion level due to data quantization to achieve the necessary confidentiality and data security.

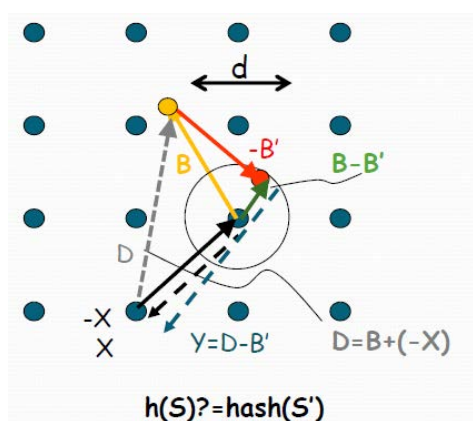


Figure 1 – Biometric system with code-offset construction

The proposed scheme includes two basic procedures: Enrollment and Authentication. At the registration side, the m -ary Secret Password S_m enters the Non-Binary Encoder, where the encoding function $NBE(S_m) \rightarrow X_m$ add the redundant symbols for error correction, forming framed data blocks X_m that pass through the m -ary modulator and are subtracted from a block of biometric quantized data B_q formed at the output of a Quantizer $D_m = B_q - X_m$. The quantizing interval used takes into account the power of the noise-resistant error-correcting code used and the specified level of the user data security. The obtained data block D_m is written to the Data Base and stored together with the hash $h(S_m)$ in it.

At the authentication side, the subtraction $B'_q - D_m = Y_m$ for a new data block B'_q is performed, resulting in a vector Y_m , that becomes an input to the Non-Binary Decoder. The decoding function $NBD(Y_m) \rightarrow S'_m$ is applied giving the user password S'_m as the output. Next, hash function $h(S'_m)$ is compared to $h(S_m)$. If they are equal, the user is successfully authenticated.

References

1. Jain A. K., Li S. Z. Handbook of Face Recognition. Vol. 1. Springer; London, UK : 2011.
2. Dodis Y., Reyzin L., Smith A. Fuzzy extractors: How to Generate Strong Keys from Biometrics and Other Noisy Data. EUROCRYPT, 2004. P. 523–540.
3. Maiorana E., Blasi D., Campisi P. Biometric Template Protection Using Turbo Codes and Modulation Constellations. IEEE WIFS, 2012. P. 25–30.

Предложена реализация биометрической системы нечеткого обязательства с использованием недвоичных турбокодов и оценена ее работоспособность при верификации изображения лица.

Ayad Merawiy Abdullah, graduate student, Information Systems and Technologies Department, Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Republik of Belarus, Iraq.ayadmdny113@gmail.com.

Supervisor – *Assanovich B. A.*, Associate professor, Information Systems and Technologies Department, Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Republik of Belarus, bas@grsu.by.

УДК 620.9

Д. В. АПЛЕВИЧ

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНОГО ГЕЛИОКОЛЛЕКТОРА И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОТЛА

Рассмотрены гибридное теплоснабжение частного дома; гибридное теплоснабжение на основе солнечного гелиоколлектора и электрического котла.

Цель представленной работы – внедрение гибридного теплоснабжения на основе солнечного гелиоколлектора и электрического котла в частный дом.

Отопление при помощи электрического (отопительного) котла и солнечных коллекторов включает в себя: [1]. Отопительный котел – электрический (твердое или жидкое топливо); солнечный коллектор; накопительный бак с теплообменником; блок автоматического управления; система водяной теплый пол [2]. Описанная система отопления является полностью автономной, функционирует практически без вмешательства пользователя.

Для внедрения данной гибридной схемы был выбран дом для отдыха семейного типа – коттедж № 5 санатория «Энергетик». Исходя из данных, представленных заказчиками для жилого дома:

- расход тепла на отопление – 10 000 Вт (8620 ккал/час);
- температура горячей воды в системе – 90 °С;
- установленная мощность – 0,1 кВт.

Здание присоединяется к существующим наружным тепловым сетям 2-ПН-038 × 3,0/110 через проектируемый тепловой пункт, устанавливаемый в приемке ввода.

Расчетный температурный график на источнике 70–90 °С. Параметры теплоносителя в системе отопления 70–90 °С. Система теплоснабжения закрытая.

Проектом предусмотрен индивидуальный тепловой пункт. Схемой ИТП предусмотрено:

- Отключающая арматура в здание.
- Балансировочный клапан на вводе в здание для регулирования максимального потока теплоносителя через систему отопления.
- Ограничение максимального расхода и поддержание требуемого перепада давления.
- Арматура КИПиА.

Расчетный расход сетевой воды – 0,45 м³/ч (70/90 °С). Расчетный расход в системе отопления – 0,45 м³/ч (70/90 °С).

Давление на вводе в здание $P_1 = 0.50 \text{ Мпа}$; $P_2 = 0.3 \text{ Мпа}$; $P_3 = 0.25 \text{ Мпа}$. Высота здания 6.0 м. Площадь здания – 90 м². Режим работы системы отопления – круглосуточно.

Исходя из вышеперечисленного, выбирается электрический котел и гелиоколлектор.

Электрический котел для отопления частного дома имеет следующие преимущества: [3] простая установка; небольшой вес; компактная конструкция; безопасная эксплуатация (отсутствует открытый огонь); небольшие затраты на обслуживание и ремонтные работы; отсутствие шумов при эксплуатации; экологичность (отсутствуют вредные выбросы); нет необходимости в устройстве дымоходов; не требуется получение специальной документации; безотходная работа; бюджетная стоимость.

Таблица 1 – Характеристики электрических котлов [4]

Название котла	Площадь домов	Характеристики электрических котлов	Температура нагрева
Protherm Скат 12 KR 13	До 120 м²	1. Устройство надежно, долговечно, экономично, работает бесшумно. При прогревании здания требуется большой расход электрической энергии, в дальнейшем температура поддерживается в экономичном режиме. 2. КПД агрегата – 99,5. Прибор легко монтируется, эстетичен. 3. Прибор снабжен баком на 7 л, плавным регулятором мощности отопительной системы.	Температура нагрева прибора варьируется в диапазоне +40...+85 °C
Vaillant eloBLOCK VE 6 /14	До 100 м²	1. Настенный электрический котёл. 2. Возможно использование в системах «Теплый пол». 3. Возможность расширения в каскад котлами 24 и 28 кВт. 4. Каскадирование до 7 котлов (через модуль VR 32B).	Температура нагрева прибора варьируется в диапазоне +25...+85 °C
Kospel ЕКСО. L2 12	100–120 м²	В устройстве предусмотрены системы, предотвращающие перегревание либо замерзание жидкости. При аварийных ситуациях прибор отключается автоматически с помощью блокиратора. Прибор может совмещаться с бойлерами горячего водоснабжения. Устройство оснащается встроенным регулятором температурного режима, насосом с автоматизированной системой работы, манометром.	Температура теплоносителя регулируется в пределах +20...+85 °C

При выборе солнечных гелиоколлекторов необходимо опираться на следующие параметры: занимаемая площадь гелиоколлектора; площадь, на которую падает солнечное излучение (площадь апертуры); КПД гелиоколлекторов; диаметр конденсатора (для коллекторов вакуумного типа); комплект поставки.

Солнечные гелиоколлекторы делят на: плоский коллектор, вакуумный гелиоколлектор, гелиоколлектор-концентратор, жидкостный коллектор [4].

Расчет мощности электрического котла [5]:

$$N_1 = S \times \frac{N_{уд}}{10} = 12,4 \text{ кВт}$$

Дом современный, утепленный, поэтому $k = 0,6$

$$N_{котла} = N_1 \times k \times 25\% = 9,3 \text{ кВт}$$

Исходя из проделанных расчетов, можно сделать вывод о том, что нам хватит мощности от 6 до 7 кВт. Выбираем электрический котел Vaillant eloBLOCK VE 6 /14 [6].

Для теплоснабжения коттеджа можно применять любой из предложенных видов гелиоколлекторов. Но по сумме характеристик и с учетом стоимостных показателей наиболее оптимальным выбором можно признать вакуумный гелиоколлектор 30R1 [7].

В среднем на одного человека в день расходуется 40 литров воды. Чтобы рассчитать объем ёмкостного нагревателя, необходимо учитывать около 2 суточные потребности [8].

Тогда:

$$40 \cdot 4 \cdot 2 = 320 \text{ л.}$$

Средняя температура входящей воды 15 °C. Она должна быть нагрета до 50 °C.

$$50 - 15 = 35^\circ\text{C.}$$

Количество энергии, необходимой для нагревания этого количества воды. Чтобы нагреть один литр воды на один градус, надо затратить энергию, равную 1 Ккал.

$$320 \cdot 35 = 11200 \text{ ккал.}$$

Для перевода энергии в кВт·ч используется отношение 1 кВт·ч = 859,8 ккал:

$$\frac{11200}{859,8} = 13,02 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Рассматривается расположение солнечной установки в городе Волковыске. В июле солнечная энергия на 1 м^2 составляет $4,98 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^2 / \text{день}$, а в феврале $1,81 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^2 / \text{день}$.

Вакуумный гелиоколлектор 30R1 способен поглощать до 0,95 % энергии солнца. Рассчитывается значение передачи поглощения энергии вакуумными трубками для июля и февраля.

Для июля:

$$4,98 \cdot 0,95 = 4,73 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^2 / \text{день}$$

Для февраля:

$$1,81 \cdot 0,95 = 1,71 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^2 / \text{день}$$

Определение необходимого числа трубок. Энергия, которую необходимо затратить на нагрев нужного количества воды составляет $9,77 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. Энергия, которую может передать одна вакуумная трубка в зависимости от месяца, составляет $1,64 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ и $0,36 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

$$\begin{aligned} \text{Июль: } & \frac{9,77}{1,64} = 6 \text{ трубок;} \\ \text{Февраль: } & \frac{9,77}{0,36} = 1.63 \text{ трубка} \end{aligned}$$

Список литературы

1. Гибридные системы отопления, использующие ВИЭ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://aqua-therm.ru/articles/articles_616.html. – Дата доступа: 16.08.2021.
2. Как совместить отопление дома котлом и солнечным коллектором [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://neosolar.ru/otopitel'nyy-kotel-i-solnechnyy-kollektor.php>. – Дата доступа: 16.08.2021.
3. Город котлов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gorodkotlov.by/catalog/kotly/elektricheskie1/tenovye/elektricheskiy-kotel-vaillant-eloblock-ve-14/?yclid=717172967633639764>. – Дата доступа: 12.12.2021.
4. Волчок, В. А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Солнечная энергетика : пособие / В. А. Волчок, В. Н. Комар. – Гродно : ГрГУ, 2017. – 55 с.
5. Как произвести расчёт отопления частного дома? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://m-strana.ru/articles/raschet-otopleniya-chastnogo-doma-kalkulyator>.
6. Электрокотлы Vaillant eloBLOCK [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://prest.by/catalog/elektrokotly/elektrokotly-vaillant/?utm_source=yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=61303081&yclid=718015347843979567. – Дата доступа: 10.01.2022.
7. Солнечный коллектор SILA 30R1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://e-solarpower.ru/solar-kollektors/solnechnye-kollektory/solnechnyy-kollektor-sila-30r1/>. – Дата доступа: 10.01.2022.
8. Расчет гелиоколлектора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studall.org/all2-135261.html>. – Дата доступа: 10.01.2022.

Development of the structure of a hybrid heat supply system based on a solar collector and an electric boiler. Heating with an electric (heating) boiler and solar collectors includes: Heating boiler – electric (solid or liquid fuel); solar collector; storage tank with heat exchanger; automatic control unit; water heated floor system. The described heating system is completely autonomous, it functions practically without user intervention.

Аплевич Диана Валерьевна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, dinazayr2001@gmail.com.

Научный руководитель – Кропачева Людмила Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

УДК 620.9

Д. В. АПЛЕВИЧ

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Представлена методика расчета потерь гибридных систем теплоснабжения.

Гибридная энергетическая система обычно состоит из первичного возобновляемого источника энергии (ВИЭ), работающего параллельно с резервным вторичным невозобновляемым модулем [1]. Такие системы, в которых тепло вырабатывается комбинированно, называют гибридными системами отопления. Они работают на основе нескольких источников энергии. Гибридные системы отопления объединяют в одном здании несколько устройств, которые служат для приготовления горячей воды [2].

Для расчета гибридных систем теплоснабжения необходимо знать:

- общую площадь дома (этажность) и высоту;
- количество солнечных дней в году;
- параметры теплоносителя (температура, вязкость, теплопроводность);
- стоимость монтажа;
- сезонность использования систем отопления, которая определяет мощность установок.

В частных секторах и многоквартирных зданиях наблюдается потеря тепла через крышу, окна и стены [3, 4]. Причинами подобных проблем становятся: некачественная теплоизоляция стен, крыши и фундамента, заводской брак или засоренность радиатора, нагрев стены радиатором, из-за чего тепло отдается улице и т. д.

Для того чтобы произвести расчет теплопотерь здания и определить количество кВт тепла через различные источники, которое теряет данный объект, необходимо воспользоваться следующими формулами, приведенными в таблице 1.

Таблица 1 – Формулы и коэффициенты для расчёта теплопотерь здания [5, 6].

Потери	Формула	Коэффициенты потерь
Расход тепла на нагрев приточного воздуха	$Q_i = 0,28 \cdot L_n \cdot \rho \cdot C \cdot (t_p - t_i) \cdot k$	Q_i – количество тепла, необходимое для нагрева инфильтрации, Вт; L_n – расход удаляемого воздуха, м ³ /ч; ρ – плотность воздуха в помещении, кг/м ³ , принимаем равной 1,1; C – удельная теплоемкость воздуха, кДж/кг×К; t_p – температура воздуха помещения, °С; t_i – температура наружного воздуха, °С; k – коэффициент учета встречного теплового потока в конструкциях.
Потери тепла через полы, потолки и стены	$Q_{\text{пол}} = k_{\text{пол,стен,пот}} \cdot F_{\text{пол,стен,пот}} (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}})$ $k_{\text{пол,стен,пот}} - \text{рассчитывается по формуле}$ $k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{нар}}} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}}}$	$Q_{\text{пол, стен, пот.}}$ – теплопотери через пол, Вт; $k_{\text{пол, стен, пот.}}$ – коэффициент теплопередачи пола, Вт/м ² ×°С; $F_{\text{пол, стен, пот}}$ – площадь пола, м ² ; $t_{\text{вн}}$ – температура воздуха внутри, °С; $t_{\text{нар}}$ – температура воздуха / грунта снаружи, °С; k – коэффициент теплопередачи стены, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}$; d_1 – толщина первого слоя стены, м; λ_1 – коэффициент теплопроводности первого слоя стены, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; d_2 – толщина второго слоя стены (например, пенопласта), м; λ_2 – коэффициент теплопроводности второго слоя стены, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи от внутреннего воздуха к стене, принимаем равным 8,7; $\alpha_{\text{нар}}$ – коэффициент теплоотдачи от стены к наружному воздуху.
Потери давления на участках систем водяного отопления	$\Delta P = \Delta P_1 \cdot \Delta P_n = R \cdot l \frac{\rho \cdot v^2}{2} \Sigma \epsilon$	ΔP_1 – потери давления на трение в трубопроводе участка системы отопления, Па; ΔP_n – потери давления в местных сопротивлениях на участке системы отопления, Па;

		<p>ρ – плотность транспортируемого теплоносителя, кг/м^3;</p> <p>λ – коэффициент гидравлического трения;</p> <p>d, l – соответственно внутренний диаметр и длина трубопровода на участке системы отопления, м;</p> <p>Σ – сумма коэффициентов местных гидравлических сопротивлений на участке;</p> <p>v – скорость теплоносителя, м/с.</p>
--	--	---

Существуют следующие наборы гибридных систем:

- Котел и гелиосистема.
- Котел и тепловой насос.
- Тепловой насос и гелиосистема.

Гибридные системы теплоснабжения позволяют обеспечить тепло в системах отопления, горячего водоснабжения, а также охлаждения и вентиляции. Поскольку стоимость энергоносителей изначально различна, появляется возможность снижения затрат на отопления, что является преимуществом данных систем. Эффект экономии гибридных систем значительно повышается с использованием ВИЭ, так как стоимость энергии, получаемой от этих источников, определяется лишь стоимостью электроэнергии, затраченной на обеспечение работы оборудования. Поэтому гибридная отопительная система делает дом экономически выгодным, ликвидным на рынке недвижимости.

Преимуществом от использования гибридных систем теплоснабжения является повышение отказоустойчивости системы. Так, при отказе одного из теплогенераторов сразу же включится другой, выполняющий функцию резервного. Огромным плюсом может являться внедрение в такие системы аккумуляторов тепла, поскольку они обеспечивают резерв в критических ситуациях.

Главным достоинством гибридных систем становится такой показатель, как их высокая экологичность. Такая система отлично подойдет для домов ЭКО поселений (поселения, созданные для экологически чистого пространства). Установочную стоимость можно существенно снизить, если часть системы заложить на стадии монтажа фундамента будущего дома. Гибридная отопительная система – это действительно выгодное вложение денег с годовым доходом более 10 %.

Список литературы

1. Типы систем теплоснабжения. Системы теплоснабжения – закрытые и открытые: преимущества и недостатки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tofp.ru/boilers/typy-sistem-teplosnabzheniya-sistemy-teplosnabzheniya-zakrytye-i.html>. – Дата доступа: 09.01.2022.
2. Классификация систем теплоснабжения. Системы теплоснабжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://chaospace.ru/klassifikaciya-sistem-teplosnabzheniya-sistemy-teplosnabzheniya.html>. – Дата доступа: 09.01.2022.
3. Типы систем отопления: обзор традиционных и инновационных способов обогрева [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://akak7.ru/typy-sistem-otopleniya-obzor-tradicionnyx-i-innovacionnyx-sposobov-obogreva.html>. – Дата доступа: 08.01.2022.
4. Техничко-экономический расчет системы теплоснабжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/3545651/page:16/>. – Дата доступа: 09.03.2022.
5. Лабейш, В. Г. Тепломассообмен : метод. рек. к выполнению лабораторных работ / В. Г. Лабейш. – СПб. : СЗТУ, 2003. – 29 с.
6. Гибридные системы отопления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.odoms.ru/otoplenie/1614-gibridnye-sistemy-otopleniia.html>. – Дата доступа: 10.01.2022.

The methodology for calculating hybrid heat supply systems is based on the calculation of the heat losses of the building. Hybrid heat supply systems allow you to provide heat in heating, hot water, and cooling and ventilation systems that use several energy carriers in one or more heat generators.

Аплевич Диана Валерьевна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, dinazayr2001@gmail.com.

Научный руководитель – Кропачева Людмила Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

А. Д. БЕЛАЕЦ

МИНИ-КЛАВИАТУРА НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Почти вся современная электронная техника работает под управлением микроконтроллеров. Они находятся практически во всех бытовых приборах – стиральная машина, микроволновая печь, утюг и другие – область их применения практически безгранична.

Рассмотрим понятие микроконтроллера, его назначения и области применения. В ознакомительных целях автором статьи была разработана и собрана мини-клавиатура, управляемая микроконтроллером. Процесс создания, так же как и её характеристики, будут описаны ниже.

В большинстве случаев умные приборы управляются микроконтроллерами – чипами, содержащих микропроцессорное ядро, память и периферийные устройства [1]. Периферия включает в себя порты входа-выхода, таймеры, преобразователи импульсов и др.

Микроконтроллер часто путают с понятием микропроцессора. Но последний является лишь частью микроконтроллера и выполняет математические и логические операции.

Работы над изобретением микропроцессоров велись с начала 1970-х годов. Первая компания, выпустившая его, стала Intel [1]. Вместе с микропроцессорами появились и микроконтроллеры. 15 ноября 1971 года Intel выпустила первый микроконтроллер 4004 (рисунок 1).

Существуют 3 критерия различия микроконтроллеров: разрядность, архитектура памяти, система команд [3].

**Рисунок 1**

Разрядность определяет, сколько команд за 1 такт могут быть приняты. Чем она больше – быстрее работает микроконтроллер. Деление происходит на 8-, 16-, 32-, 64-бита.

Архитектура памяти определяет то, каким образом распределяется и используется память в микроконтроллере. Существуют Гарвардская архитектура и архитектура Фон-Неймана. Гарвардская архитектура содержит энергонезависимую память EEPROM, оперативную память SRAM и память программ FLASH [2]. Архитектура Фон-Неймана сегодня практически не используется.

Система команд определяет, какие команды используются микроконтроллером. Существуют 2 основные системы: RISC и CISC. RISC также называют быстрой системой команд, так как она ориентирована на быстрое выполнение (1–2 такта). CISC является, напротив, полной системой команд. Они выполняются дольше (1–4 такта), предоставляя, в свою очередь, больше контроля над процессами.

Для демонстрации возможностей современных микроконтроллеров была поставлена задача: сконструировать и собрать простое электронное устройство, с целью упрощения пользования персональным компьютером или мобильным телефоном. Автором статьи было собрано устройство, представляющее из себя 6 программируемых клавиш – мини-клавиатура (рисунки 2, 3).

**Рисунок 2****Рисунок 3**

Полученное устройство относительно просто в сборке, также существенно дешевле готовых решений, имеющихся на рынке. Данная мини-клавиатура имеет современный интерфейс подключения USB, что позволяет использовать его в большинстве устройств. 6 программируемых механических клавиш (Cherry MX) позволяют назначить любые системные действия, записать пользовательские макросы. Мини-клавиатура совместима с операционными системами Windows, Linux, OS X, Android.

Область применения устройства довольно широка и ограничивается фантазией пользователя. Удобно применять особое сочетание клавиш для работы, подключать устройство в случаях, когда полноразмерная клавиатура является излишней и неудобной, находит место применение в игровой сфере.

Управляет устройством микропроцессор Atmega328p на плате Arduino NANO. Данная плата была выбрана ввиду её возможностей, легкости в использовании, невысокой стоимости, большого количества свободных портов, простоты программирования микроконтроллера, что в свою очередь освобождает от необходимости докупать программатор для работы с микроконтроллером. Питание платы и микропроцессора требует 5 вольт, которые присутствуют в USB-интерфейсе.

Схема принципиальная приведена на рисунке 4. Для реализации интерфейса USB используются 4 провода: +5V и общий, два остальных сигнальные – DATA+ и DATA-. Для передачи сигнала напряжение не должно превышать 3.6 вольт, для чего использовались соответствующие стабилитроны. Резистор R3 является управляемой подтяжкой на канал DATA-.

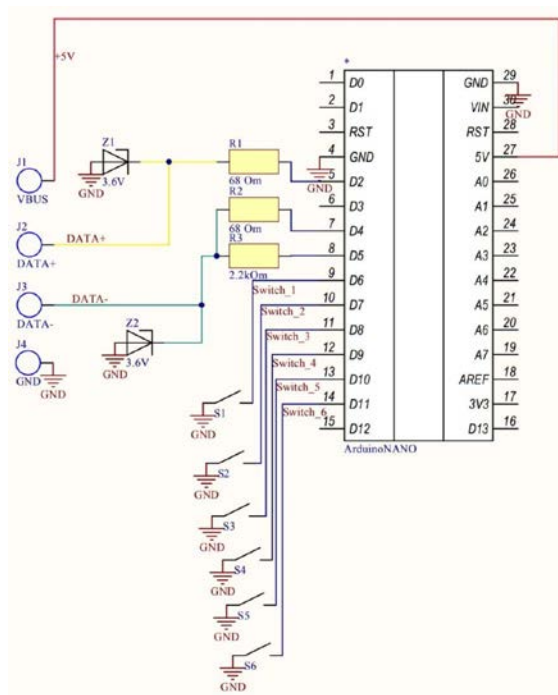


Рисунок 4

Для разработки печатной платы, а также схемы электрической принципиальной использовалась среда автоматизированного проектирования и черчения (САПР) Altium Designer 17. Изготовленная печатная плата представлена на рисунке 5.

Для изготовления устройства автором статьи была выбрана технология ЛУТ.



Рисунок 5

Основной принцип данной технологии заключается в переводе рисунка печатной платы с бумаги на стеклотекстолит при помощи нагрева. Для этого необходимо использовать лазерный принтер и глянцевую бумагу. Под воздействием температуры тоник на бумаге переводится на печатную плату. Плюс данной технологии – простота и минимум времени, затраченного на изготовление печатной платы. Для вытравливания меди был использован раствор лимонной кислоты в перексиде водорода.

Когда печатная плата изготовлена, необходимо залудить её контакты и впаять необходимые элементы на свои места – 3 резистора, 2 стабилитрона. После помещения платы в корпус, сборка клавиатуры завершена.

Программная часть представляет собой код, библиотека для работы которого была найдена на электронном ресурсе [4]. Как было сказано ранее, кнопки можно запрограммировать на любые действия и записать любые макросы.

Таким образом, разработать и создать полезное устройство под управлением микроконтроллера в домашних условиях стало намного проще обычному пользователю. Собственные решения позволяют получить устройства, которые либо существенно дешевле своих аналогов на рынке, либо не имеют их вовсе. Это стало возможно ввиду доступности микроконтроллеров, их массовости производства, а также выпуска различных программ и ПО для облегчения работы и программирования микроконтроллеров.

Список литературы

1. Future2day [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://future2day.ru/mikrokontroller>.
2. Prog-cpp [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://prog-cpp.ru/micro-memory>.
3. Электрик Инфо [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electrik.info>.
4. Git Hub [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com>.

Modern electronic equipment is controlled by microcontrollers. They are found in almost all household appliances – washing machine, microwave oven, iron and others – their application is almost limitless.

Белаец Арсений Денисович, студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, whoovesed42@gmail.com.

Научный руководитель – *Комар Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, v.komar@grsu.by.

УДК 621.316

А. Ч. БОБНИС

ЦИФРОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ И УМНЫЕ ЭНЕРГОСЕТИ

Произведен анализ современных цифровых подстанций (ЦПС), кратко изложено определение и цели создания ЦПС, дано описание структуры, а также исследованы рекомендуемые стандартами протоколы данных. Определены условия совмещения и разделения структурных уровней и способы виртуализации. Конкретизированы преимущества и недостатки ЦПС, а также рассмотрены реальные примеры ЦПС в РБ и мире.

Стандарт МЭК 61580 позволил создавать подстанции нового поколения – цифровые, которые должны стать элементами умной сети, а точнее, «интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью». Внедрение МЭК 61850 дало возможность связать всё технологическое оборудование подстанции единой информационной сетью, по которой передаются не только данные от измерительных устройств к терминалам релейной защиты и автоматики (РЗА), но и сигналы управления.

Термины и определения цифровых подстанций. Появление новых международных стандартов и развитие современных информационных технологий открывает возможности инновационных подходов к решению задач автоматизации и управления энергообъектами, позволяя создать подстанцию нового типа. Одним из элементов SmartGrid систем принято считать цифровую подстанцию.

Термин «цифровая подстанция», как и определение SmartGrid систем, появился относительно недавно и трактуется по-разному специалистами в области энергетики.

Цифровая подстанция (ЦПС) – это подстанция с высоким уровнем автоматизации, в которой практически все процессы информационного обмена между элементами подстанции (ПС), а также управление работой ПС осуществляются в цифровом виде на основе стандартов серии МЭК 61850 [1, 2].

Цели создания цифровой подстанции. Непосредственными целями создания ЦПС являются:

- совершенствование мониторинга и управления электросетевым оборудованием ПС;
- повышение надежности работы и эффективности эксплуатации оборудования техники «вторичных цепей» подстанции путем развития и унификации основных информационно-технологических и управляющих систем (ИТС) ПС, в том числе:

– автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП),
 – релейной защиты и автоматики (РЗА), автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого и технического учета электроэнергии (АИИС КУЭ), связи и др.;

- переход к «необслуживаемым» подстанциям, т. е. к подстанциям без постоянного дежурства на них оперативного персонала, управляемым из удаленных центров управления (с помощью команд телеуправления).

Описание структуры цифровой подстанции.

Цифровая подстанция подразумевает особое цифровое построение и взаимодействие технологических систем подстанции (таких как АСУ ТП, РЗА, АИИС КУЭ и пр.) между системами, внутри каждой системы и между первичным оборудованием и системами [3].

Работа и управление цифровыми подстанциями основывается на программно-техническом комплексе цифровой подстанции (ПТК ЦПС), который разделен на структурные уровни (рис. 1), которые объединяются между собой посредством сегментов локально-вычислительной сети Ethernet [4].



Рисунок 1 – Системные уровни программно-технического комплекса цифровой подстанции

Уровень процесса.

Назначение:

- организация сопряжения основного оборудования с ПТК ЦПС;
- сбор дискретной информации с «сухих» контактов основного оборудования и её оцифровка;
- сбор аналоговой информации и её оцифровка;
- передача собранной информации на вышестоящие уровни;
- получение команд управления от вышестоящих уровней в цифровом виде с воздействием на основное оборудование.

Состав:

В случае отсутствия у основного оборудования встроенного цифрового интерфейса для оцифровки сигналов используют устройства сопряжения с объектом (УСО).

Уровень присоединения.

Назначение:

- прием и обработка данных, получаемых от устройств уровня присоединения;
- выполнение соответствующих алгоритмов прикладных функций с передачей режимной и диагностической информации на уровень шины подстанции;
- обмен информацией с уровнями процесса.

Состав:

▪ интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ), выполняющие прикладные функции АСТУ, включая РЗА, для соответствующего основного оборудования [5, с. 24–26].

Уровень подстанции.

Назначение:

- консолидация информации, получаемой от уровня присоединения;
- обеспечение скоординированного выполнения команд оператора непосредственно на подстанции и/или команд вышестоящего уровня управления с формированием управляющих воздействий с использованием сервисов МЭК 61850-8-1;
- прием и обработка данных, получаемых от устройств уровня присоединения;
- выполнение соответствующих алгоритмов прикладных функций с передачей режимной и диагностической информации на уровень шины подстанции;
- обмен информацией с уровнями процесса.

Состав:

- сервера АСУ ТП / ССПИ;
- сервера и АРМ SCADA системы ЦПС;
- устройства регистрации параметров переходных процессов в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах;
- средства информационной интеграции цифровой ПС и ЦУС в соответствии с МЭК 61850-90-2.

Данный уровень должен быть образован серверами, объединенными в отказоустойчивый кластер, на платформе виртуализации которого работают сервера и АРМ уровня подстанции.

Совмещение и разделение уровней процесса, присоединения и подстанции.

Обеспечивается надежное и эффективное применение следующих технических решений:

- раздельная реализация уровней процесса и присоединения для напряжения 110/220 кВ;
- совмещение уровней процесса и присоединения для напряжения 6, 10, 20 и 35 кВ на базе унифицированных многофункциональных терминалов РЗА/контроллеров присоединений;
- отдельная реализация уровня подстанции [5, с. 33].

Протоколы передачи данных.

Рекомендуется в части применения протоколов передачи данных (и применении соответствующего оборудования) руководствоваться приведенной ниже таблицей [5, с. 33–34]:

Таблица 1 – Протоколы передачи данных

Класс напряжения РУ	Протоколы передачи данных	Примечания
6, 10, 20 кВ	MMS, GOOSE	Протокол SV применяется только для вводных ячеек РУ
35 кВ	MMS, GOOSE	Протокол SV применяется для вводных ячеек РУ. Применение протокола SV для измерений в рамках РУ может быть применено при дополнительном обосновании
110, 220 кВ	MMS, GOOSE, SV	

Виртуализация уровня присоединения.

Для разделения трафика (РЗА, АСУТП, АИИС КУЭ, видеонаблюдение, связь и др.), совместно использующего среду передачи, а также с целью повышения безопасности, должна использоваться технология виртуальных локальных сетей (VLAN). Разделение трафика по VLAN должно выполняться на стадии проектирования объекта с учетом приоритезации и логической сегрегации трафика. При необходимости, связь между VLAN должна осуществляться через соответствующие маршрутизаторы [5, с. 38–42].

Преимущества и недостатки цифровых подстанций.

Анализируя цифровую подстанцию, можно выделить ряд преимуществ, таких как:

- 1) упрощение вторичных присоединений;
- 2) повышение качества измерения;
- 3) отсутствует электрическая связь между первичным и вторичным оборудованием;
- 4) единая информационная платформа;
- 5) уменьшение размеров централизованных диспетчерских помещений на подстанции.

При всех преимуществах цифровой подстанции, у нее есть недостатки:

- 1) требует установку нового дорогостоящего оборудования, которое пока имеет небольшой период опытной эксплуатации. Однако при переходе на серийный выпуск продукции стоимость данного решения не будет превышать стоимости традиционных решений систем автоматизации;
- 2) не накоплен опыт внедрения и эксплуатации, необходимо обучение персонала.

Примеры цифровых подстанций.

В феврале 2015 года в Гомельэнерго введена в работу ПС-110 «Приречная» с применением системы Hard Fiber Process Bus GE Multilin. Подстанция предназначена для электроснабжения строящегося городского микрорайона «Шведская горка».

19 ноября 2021 года в Беларуси в Могилевском районе состоялось открытие первой в Республике цифровой подстанции напряжения 330 кВ «Могилев-330».

Стоит отметить, что делегация ГПО «Белэнерго» посещала действующую цифровую подстанцию 225/90/20 кВ «Вюсаух» («Блоко») во Франции, что является подтверждением цифровизации в мире.

В настоящее время уже решен большой комплекс вопросов, стоявших на пути внедрения цифровых подстанций. Данные результаты уже сегодня позволяют реализовывать пилотные проекты цифровых подстанций и накапливать опыт проектирования, монтажа, наладки и эксплуатации.

Для серийной реализации проектов цифровых подстанций должна быть создана нормативная база, обеспечивающая легитимность принимаемых в рамках проектов решений, а также приняты руководящие указания по проектированию и наладке таких объектов.

Состав первоочередных работ в этой области должен включать разработку:

- руководящих указаний по обеспечению надежности передачи данных в рамках цифровых подстанций;
- методик моделирования информационной сети цифровых подстанций для оценки информационной нагрузки по протоколам МЭК 61850;
- нормативной базы, создание эталонов и методик поверки в части метрологических характеристик аналого-цифровых преобразователей с цифровым интерфейсом по протоколу МЭК 61850;

- требований к составу и содержанию проектной документации на цифровые подстанции в части передачи данных по протоколам стандарта МЭК 61850.

Реализация вышеуказанных шагов позволит создать не только нормативную базу для принимаемых в рамках решений проектов, но и крепкую основу для повышения экономической эффективности проектов цифровых подстанций.

Список литературы

1. What is the digital substation and what makes it digital? [Electronic resource] // EEP – Electrical Engineering Portal. – Mode of access: <https://electrical-engineering-portal.com/digital-substation#:~:text=The%20Digital%20Substation%20is%20a,technology%20in%20the%20substation%20environment.> – Date of access: 22.02.2022.
2. СТО 56947007-29.240.10.248-2017. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС) [Электронный ресурс]. – Взамен СТО 56947007-29.240.10.028-2009 ; введ. 25.08.2017. – М. : ПАО «ФСК ЕЭС», 2017. – 135 с. – Режим доступа: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.240.10.248-2017.pdf. – Дата доступа: 18.02.2022.
3. МЭК-61850 [Электронный ресурс] // Википедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%AD%D0%9A-61850#%D0%A1%D1%81%D1%8B%D0%BB%D0%BA%D0%B8>. – Дата доступа: 21.02.2022.
4. Цифровая подстанция. Эффективные решения [Электронный ресурс] // Журнал «ИСУП». – Режим доступа: <https://isup.ru/articles/72/13855/>. – Дата доступа: 15.02.2022.
5. СТО 34.01-21-004-2019. Цифровой питающий центр. Требования к технологическому проектированию цифровых подстанций напряжением 110–220 кВ и узловых цифровых подстанций напряжением 35 кВ [Электронный ресурс]. – Введ. 29.03.2019. – М. : ПАО «Россети», 2019. – 114 с. – Режим доступа: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293_730/4293730674.pdf. – Дата доступа: 18.02.2022.

The article analyzes modern digital substations, summarizes the definition and objectives of the creation of a DS, describes the structure, and examines the data protocols recommended by the standards. The conditions for combining and separating structural levels and methods of virtualization are defined. The advantages and disadvantages of the DS are specified, as well as real examples of the DS in the Republic of Belarus and the world are considered.

Бобнис Анастасия Чеславовна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, nastya.bobnis@mail.ru.

Научный руководитель – *Кропачева Людмила Владимировна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

УДК 621.313.333

А. А. БОЙКО, К. В. АВТУХ

ОДНОФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Асинхронные электродвигатели сегодня считаются чуть ли не основным компонентом бытовых электроприборов. Поскольку бытовые электрические машины имеют особенности по мощности и энергетическим возможностям, то и конструкция электродвигателей имеет существенные отличия. Для правильного применения различных типов электродвигателей необходимо знать, как они устроены.

Асинхронные машины, как и другие электрические машины, обратимы и могут работать в качестве как двигателя, так и генератора. Как правило, асинхронные машины используются в качестве двигателей. Электрические моторы бывают синхронными и асинхронными. Разница между ними состоит в том, что в синхронном скорость вращения якоря совпадает с вращением магнитного поля, а в асинхронном ротор несколько отстает [1].

Однофазный асинхронный электродвигатель – это асинхронный электродвигатель, который работает от электрической сети однофазного переменного тока без использования частотного преобразователя и который в основном режиме работы (после пуска) использует только одну обмотку (фазу) статора. Однофазный двигатель схож по строению с трехфазным асинхронным двигателем, различием является количество фазных обмоток, у однофазного не три, а две обмотки – пусковая и рабочая, причем постоянно работает только одна обмотка – рабочая.

Главный недостаток однофазного тока – невозможность генерации им магнитного поля, исполняющего вращение. По этой причине однофазный электромотор не запустится сам при подсоединении к сети.

Основными компонентами любого электродвигателя являются ротор и статор. Ротор – вращающаяся часть электродвигателя, статор – неподвижная часть электродвигателя, с помощью которого создается магнитное поле для вращения ротора. Между статором и ротором имеется воздушный зазор, позволяющий ротору свободно вращаться. Ротор вращается из-за наводимых магнитным полем статора токов [2].

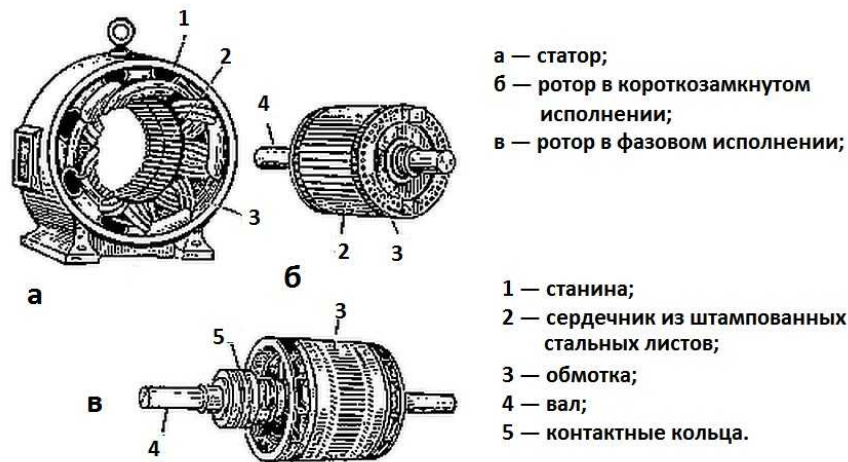


Рисунок 1 – Асинхронный двигатель в разобранном виде: основные узлы и части

Ротор однофазного электродвигателя представляет собой такой же металлический вал, который оснащается обмоткой. На валу собирается ферромагнитный каркас из шихтованной стали по ее внешней поверхности продельваются пазы. В пазах на валу ротора устанавливаются стержни из меди или алюминия, которые выступают в роли обмотки, проводящей электрический ток. На концах стержни соединяются двумя кольцами, из-за такой конструкции его также называют беличьей клеткой.

При воздействии электромагнитного потока от статора на короткозамкнутые обмотки ротора в беличьей клетке начинает протекать ток. Ферромагнитная вставка на валу помогает усилить поток, проходящий через него. Однако далеко не во всех моделях существует магнитный проводник, в некоторых он выполняется из немагнитных сплавов.

Конструкция статора в однофазном электродвигателе имеет такой же состав, как и в большинстве электрических машин: металлический корпус; установленный внутри магнитопровод из ферромагнитного материала; обмотка статора, представленная медными проводниками.

Обмотки статора такого электродвигателя подразделяются на две – основную, она же рабочая, через которую осуществляется постоянная циркуляция нагрузки и пусковая, которая задействуется только в момент запуска. Обе обмотки однофазного двигателя расположены под углом 90° друг относительно друга. Такая конструкция делает их схожими с двухфазными электродвигателями, где также применяются две обмотки.

Но их объем, относительно всего пространства асинхронного двигателя отличается, основная составляет только $2/3$ от общего числа пазов, а пусковые обмотки занимают $1/3$ [3].

Асинхронный электродвигатель отличается тем, что частота вращения ротора и магнитного поля, создаваемого статором, у него неравны. То есть, ротор вращается несинхронно с полем, что и дало название этому типу машин. Характерно, в рабочем режиме скорость его вращения меньше. Второе название этого типа двигателей – индукционные. Это название связано с тем, что движение происходит за счёт наводимых на нём токов индукции.

Для того чтобы ротор асинхронного двигателя пришел в движение, статорная обмотка должна создать вращающееся магнитное поле. В трехфазном двигателе такое поле создается благодаря трехфазной обмотке. Но рабочая обмотка однофазного двигателя создает не вращающееся, а пульсирующее магнитное поле. Это поле можно разложить на два – прямое и обратное. Прямое поле вращается с синхронной скоростью n_1 в направлении вращения ротора и создает основной электромагнитный момент. Скольжение ротора относительно прямого поля равно:

$$s_{np} = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1}$$

Обратное поле вращается против ротора, поэтому частота вращения ротора отрицательная относительно этого поля:

$$s_{np} = \frac{(n_1 - (-n_2))}{n_1} = \frac{2n_1}{n_1} - \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} = 2 - s$$

Каждое поле наводит ЭДС, благодаря которым по ротору начинают протекать токи. Из формул выведенных выше, можно сделать вывод, что частота тока, наводимого обратным полем, намного больше частоты тока прямого поля. В связи с этим, индуктивное сопротивление, которое увеличивается с ростом частоты, приобретает большое значение и становится намного больше активного сопротивления. Поэтому ток обратного поля является практически индуктивным и оказывает размагничивающее действие на поток обратного магнитного поля. Как следствие, момент, создаваемый этим полем, невелик, и направлен против вращения ротора [4].

$$M = M_{\text{пр}} - M_{\text{обр}}$$

В момент, когда ротор неподвижен, ось симметрии между этими двумя полями также неподвижна, а значит, не создается вращающего магнитного поля, и как следствие, двигатель не работает. Чтобы привести его в движение, нужно прокрутить ротор, для того чтобы ось симметрии сместилась. Но выполнять это механически не имеет смысла, поэтому для того, чтобы запустить однофазный двигатель, создали пусковую обмотку. Пусковая обмотка совместно с рабочей создает вращающееся магнитное поле, необходимое для запуска двигателя. Для этого необходимо, чтобы МДС обоих обмоток были равны, а также угол между ними составлял 90° . Кроме того, необходимо, чтобы и токи в этих обмотках были смещены на 90° . В этом случае создается так называемое круговое магнитное поле, при котором результирующий электромагнитный момент максимален. Если же эти условия выполнены с отклонениями, то создается эллиптическое магнитное поле, при котором момент ниже из-за увеличенного тормозного момента обратного поля.

В реальных условиях пуск однофазного двигателя осуществляется с помощью одновременного нажатия на кнопки, подающие питание и подключающие пусковую обмотку к цепи.

Для того чтобы создать фазовый сдвиг в 90° между токами рабочей и пусковой обмотки, используют фазосмещающие элементы (ФЭ). Это может быть активное сопротивление, катушка или конденсатор. Большое распространение получили однофазные двигатели с активным сопротивлением в качестве фазосмещающего элемента. Увеличение сопротивления пусковой обмотки достигается с помощью уменьшения сечения провода, а так как эта обмотка работает короткий промежуток времени в момент пуска, то это не причиняет обмотке вреда [4].

Но активное сопротивление, так же как и индуктивное, не создает требуемого смещения в 90° между токами, зато такое смещение создает конденсатор. Емкость этого конденсатора подбирают таким образом, чтобы ток пусковой обмотки, опережал по фазе напряжение на некоторый угол, который необходим для того, чтобы смещение между токами стало 90° . Благодаря этому создается круговое магнитное поле. Но конденсаторы применяются в качестве фазосмещающего элемента реже, потому что для обеспечения смещения в 90° нужен конденсатор большой емкости и, как правило, относительно высокого напряжения. Кроме того, габариты этого конденсатора велики, что также играет роль [5].

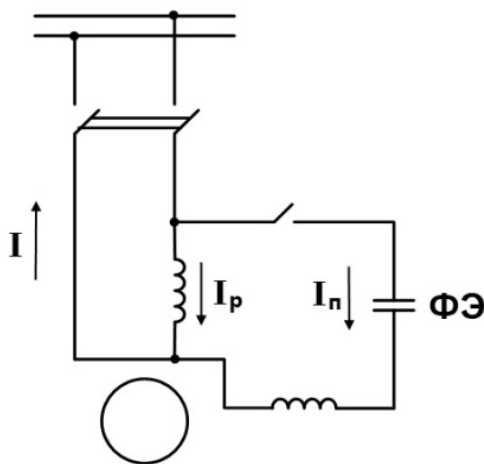


Рисунок 2 – Схема устройства асинхронного двигателя с фазосмещающим элементом

Электродвигатели однофазные 220 В являются приводами небольшой мощности, которые подключаются к однофазной сети переменного тока. Параметры технических характеристик однофазных асинхронных электромоторов уступают трехфазным. Примечательно, что при одинаковых габаритах с трехфазными электродвигателями они уступают в показателе мощности, КПД, перегрузочной способности и частоте вращения на холостом ходу. Такие электромоторы нашли широкое применение в бытовой сфере. Они могут служить комплектацией к стиральным машинам, вентиляторам, электроинструменту, кухонной и бытовой технике.

Список литературы

1. Двигатель однофазный переменного тока – принцип работы и устройство агрегата [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elektrik-a.su/elektrooborudovanie/instrumenty/dvigateli/dvigatel-odnofaznyj-peremennogo-toka-1022>. – Дата доступа: 10.03.2022.
2. Устройство и принцип работы асинхронного двигателя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elektroznatok.ru/oborudovanie/asinhronnyj-dvigatel>. – Дата доступа: 10.03.2022.
3. Однофазный асинхронный электродвигатель – устройство, принцип работы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.asutpp.ru/odnofaznye-asinhronnye-elektrodvigateli.html>. – Дата доступа: 10.03.2022.
4. Однофазный асинхронный двигатель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electroandi.ru/elektricheskie-mashiny/asdvig/odnofaznyj-asinhronnyj-dvigatel.html>. – Дата доступа: 10.03.2022.
5. Однофазные и двухфазные асинхронные двигатели [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/main/electroshemy/515-odnofaznye-i-dvukhfaznye-asinhronnye.html>. – Дата доступа: 10.03.2022.

Asynchronous electric motors are today considered almost the basic component of household electrical appliances. Since household electrical machines have features in terms of their power and energy capabilities, the design of electric motors also has significant differences. For the correct application of various types of electric motor, one must know their visibility.

Бойко Ангелина Алексеевна, студентка 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, angelinabojko2017@gmail.com.

Автух Карина Владимировна, студентка 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, karinaavtuh@gmail.com.

Научный руководитель – *Комар Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, v.komar@grsu.by.

УДК 621.313.333

А. А. БОЙКО, К. В. АВТУХ

РЕЖИМ РАБОТЫ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Асинхронные машины – это довольно распространённые электрические машины. В настоящее время практически все электроприводы представляют собой нерегулируемые приводы с асинхронными двигателями. Они нашли широкое применение в теплоснабжении, водоснабжении, системах кондиционирования и вентиляции, компрессорных установках и других сферах.

Асинхронная машина – электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой не эквивалентна частоте вращения электромагнитного поля, создаваемого током медной обмотки статора. Асинхронный означает неодновременный, имеется в виду, что частота вращения магнитного поля статора всегда больше частоты вращения ротора у асинхронных двигателей. Работают асинхронные двигатели от сети переменного тока. Основными конструктивными элементами асинхронной машины являются статор и ротор [1]. Сердечник статора 1 закрепляется в корпусе 2, называемом станиной, а сердечник ротора 3 устанавливается на валу 4. Вал вращается в подшипниках 5, расположенных в подшипниковых щитах 6. Сердечники статора и ротора собираются из отдельных изолированных листов электротехнической стали (шихтуются). На внутренней поверхности статора и внешней поверхности ротора имеются пазы, в которых размещаются обмотки. Обмотка статора 7 обычно выполняется трехфазной и включается в сеть переменного тока. Обмотка ротора может быть двух типов: фазная и короткозамкнутая. Фазный ротор содержит трёхфазную обмотку, практически не отличающуюся от обмотки на статоре. В большинстве случаев концы обмоток фазного ротора соединены звездой, где свободные концы подводятся к контактным кольцам 10. При помощи щёток 11, подключённых к кольцам, можно ввести дополнительный резистор в цепь обмотки ротора. Этот резистор нужен для того, чтобы изменять активное сопротивление в цепи ротора, которое способствует уменьшению больших пусковых токов.

Короткозамкнутый ротор представляет собой сердечник, собранный из стальных листов. В пазах этого сердечника заливается расплавленный алюминий, из-за чего образуются стержни, замкнутые накоротко торцевыми кольцами 12. Данная конструкция называется «беличьей клеткой». В двигателях с большой мощностью заливается медь.

Режим работы асинхронной машины зависит от относительной частоты вращения ротора, называемой *скольжением*: $s = \frac{n_1 - n}{n}$, где n_1 – частота вращения поля статора (синхронная частота); n – частота вращения ротора.

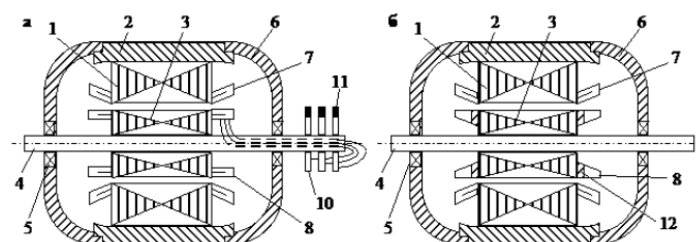


Рисунок 1 – Элементы асинхронной машины: статор и ротор

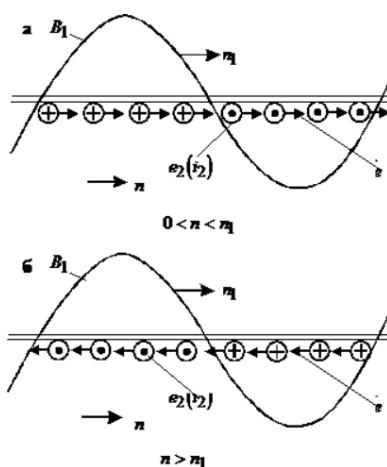
Скольжение является крайне важной величиной. При начальном моменте времени скольжение равно единичному значению, но относительная разность частот становится меньше по мере возрастания частоты вращения ротора, из-за чего в проводниках ротора уменьшаются ЭДС и ток, которые влекут за собой уменьшение вращающего момента. Во время режима холостого хода, т. е. когда двигатель совершает работу без нагрузки на валу, скольжение является минимальным значением, но оно возрастает до величины критического скольжения, путем увеличением статического момента. При превышении данного значения может произойти опрокидывание двигателя, что впоследствии приведет к его нестабильной работе. Значение скольжения лежит в диапазоне от 0 до 1, для двигателей общего назначения в номинальном режиме оно составляет 1–8 %.

При наступлении равновесия между электромагнитным моментом, который вызывает вращение ротора, и тормозным моментом, который создает нагрузку на валу двигателя, процессы изменения величин прекратятся. Из этого следует, что принцип работы асинхронного двигателя заключен во взаимодействии токов, наводимых магнитным полем в роторе и самим вращающимся магнитным полем статора. Когда вращающийся момент возникает тогда, когда существует разность частот вращения магнитных полей [2]. Существует четыре режима работы асинхронной машины.

Таблица 1 – Режимы работы асинхронной машины

Режим			
Двигательный	Генераторный	Электромагнитного тормоза	Трансформаторный
$s = 0 \div 1$	$s < 0$	$s > 1$	$s = 1$
$n = 0 \div n_1$	$n > n_1$	$n < 0$	$n = 0$

При $1 > s > 0$ магнитное поле статора, вращаясь относительно ротора, наводит в обмотке ротора ЭДС ε_2 . Под действием этой ЭДС в короткозамкнутой обмотке ротора потечет ток, сдвинутый относительно ЭДС на некоторый угол.

Рисунок 2 – Направление ЭДС при $1 > s > 0$

Активная составляющая тока ротора совпадает по фазе с ЭДС и силы, обусловленные этой составляющей, будут действовать на стержни ротора в направлении вращения поля. Машина работает в режиме *двигателя*. Результирующий электромагнитный момент от реактивной составляющей тока ротора равен нулю. Для получения *генераторного* режима необходимо увеличить частоту вращения ротора выше синхронной. При этом направление ЭДС и активных составляющих токов в стержнях меняется на противоположное, а следовательно, меняется и направление действия сил. В генераторном режиме асинхронные машины используются редко, так как для своей работы они требуют реактивную мощность. В сетях, где имеется избыток реактивной мощности, установка асинхронного генератора может дать ощутимый экономический эффект по сравнению с синхронным генератором. Тормозной режим электрической машины применяется лишь при необходимости быстрой остановки момента вращения ротора двигателя. Данный режим создается противовключением двигателя. Чтобы его совершить, нужно направить вращение магнитного поля статора в противоположную сторону. Для этого достаточно переключить любую пару проводов, которые соединяют обмотку статора с сетью, посредством изменения порядка следования фаз на зажимах статора. В начальный период времени, после переключения проводов, инерциальные силы вращающихся частей двигателя и исполнительного механизма продолжают совершать вращение ротора в прежнем направлении, когда вращающееся поле статора начинает вращаться в противоположном направлении. В итоге получаем, что электромагнитная мощность машины в режиме тормоза составляет лишь малую долю электрических потерь в роторе. Когда большая часть этих потерь уходит на вращающиеся по инерции части двигателя и исполнительного механизма. К недостаткам данного способа торможения следует отнести: большие потери энергии, значительные броски тока во время переключения проводов на обмотках статора. Двигатели с контактными кольцами включают сопротивление, чтобы ограничить бросок тока при торможении. Кроме того, во время торможения двигателя данным способом нужно отключить его от сети в момент его остановки, иначе ротор начнет вращаться в другом направлении [3].

Трансформаторный режим имеет место, когда ротор неподвижен ($s = 1$). Этот режим используется в асинхронных машинах с фазным ротором для получения регулируемого по амплитуде или фазе напряжения. Наибольшее распространение получил двигательный режим работы асинхронной машины. Асинхронные двигатели являются основным типом электрических двигателей, применяемых в современных технологических процессах. Электротехническая промышленность выпускает асинхронные двигатели в большом диапазоне мощностей – от нескольких десятков мегаватт, применяемых для привода насосов и компрессоров, до нескольких ватт, применяемых в системах автоматики. Наиболее широкое распространение получили асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором благодаря их простоте и невысокой стоимости. Но эти двигатели имеют и недостатки: трудность регулирования частоты вращения и большой пусковой ток. Асинхронные двигатели с фазным ротором лишены этих недостатков. Но это достигается ценой усложнения конструкции ротора, что приводит к заметному удорожанию двигателя и снижению его надежности. Поэтому асинхронные двигатели с фазным ротором применяются лишь при тяжелых условиях пуска, а также в электроприводах, где требуется регулирование частоты вращения. Асинхронный двигатель является самым распространенным типом двигателя переменного тока. Если ротор асинхронной машины находится в неподвижном состоянии, либо же частота вращения ротора меньше синхронной, то вращающееся электромагнитное поле проходит через электрические проводники медной обмотки ротора и соответственно индуцирует в них электродвижущую силу, под воздействием которой по медной обмотке ротора двигателя течёт ток. На электрические проводники с током данной обмотки ротора, находящимся в электромагнитном поле медной обмотки возбужденного состояния, действуют силы магнитного воздействия определённого размера. Из-за прикладываемого усилия порождается магнитный вращающий момент, который тянет ротор за электромагнитным полем.

Таким образом, существуют четыре режима работы асинхронной машины: двигательный режим, генераторный режим, режим электромагнитного тормоза и трансформаторный. Каждому из данных режимов соответствует определенный диапазон изменения коэффициента скольжения: когда в двигательном режиме скольжение может изменяться от нуля до единицы, в генераторном – от нуля до минус бесконечности, а в тормозном – от единицы до плюс бесконечности [4].

Список литературы

1. Асинхронная машина и ее режимы работы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=17913>. – Дата доступа: 10.03.2022.
2. Электрические машины – асинхронные машины [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://leg.co.ua/knigi/oborudovanie/elektricheskie-mashiny-6.html>. – Дата доступа: 10.03.2022.
3. Асинхронные машины. Устройство асинхронных машин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/6826363/page:30/#54>. – Дата доступа: 10.03.2022.
4. Режимы работы асинхронной машины [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/6826363/page:31>. – Дата доступа: 10.03.2022.

Asynchronous machines are the most common type of AC brushless electrical machines. An asynchronous machine is an alternating current machine in which, in the steady state, the stator magnetic field, which is involved in the main energy conversion process, and the rotor rotate at different speeds. Asynchronous motors, which form the basis of a modern electric drive, are predominantly used: the drive of automation devices, household electrical appliances, and the drive of large mining equipment.

Бойко Ангелина Алексеевна, студентка 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, angelinabojko2017@gmail.com.

Автух Карина Владимировна, студентка 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, karinaavtuh@gmail.com.

Научный руководитель – *Комар Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, v.komar@grsu.by.

УДК. 62.1

Т. А. БОРОДУЛИН

АНАЛОГОВЫЙ БЛОК АКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Предложен блок эффектов для электрогитары, который представляет собой устройство, преобразующее звук музыкального инструмента с целью получения специфических искажений. В состав блока входят модули, построенные на базе популярных интегральных микросхем.

Схема устройства состоит из четырёх модулей: 1) блок управления; 2) блок distortion; 3) блок delay; 4) эквалайзер.

Устройство включается в линию между инструментом и звуковым усилителем и оснащено входными и выходными разъемами типа TS. Между каждым модулем установлен разделительный конденсатор. В схеме присутствует возможность подключения в цепь других блоков эффектов, что позволит расширить функционал устройства. Для изменения параметров эффекта используются переменные резисторы. В зависимости от вида включенного эффекта изменяются функциональные возможности. К ним относятся тон (tone), громкость (volume), степень добавления эффекта и др.

Схема блока управления представлена на рисунке 1 и реализована на базе микросхемы K155TM2, на которой сделаны RS-триггеры, управляемые кнопками. Выходы RS-0442-риггеров управляют ключами, подающими питание на обмотки электромагнитных реле, коммутирующих различные блоки эффектов. Реализовано 4 варианта эффектов: включен Distortion; включен Delay; включены оба эффекта; оба эффекта выключены. При включении устройства, всегда используется вариант 4 – эффекты выключены. Данная функция реализована за счет наличия RC-цепочек, сбрасывающих установки триггеров.

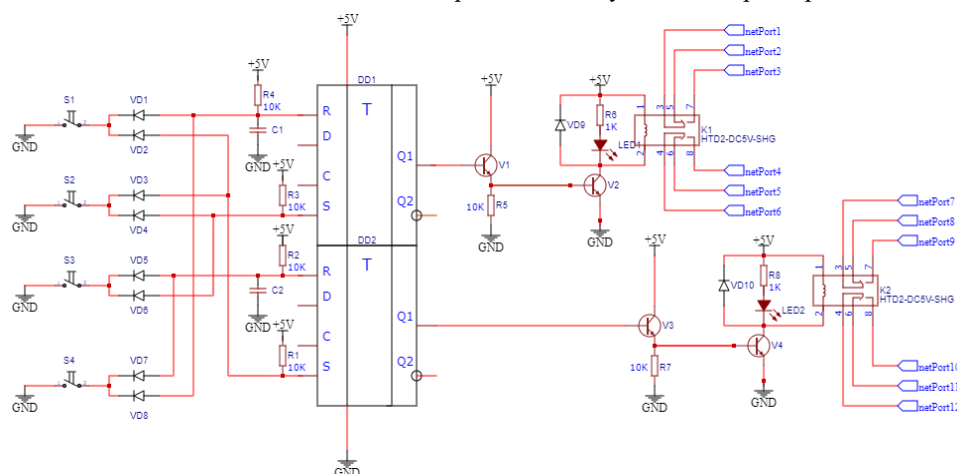


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема блока управления

Блок эффекта Distortion (рисунок 2) построен на 4 операционных усилителях, входящих в состав 2 микросхем TL072. В середине схемы присутствуют 3 цепи встречно-параллельно включенных диодов и ключ для переключения между ними. Их назначение – ограничение амплитуды сигнала и создания эффекта «перегрузки» за счет обрезания вершущек сигнала. В схеме присутствуют 3 переменных резистора, отвечающих за регулировку перегруза, громкости и тона.

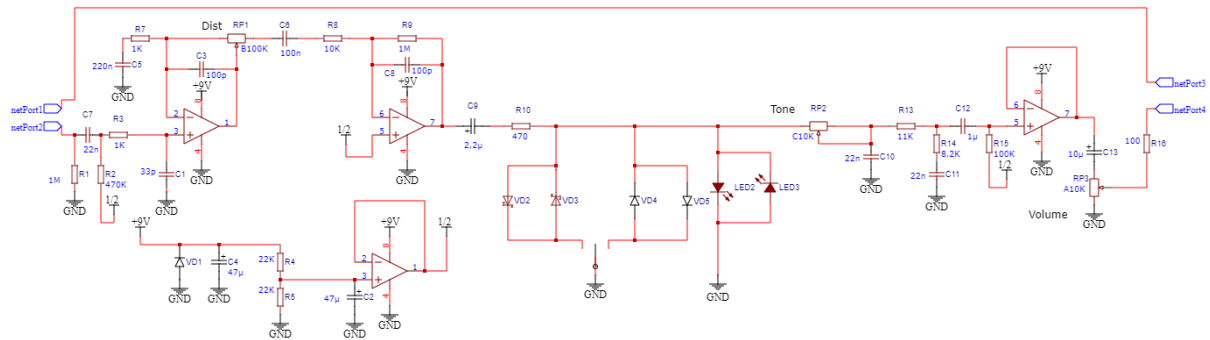


Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема блока эффектов Distortion

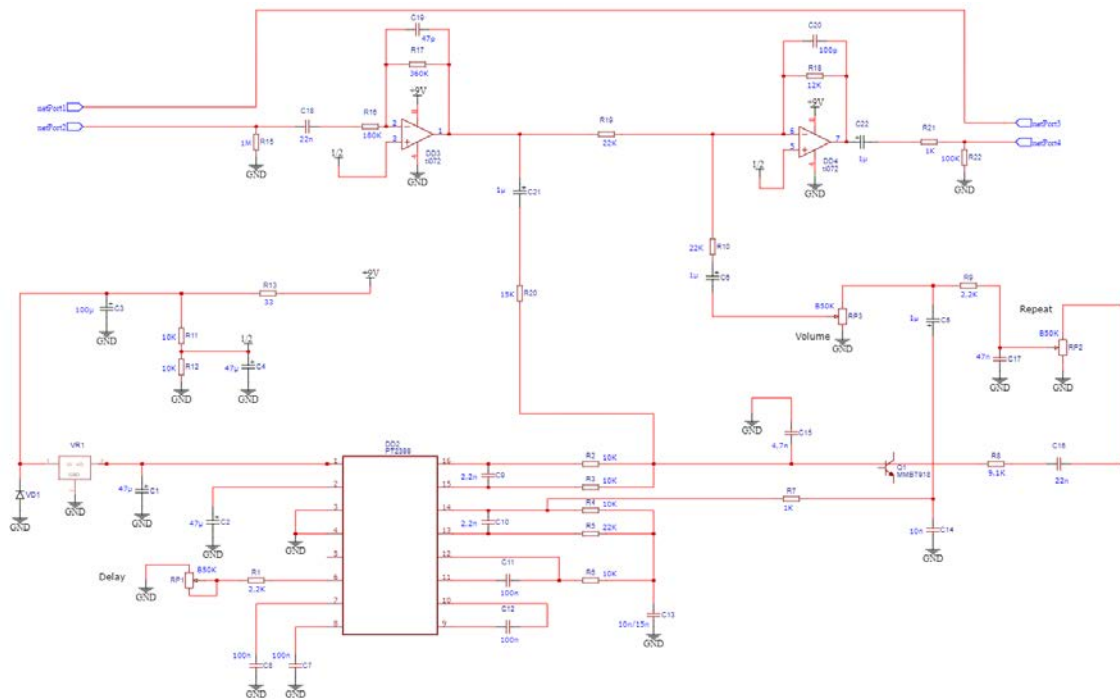


Рисунок 3 – Принципиальная электрическая схема блока эффекта Delay

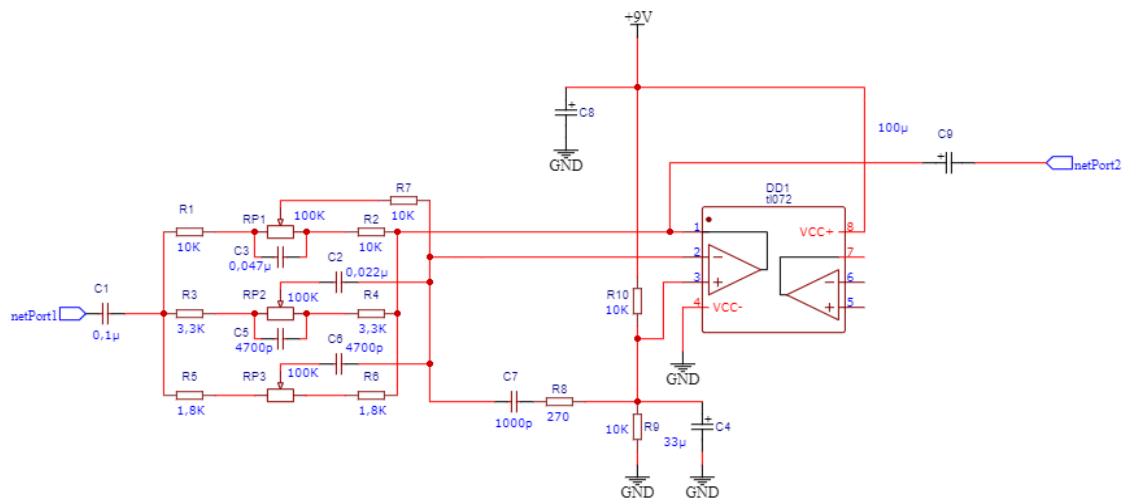


Рисунок 4 – Принципиальная электрическая схема эквалайзера

Блок эффекта Delay (рисунок 3) состоит из двух частей. Первая (верхняя) часть построена на двух операционных усилителях, входящих в состав микросхемы TL072. Вторая (нижняя) построена на микросхеме PT2399, которая и генерирует эффект «эхо». Так как микросхема PT2399 работает при напряжении питания 5 вольт, для поддержания её стабильной работы используется интегральный стабилизатор типа 7805. В схеме присутствуют 3 переменных резистора. Каждый из этих резисторов отвечает за регулировку определённого параметра: длительность задержки сигнала; громкость; количество повторов сигнала.

Блок трёхполосного эквалайзера (рисунок 4) также построен на базе микросхемы TL072. За каждую из полос эквалайзера отвечает переменный резистор, используемый для регулирования низких, средних и высоких частот в выходном сигнале.

Список литературы

1. Виды гитарных педалей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://united-store.ru/gitarnye-effecty-vidy-i-primenenie>. – Дата доступа: 24.11.2021.
2. Галкин, В. И. Начинаящему радиолюбителю : справ. пособие / В. И. Галкин. – Минск : Беларусь, 1983. – 223 с.
3. Технические характеристики радиоэлементов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by>. – Дата доступа: 10.12.2021.

In the following article the electric guitar effects unit is offered, which constitutes a device that processes the sound of a musical instrument in order to receive specifical distortings. This unit consists of modules based on popular integrated circuits.

Бородулин Тимофей Андреевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, timofej.borodulin@mail.ru.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, german@grsu.by.

УДК 53.07

М. А. БОЧКО

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ И ПРОЦЕССОВ

Описана модернизация созданной автором экспериментальной вакуумной установки на основе самодельной вакуумной камеры и пластинчато-роторного насоса ЗНВР-1Д, используемая для проведения экспериментов и демонстрации физических явлений и процессов.

Целью настоящей работы является модернизация экспериментальной вакуумной системы, изготовленной ранее автором, оснащенной необходимым оборудованием для дальнейшего изучения ионообразования в плазме тлеющего разряда.

Данная установка может быть применена в демонстрационном эксперименте, а также использоваться для модификации поверхностных слоёв металлов посредством ионной имплантации и создания тонокопленочных покрытий на поверхности деталей путём вакуумного напыления.

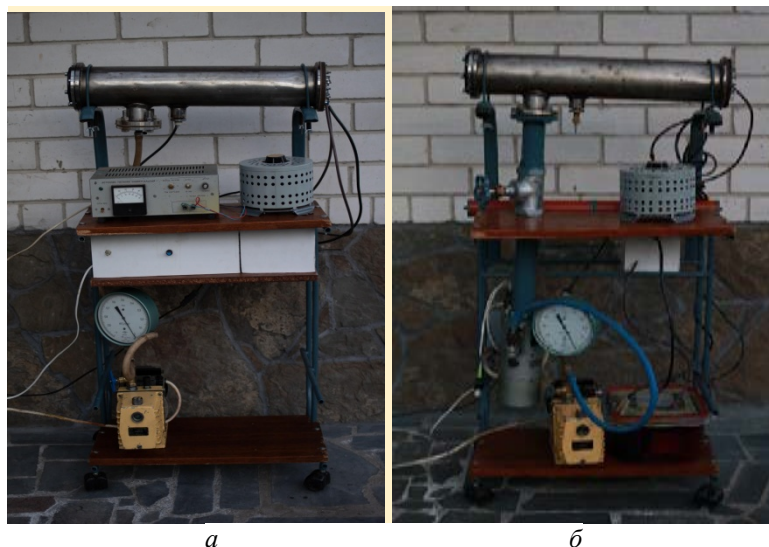
Конструкция предыдущей версии вакуумной системы была оснащена лишь одной ступенью откачки, что сильно ограничивало возможности научного эксперимента (рисунок 1а), новая же система дополнительно оснащена второй системой откачки, представленной диффузионным насосом (рисунок 1б), а также более совершенной системой питания высоким напряжением [1].

Откачка производится в две стадии:

1) пластинчато-роторным насосом ЗНВР-1Д создаётся предварительный вакуум, данная модель способна создать разрежение до 1,1 Па и имеет скорость откачивания 1,25 л/с.

После создания предварительного вакуума включается диффузионный насос типа Н-0.025-2, способный создавать давление порядка $1,3 \times 10^{-5}$ Па и быстротой действия не менее 10 л/с, для создания более низкого вакуума. Насосы данного типа очень требовательны к степени предварительного вакуума, который должен быть не менее 10 Па, в противном случае масло, выступающее в роли материала, захватывающего молекулы остаточного газа, начнёт пригорать, что немедленно приведёт к загрязнению всего объёма системы парами продуктов горения масла, а также может привести к выходу из строя самого диффузионного насоса.

Предыдущая версия установки была оснащена двумя источниками высокого напряжения, что в процессе эксперимента показало неэффективность их использования. Поэтому модернизированная установка оснащена одним мощным источником высокого напряжения.



а) внешний вид первой версии вакуумной установки;
б) внешний вид модернизированной вакуумной установки

Рисунок 1

Высоковольтный источник состоит из повышающего трансформатора мощностью около двух киловатт и с максимальным выходным напряжением до тридцати киловольт, а также удвоителя напряжения, залитого парафином, что позволяет получать импульсное высоковольтное напряжение порядка шестидесяти киловольт. Высоковольтный трансформатор необходимо эксплуатировать в диэлектрической среде, с этой целью в настоящий момент используется обезвоженное трансформаторное масло, в качестве ёмкости был выбран пластиковый контейнер из Fix Price необходимых габаритов. Для регулировки выходного напряжения используется лабораторный автотрансформатор, включённый в цепь первичной обмотки повышающего трансформатора, что позволяет получать высоковольтное напряжение в очень широком спектре. Данный источник высокого напряжения необходим для генерации плазмы тлеющего разряда относительно высокой плотности, а также ускорения образованных в плазме ионов.

Для контроля давления в камере будет применён вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ-2 (рисунок 2), в котором были заменены старые электролитические конденсаторы на новые, поскольку старые конденсаторы из-за влияния времени высохли.



Рисунок 2 – Внешний вид вакуумметра ионизационно-термопарного ВИТ-2

В настоящее время производятся работы по модернизации вакуумметра с целью получения более точных, а также преобразованных и оцифрованных в единицах давления данных, для этого используется программируемый модуль arduino, а также модуль 16-битного АЦП ADS1115, для усиления аналогового сигнала используется микросхема операционного усилителя KP140УД8Б. Для перевода аналоговых значений напряжения, поступающих в модуль АЦП ADS1115, в значения давления за основу был взят график из паспорта для преобразователя манометрического термопарного ПМТ-2, который был сначала оцифрован по точкам, а затем с помощью программы была подобрана максимально приближенная функция, что вводит незначительную погрешность лишь в области малых давлений.

В настоящее время установка проходит испытания, в результате которых были найдены и устранены незначительные течи со стороны фланца с электродами и некоторых соединений.

При проведении экспериментов зарегистрированы интересные явления, наблюдаемые в вакуумной камере. Фрагменты видео, демонстрирующие данные явления, представлены по ссылке (https://youtube/CORu8h_J8zk) .

Список литературы

1. Бочко, М. А. Экспериментальная вакуумная система для демонстрации физических явлений / М. А. Бочко // Физика конденсированного состояния : материалы XXIX междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 22–23 апр. 2021 г. / ГрГУ им. Янки Купалы, физ.-техн. фак. ; редкол.: Г. А. Гачко (гл. ред.), Н. Г. Валько (зам. гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2021. – С. 241–244.
2. Грошковский, Я. Техника высокого вакуума : пер. с пол. / Я. Грошковский. – М. : Мир, 1975.
3. Дэшман, С. Научные основы вакуумной техники : пер. с англ. / С. Дэшман. – М. : Мир, 1964.
4. Вакуумная техника / под ред. Е. С. Фролова, В. Е. Минайчева. – М. : Машиностроение, 1985.

In this paper describes created by author an experimental vacuum system, based on a home-made vacuum chamber and a 3HBP-1D lamellar-rotary pump The vacuum system is used to experiments and demonstrate physical phenomena and processes.

Бочко Матвей Андреевич, студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, matvey.bochko.2003@mail.ru.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, german@grsu.by.

УДК 629.3.066

Е. О. ГАЛИМОВ

КСЕНОНОВЫЕ ЛАМПЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В АВТОМОБИЛЯХ

Исследуются ксеноновые лампы. Ксеноновые лампы – это одни из самых популярных типов источников света для использования в головной оптике транспортных средств. Однако необходимо знать, что это такое, какими параметрами обладает и почему на сегодняшний день является лучшим оборудованием для повышения безопасности на дороге при непогоде и в ночное время.

Ксеноновые автомобильные лампы – это газоразрядный источник света, который обеспечивает очень яркое свечение, близкое к естественному дневному. Особенностью работы является наличие в колбе с электрической дугой газа ксенона. В такой схеме нет необходимости использовать нить накаливания, которая легко может перегореть вследствие изменения напряжения [1].

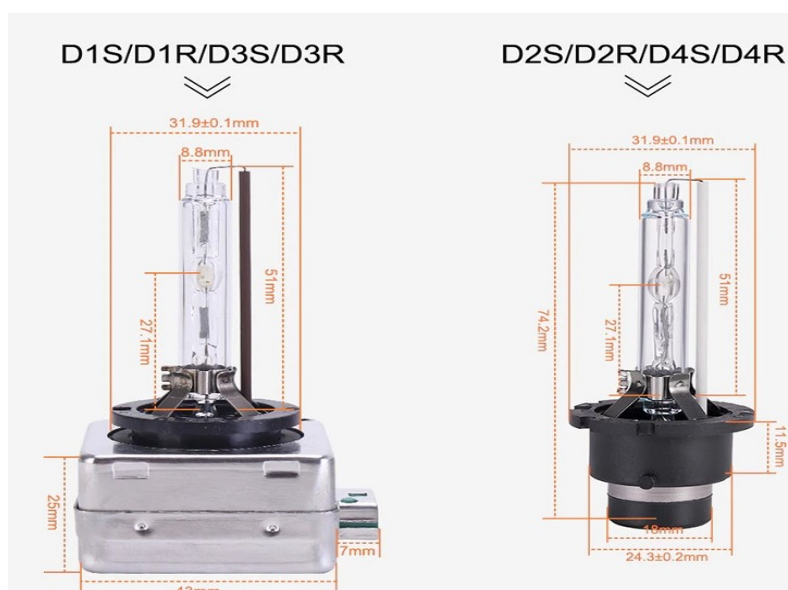


Рисунок 1 – Ксеноновые лампы MGTV

С появлением идеи освещения дороги перед мчащимся автомобилем несколько типов источников освещения сменяли друг друга. Сначала автомобили были оснащены газовыми, а именно пропановыми лампами. Вскоре на смену им пришли вакуумные лампы накаливания, затем галогеновые лампы. Теперь настали времена ксеноновых ламп. Первая газоразрядная ксеноновая лампа для автомобиля была разработана не кем-нибудь, а фирмой Philips, носила она аскетичное имя D2S (R). HID-лампы (High Intensity Discharge, или в простонародье «ксеноновая лампа») стали применяться в автомобильных осветительных приборах с 1992 года. Цель, которую преследовала фирма Philips – увеличение яркости света. Ксеноновая лампа имеет цветовую температуру 4000–12 000 К и обладает максимально приближенным к солнечному свету спектром излучения, обеспечивая наиболее естественное освещение [2].

Лампа сконструирована из специальной трубки, хорошо запаиванной, состоящей из прочного стекла или же надежного кварца. Внутри этой трубки находится смесь инертных газов под большим давлением. Большая часть всей смеси газов připадает на ксенон. Внутри колбы также находится два электрода, обеспечивающие пропуск электрического тока и образование электрической дуги для розжига газа. Чтобы активизировать газ, понадобится огромное количество энергии, превращающейся впоследствии в высоковольтный импульс, благодаря специальному устройству – блоку розжига, принцип работы которого схож с трансформатором.

Стекланный корпус изделия – это и есть трубка, которая может быть разной формы. Именно в трубку по обе вертикальные стороны впаиваются электроды, между которыми при подаче высоковольтного импульса от 23 000 В до 30 000 В и активизируется электрическая дуга. В колбе есть и еще один электрод, сделанный в виде тонкой металлической дорожки, которая проходит вертикально сквозь всю трубку. Этот электрод необходим для ионизации газового состава и запуска разряда [3].

Электроды выполнены из вольфрама, который позволяет обеспечить между контактами достаточно сильную дугу. Для повышения эффективности они покрыты специальным напылением, в основном это торий или молибден. Также в электроды встроены металлические пластины, усиливающие дугу. Сами электроды выполнены в форме конуса, что уменьшает время зажигания. В среднем горение ксенона начинается спустя пару миллисекунд после начала поступления энергии на контакты. Во время включения лампы, плазма возле катода начинает излучать свечение. Ток на двух электродах, расположенных на небольшом расстоянии, способствует образованию электрической дуги, которая нагревает газоразрядную смесь [4].

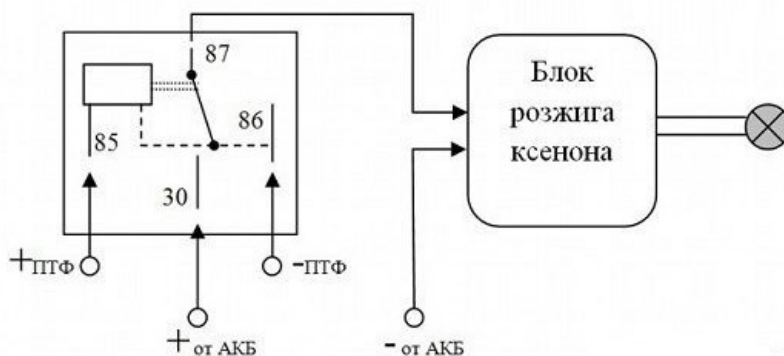


Рисунок 2 – Схема подключения ксеноновой лампы

На рисунке 2 видно, что на обмотку обычного реле света (контакты 85 и 86) подаётся напряжение, которое в штатной схеме подводилось к контактам «галогенки». В результате замыкаются контакты 87 и 30 реле, которые используются в качестве выключателя, «врезанного» в плюсовой провод, идущий непосредственно от аккумулятора. Таким образом, исключаются потери напряжения, подаваемого на блок розжига, и облегчается «запуск» ксеноновой лампы – цепь становится практически автономной. Такой способ идеально подходит не только для того, чтобы подключить ксенон в противотуманки, но и для переделки основных фар.

На сегодняшний день, выбирая лампочки для дальнего и ближнего света, обязательно нужно обращать внимание на модели ксенонового типа. Популярными производителями ксеноновых автомобильных ламп являются: Osram (Германия); VIPER (Южная Корея); Neolux (Германия); SVS (Россия); Vizant (Россия); ClearLight (Южная Корея); MTF (Южная Корея).

Osram XENARC ORIGINAL D2S 66240 35W – эта ксеноновая лампа с одним режимом яркости, является лучшей по соотношению цены и качества. Она отличается типоразмером D2S, а также предназначена для ближнего и дальнего света. Данная модель имеет мощность 35 Вт и рабочее напряжение 85 В. Среди других эксплуатационных характеристик стоит выделить оптимальную цветовую температуру 4300 К и световой поток 3200 лм. Важной особенностью автоламп является её долгий срок работы. При правильном монтаже и бережном использовании она способна прослужить владельцу транспортного средства не менее 3000 ч.

VIPER D2R 5500K представляет собой универсальную авто лампу ксенонового типа, которая подходит на большинство современных автомобилей. Она имеет нестандартный типоразмер D2R, что может вызывать определённые сложности во время монтажа. Данная модель подходит для фар ближнего и дальнего света. Она излучает дневной белый свет с цветовой температурой 5500 К. Благодаря этому снижается нагрузка на глаза водителя и уменьшается риск возникновения аварийных ситуаций. Мощность осветительного прибора составляет стандартные 35 Вт, а рабочее напряжение – 85 В.

Биксеноновая лампа Vizant 6BI H4 6000K является бюджетной моделью и подходит исключительно для легковых автомобилей, где может быть использована в фарах дальнего и ближнего света. Она имеет наиболее популярный тип цоколя (H4) и стандартную мощность 35 Вт. Лампочка освещает дорогу холодным белым светом с цветовой температурой 6000 К. Он подавляет выделение гормона мелатонина, отвечающего за регуляцию сна, и не даёт водителю заснуть за рулём. Среди других преимуществ покупатели отмечают долговечность осветительного прибора, способного работать более 3000 ч. В зависимости от режима работы лампы, световой поток может составлять 2600 лм или 3200 лм [5].

Цветность стандартного ксенона составляет 4300 Кельвинов. Это самый оптимальный тепло-белый свет, который необходим для качественного освещения дорожного полотна. Данный спектр обеспечивает освещение дороги, обочины. Не рассеивается и не кристаллизуется, что важно в плохих метеорологических условиях при дожде или же мокром асфальте.

Ксенон на 5000 Кельвинов также часто используется водителями, и обладает достаточно высокой эффективностью, хотя интенсивность света и освещённость дороги немного снижена, по сравнению со стандартным бело-теплым свечением в 4300 кельвинов. Такие лампы используются для ночных поездок, но не имеют максимального эффекта при сильном дожде или же туманности.

Ксенон на 6000 Кельвинов очень редко используется на наших дорогах, поскольку голубой – это спектр, приближенный к синему, а поэтому он не обеспечивает качественное освещение дорожного полотна ни ночью, ни при погоде. Его яркость максимально снижена, по сравнению с предыдущими цветностями, что не может в полной мере гарантировать качественную и насыщенную видимость дороги для водителя.



Рисунок 3 – Цветовая температура ксеноновых ламп

Достоинством ксеноновых ламп является их долговечность. Их срок службы примерно в шесть раз больше, чем у галогеновых, и составляет примерно 3000 часов. Таким образом, эти лампы приходят в негодность после трех-четырех лет использования, в то время как «галогенки» перегорают каждые полгода.

Еще одно преимущество ксеноновых фар в том, что они значительно лучше освещают дорогу при дожде и тумане. Кроме того, ксенон, в отличие от галогена значительно лучше рассеивается, а значит, в меньшей степени ослепляет водителей других автомобилей.

В довершение всего, ксеноновые фары выгодно отличаются от других количеством потребляемой мощности. Низкая потребляемая мощность влияет на такой бытовой факт, как загрязнение стекол фар. Дело в том, что при длительном свечении фары ее стекло сильно нагревается. На горячем стекле дорожная грязь лучше подсушивается, и соответственно, ее тяжелее потом отмыть. Ксеноновые лампы не допускают перегрева стекла фары и возникновения на нем трещин.

Однако, помимо очевидных преимуществ, ксеноновые лампы обладают и рядом недостатков. Основным минусом «ксенона» является высокая цена. На цену главным образом влияет необходимость установки дополнительного электрического блока. Сами лампы тоже стоят несколько дороже остальных.

Еще одним фактором, влияющим на цену, является необходимость установки автоматического корректора угла фар и омывателя. Наличие этих устройств способно обезопасить других водителей от ослепления мощным светом ксенона [6].

Список литературы

1. Конструкция и принцип работы ксеноновых ламп, их технические характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tmglass.ru/osveshhenie/avto/konstruktsiya-i-printsip-raboty-ksenonovyh-lamp-ih-tehnicheskie-harakteristiki>. – Дата доступа: 01.03.2022.
2. Ксеноновая лампа. Общие сведения о лампе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://trigada.ucoz.com/publ/ksenonovaja_lampa_obshhie_svedeniya_o_lampe/1-1-0-364. – Дата доступа: 01.03.2022.
3. Принцип работы ксеноновых ламп [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://xenon-lampa.ru/cat-avtomobilnoe-osveschenie/a-printsip-raboty-ksenonovyh-lamp>. – Дата доступа: 01.03.2022.
4. Ксеноновые лампы: особенности использования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.asutpp.ru/ksenonovye-lampy.html>. – Дата доступа: 01.03.2022.
5. Популярные производители автоламп для ближнего и дальнего света [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zuzako.com/rejting-luchshih-ksenonovyh-lamp-v-avto/#osram-xenarc-original-d2s-66240-35w>. – Дата доступа: 01.03.2022.
6. Ксеноновые лампы: устройство, установка, достоинства и недостатки, штрафы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.drive2.ru/b/477160009982017911>. – Дата доступа: 01.03.2022.

Xenon lamps are one of the most popular types of light sources for use in the head optics of vehicles. However, it is necessary to know what it is, what parameters it has, and why today it is the best equipment for improving road safety in bad weather and at night.

Галимов Егор Олегович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, galimov.egor.2001@mail.ru.

Научный руководитель – *Комар Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, v.komar@grsu.by.

УДК 621

Е. О. ГАЛИМОВ

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА В БЕЛАРУСИ

Беларусь делает ставку на развитие альтернативной энергетики, расширяет круг поставщиков энергетических ресурсов, увеличивает использование местных видов топлива. В качестве альтернативной энергетики в Беларуси используются гидроэлектростанции (ГЭС).

Гидроэнергетика – это наиболее развитая на сегодняшний день область энергетики на возобновляемых ресурсах, использующая энергию падающей воды, волн и приливов. Вся территория Белоруссии поделена речными бассейнами трех рек: Немана, Западной Двины и Днепра. Реки равнинные, но кое-где текут в достаточно высоких берегах и даже образуют небольшие пороги. Территория Беларуси служит водоразделом для бассейнов Балтийского и Черного морей. Примерно 55 % речного стока приходится на реки бассейна Черного моря и 45 % – Балтийского [1].

На территории страны протекает семь крупных рек протяженностью более 500 км, шесть из которых (кроме Березины) являются трансграничными. Средних рек протяженностью 101–500 км насчитывается 41, а их общая длина составляет 6,7 тыс. км. В Беларуси преобладают малые реки протяженностью от 5 до 10 км и ручьи, которых насчитывается около 19,3 тыс., а их общая длина составляет 48,8 тыс. км. Всего на территории страны 20,8 тыс. рек и ручьев суммарной длиной свыше 90,6 тыс. км. Основным источником водных ресурсов Беларуси являются средние и крупные реки, вдоль которых концентрируется население и промышленное производство.

На территории страны находится около 10,8 тыс. озер, в которых сосредоточено около 9 куб. км воды. Озер площадью более 100 га всего 2,2 %. Помимо естественных водоемов и водотоков на территории страны повсеместно распространены родники. Кроме того, Беларусь обладает значительными естественными и прогнозными эксплуатационными ресурсами подземных вод – как пресных, так и минеральных [2].

Учитывая потенциал рек, в стране развивается гидроэнергетика. Территория Беларуси в основном равнинная, поэтому используются только низконапорные гидротехнические сооружения. Гидротехнический потенциал рек оценивается в 1,3 млрд кВт в год. Это меньше, чем в Литве – 1,5, Польше – 7,0, Украине – 19,0 млрд кВт в год. Гидроэнергетический потенциал республики освоен лишь на 3 %. На Днепре и в бассейне Припяти возможности строительства гидроэлектростанций ограничены из-за огромных площадей затопляемых земель при создании водохранилищ. В бассейнах Западной Двины и Немана имеются условия для создания достаточно экономичных и экологически безопасных гидроэлектростанций. В перспективе гидроэнергетика в Беларуси может развиваться по линии строительства гидроузлов комплексного пользования: для регулирования стока при одновременном использовании их в целях энергетики, водообеспечения, водного

транспорта, мелиорации и охраны вод. Развитие внутреннего и международного речного судоходства в Беларуси ограничено, несмотря на то, что протяженность реки составляет 2,5 тыс. км. Не все реки являются судоходными. К тому же реки расположены большей частью по периметру страны. Развитие судоходства зависит от годового водного режима рек. Высота весеннего половодья над обычным уровнем воды на крупных реках достигает 8,6–12,8 м. На средних и малых реках высота половодья примерно вдвое ниже. Половодье продолжается 30–120 суток [3].

Учитывая отсутствие у республики собственных топливно-энергетических ресурсов (нефти, газа, угля) и соответственно зависимость от их импорта, руководство страны пытается максимально использовать все возможности для выработки электроэнергии, в том числе и имеющиеся гидроэнергетические ресурсы.

Запасы гидроэнергоресурсов Республики Беларусь составляет теоретический потенциал ее рек – около 7,5 млрд кВт часов в средний по водности год, а его часть, которая путем выработки электроэнергии на ГЭС или иными техническими средствами может быть использована (технический потенциал), – 2,5–3,0 млрд кВт·ч/год [4].

Гидроэлектростанция (ГЭС) – электростанция, в качестве источника энергии использующая энергию водного потока. Гидроэлектростанции обычно строят на реках, сооружая плотины и водохранилища. Для эффективного производства электроэнергии на ГЭС необходимы 2 основных фактора: круглогодичная гарантированная обеспеченность водой и наличие больших уклонов реки. Каков же принцип работы ГЭС?

Цепь гидротехнических сооружений обеспечивает необходимый напор воды, поступающей на лопасти гидротурбины, которая приводит в действие генераторы, вырабатывающие электроэнергию. Необходимый напор воды формируется строительством плотины, что приводит к концентрации реки в определенном месте, или естественным током воды (деривацией), или использованием совместно и плотины, и деривации. В здании ГЭС располагается все энергетическое оборудование. В машинном зале расположены гидроагрегаты, непосредственно преобразующие энергию тока воды в электрическую энергию, и дополнительное оборудование: устройства управления и контроля над работой ГЭС, трансформаторная станция, распределительные устройства и многое другое. Преимущества данной конструкции состоят в том, что данная конструкция проста в эксплуатации, не загрязняет окружающую среду, а также присутствует постоянно возобновляемый запас энергии.

Важным преимуществом гидроэнергетики является высокая маневренность гидроагрегатов, вывод которых на полную мощность осуществляется за время, меньшее одной минуты. Поэтому ГЭС в энергосистеме обычно используют для выработки электроэнергии, обеспечивающей покрытие графика нагрузки, особенно в его пиковой части, регулирования частоты электрического тока и в качестве резерва [5].

В послевоенные годы средняя мощность строившихся ГЭС из года в год увеличивалась: от 30 кВт установленной на одной ГЭС мощности, вводимой в эксплуатацию в 1945–1949 гг., до 120 кВт. В 1953 г. была введена в эксплуатацию ныне действующая крупнейшая в Беларуси Осиповичская ГЭС на р. Свислочь мощностью 2175 кВт. Всего в республике в начале 1960-х годов действовало около 180 ГЭС общей мощностью 21 МВт с годовой выработкой электроэнергии в средний по водности год 88 млн кВт·ч. Сельское хозяйство Беларуси в 1959 г. получило от ГЭС около 20 % всей потребленной им электроэнергии. Однако дальнейшее развитие малой гидроэнергетики прекратилось в конце 1950-х годов в основном из-за представившейся возможности подключения сельских потребителей электроэнергии к государственным энергосистемам, а большинство построенных малых ГЭС затем было выведено из эксплуатации или разрушено, в основном из числа мелких мощностью до 100 кВт, принадлежавших колхозам. В настоящее время в Республике Беларусь действует два десятка малых ГЭС, большая часть из которых восстановлена, начиная с 1992 года, из числа ранее заброшенных [6].

ГЭС «Гезгалы» установленной мощностью 620 кВт стоит на реке Молчадь, которая была построена и введена в эксплуатацию 9 мая 1960 года. Данная гидроэлектростанция относится к русловому типу. В состав гидротехнических сооружений ГЭС входят: водосбросное сооружение; земляная плотина; здание электростанции, а также донный водовыпуск водохранилища. На мини-ГЭС «Гезгалы» установлены два синхронных генератора мощностью 310 кВт марки ВРСП 213/24-28 производства г. Лысьва. Объем водохранилища Гезгальской мини-ГЭС составляет 122 га. Турбинные камеры оснащены поворотной лопастью турбинами с частотой вращения 214 об./мин. при напоре воды 4,8 м.

В настоящее время в Объединенной энергетической сети Беларуси эксплуатируется 51 ГЭС суммарной установленной мощностью 95,8 МВт. В 2017 году введены в эксплуатацию Полоцкая ГЭС установленной мощностью 21,66 МВт и Витебская ГЭС установленной мощностью 40 МВт. Прорабатывается вопрос реализации инвестиционного проекта по строительству Бешенковичской ГЭС мощностью 33 МВт на реке Западная Двина. Уже сейчас обсуждаются различные варианты строительства больших ГЭС. В частности, согласно одному из проектов, Неманская ГЭС в Гродно сможет вырабатывать 81,2 млн кВт·ч электроэнергии (мощность 17 МВт), что составляет примерно 15% всей энергии, которую потребляет Гродненская область. А водохранилище при станции позволит увеличить запасы рыбы и объемы пресной воды.

Однако окончательное решение о строительстве этой и других станций пока не принято.



Рисунок 1 – Изображение мини-ГЭС «Гезгалы»

Из таблицы 1 следует, что большее развитие гидроэнергетики предусматривается в Витебской, Гродненской и Могилевской областях, что обусловлено нахождением в их границах участков рек бассейнов Западной Двины, Немана и Днепра, представляющих в Беларуси наибольшую энергетическую ценность.

Таблица 1 – Мощности ГЭС по областям и годам

Область	Установленная мощность (МВт)					
	2003 г.	2006 г.	2009 г.	2013 г.	2016 г.	2020 г.
Брестская	0,10	0,52	0,79	1,08	1,37	1,37
Витебская	2,09	30,49	60,99	110,99	139,99	144,89
Гродненская	2,42	19,42	39,92	39,92	39,92	39,92
Минская	2,04	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24
Могилевская	4,05	4,33	4,67	30,67	30,67	30,67
Всего	10,70	57,00	108,61	184,90	214,19	219,09

Актуальными проблемами развития гидроэнергетики являются:

- значительные объемы затопляемой территории при сооружении плотин ГЭС на крупных реках, и как следствие, значительные объемы компенсационных мероприятий;
- недостаточное использование гидроэнергетического потенциала средних и малых рек.

Пути решения:

- переоценка гидроэнергетического потенциала средних и малых рек Беларуси с определением кадастровых графиков этих рек с основными их морфометрическими, гидрологическими и гидроэнергетическими характеристиками;
- определение оптимальных напоров для перспективных площадок размещения ГЭС с учетом минимизации компенсационных мероприятий по снижению негативных последствий затопления прибрежных территорий при размещении ГЭС;
- определение экономической эффективности при использовании перспективных площадок при размещении ГЭС;
- сооружение новых ГЭС, реконструкции и модернизации малых ГЭС.

На фоне событий в странах ближнего и дальнего зарубежья нам просто необходимо осваивать новые виды энергоресурсов, которые в дальнейшем могли бы обеспечить республику более дешевыми энергоносителями. Так как нашу республику называют краем рек и озер, развитие гидроэнергетики в нашей республике, в частности мини-ГЭС, можно считать перспективным и вполне рентабельным.

Список литературы

1. Экология и экологическая безопасность [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ekolog.org/books/32/3_2_2.htm. – Дата доступа: 22.02.2022.
2. Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pravo.by/novosti/obshchestvenno-politicheskie-i-v-oblasti-prava/2020/mart/47888/>. – Дата доступа: 22.02.2022.

3. Гидроэнергетический потенциал Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pogovorim.by/966-gidroenergeticheskiy-potencial-respubliki.html>. – Дата доступа: 22.02.2022.

4. Обухов, С. Г. Микрогидроэлектростанции : курс лекций по магистерской программе «Возобновляемые источники энергии» / С. Г. Обухов. – Томск : Томск. политехн. ун-т, 2009. – 63 с.

5. Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент / сост. А. Б. Сухоцкий. – Минск : БГТУ, 2018. – 74 с.

6. Belarus Sustainable Energy Vision [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.inforse.org/europe/pdfs/NGO-Energy3.pdf>. – Дата доступа: 22.02.2022.

Belarus as a state relies on the development of alternative energy, expands the range of suppliers of energy resources, increases the use of local fuels. Hydroelectric power plants (HPPs) are used as alternative energy in Belarus.

Галимов Егор Олегович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, galimov.egor.2001@mail.ru.

Научный руководитель – Волчок Валерий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, wwa@grsu.by.

УДК 629.3.066

В. А. ГРЕМЧУК, О. А. МАЛЫЦЕВ

АВТОТРАНСФОРМАТОР. УСТРОЙСТВО, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Автотрансформатор – один из вариантов трансформаторов. Ключевым отличием от обычных трансформаторов является наличие только одной обмотки для каждой из фаз, то есть вход и выход имеют не только магнитную, но и гальваническую связь. В условиях малых коэффициентов трансформации, в пределах одной-двух единиц, любые автотрансформаторы показывают более высокую эффективность по сравнению с трансформаторными устройствами. Кроме всего прочего, такие приборы более легкие по весу и доступнее по стоимости, чем традиционные трансформаторы многообмоточного типа.

Применение автотрансформатора:

- Металлургия. Настройки защитной аппаратуры станков и трансформаторных подстанций.
- Коммунальное хозяйство. Контроль напряжения в сети для приборов, чувствительных к перепадам напряжения в сети: телевизоры, радиоприемники и т. д.
- Химическая и нефтяная промышленность. Пуск электродвигателей станков и управления скоростью вращения дополнительных приводов.
- Учебные заведения. Применение в лабораторных работах как регулируемого источника напряжения.

Классические трансформаторы обладают не связанными друг с другом первичными и вторичными обмотками, поэтому процесс передачи энергии в таких устройствах обусловлен наличием магнитного поля. На объединенной обмотке автотрансформатора располагается три вывода или более, при подключении к которым есть возможность получить различные показатели уровня напряжения.

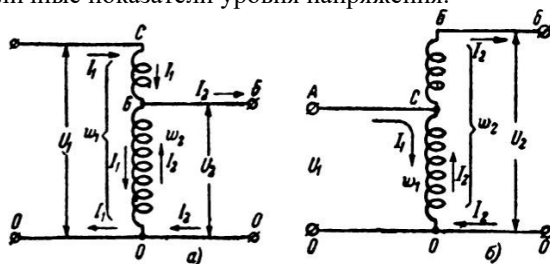


Рисунок 1 – Схема автотрансформатора

На рисунке 1а изображен трансформатор, первичная СБ и вторичная БО обмотки которого соединены между собой последовательно. При подключении источника тока переменного напряжения к точкам АО напряжение распределяется между всеми витками обмоток СБ и БО, и напряжение между точками Б и О будет равно напряжению одного витка, умноженному на число витков между этими точками. Очевидно, что напряжение между витками БО будет меньше напряжения между точками СО. Такой автотрансформатор будет понижающим. При присоединении нагрузки к точкам БО в ней будет протекать ток I_2 , который обтекает лишь эту часть обмотки, как указано на рисунке 1. Однако в то же время по этой части обмотки будет течь питающий трансформатор ток I_1 . Из рисунка видно, что токи между точками БО направлены друг другу навстречу и, следовательно, по обмотке БО в действительности будет проходить ток I , равный разности токов I_1 и I_2 , т. е.

$I = I_2 - I_1$. Это позволяет выполнять обмотку между точками БО из провода меньшего сечения, чем обмотку части СВ, что приводит, в свою очередь, к значительной экономии меди по сравнению с обычным двухобмоточным трансформатором, где сетевая (первичная) обмотка вся должна быть рассчитана на ток I_1 . За счет уменьшения потерь в меди автотрансформатора КПД его несколько больше, чем КПД трансформатора той же мощности. Автотрансформаторы могут быть и повышающими [1]. В этом случае напряжение сети подводится к части обмотки, а с концов всей обмотки снимается повышенное напряжение.

В зависимости от того в каких сетях (однофазных или трёхфазных) требуется изменить напряжение, используют соответствующий тип автотрансформаторов. Они бывают однофазными либо трёхфазными. Для трансформации трехфазного тока часто устанавливают три автотрансформатора, предназначенных для работы в однофазных сетях, соединив их выводы треугольником или звездой [2].

В сети автотрансформаторы могут работать в нескольких режимах: автотрансформаторный, трансформаторный и комбинированный (трансформаторно-автотрансформаторный). Рассмотрим автотрансформатор с 3 обмотками – высшего напряжения ВН, среднего напряжения СН и низшего напряжения НН. В автотрансформаторном режиме автотрансформатор подключен к источнику питания через обмотку высшего напряжения, а потребители подключены к обмотке среднего напряжения, обмотка низшего напряжения отключена, т. е. мощность в автотрансформаторном режиме передается от обмотки ВН к обмотке СН при отключенной обмотке НН.

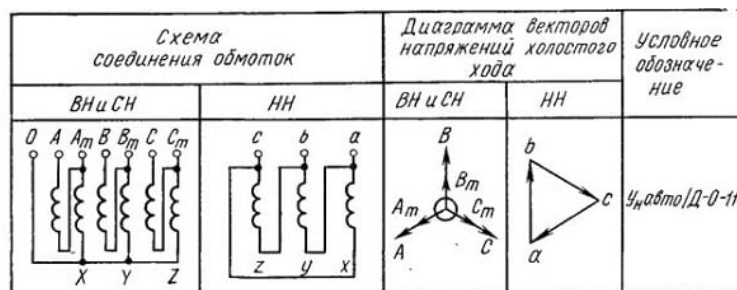


Рисунок 2 – Схемы соединения автотрансформаторов в трёхфазной сети

В сети автотрансформаторы могут работать в нескольких режимах: автотрансформаторный, трансформаторный и комбинированный (трансформаторно-автотрансформаторный). Рассмотрим автотрансформатор с 3 обмотками – высшего напряжения ВН, среднего напряжения СН и низшего напряжения НН. В автотрансформаторном режиме автотрансформатор подключен к источнику питания через обмотку высшего напряжения, а потребители подключены к обмотке среднего напряжения, обмотка низшего напряжения отключена, т. е. мощность в автотрансформаторном режиме передается от обмотки ВН к обмотке СН при отключенной обмотке НН. В трансформаторном режиме мощность передается от обмотки ВН к обмотке НН при отключенной обмотке СН. Энергия из сети высшего напряжения передается при трансформаторном режиме только в сеть низшего электромагнитным путем. В комбинированном режиме мощность передается от обмотки ВН к обмоткам СН и НН [3].

Существуют типы лабораторных автотрансформаторов, позволяющих плавно изменять значения по выходному напряжению. Такой эффект достигается путём перемещения ползунка по поверхности открытой части однослойной обмотки, наподобие принципа работы реостата. Витки проволоки наносятся вокруг кольцеобразного ферромагнитного сердечника, по окружности которого и перемещается контактный ползунок. Автотрансформаторы подобного типа массово применялись на просторах СССР в эпоху массового распространения ламповых телевизоров. Тогда напряжение сетей было нестабильно, что вызывало искажения изображений [4].

В трехфазных сетях применяются автотрансформаторы двухобмоточные и трехобмоточные. Трёхфазные высоковольтные трансформаторы используются в высоковольтных электрических сетях. Трёхфазные автотрансформаторы в трехфазных цепях обычно соединяются звездой с выведенной нейтральной точкой (рисунок 2) [4].

В заключение можно сделать вывод, что автотрансформаторы – устройства, широко используемые в различных областях: начиная школами и заканчивая высоковольтными электростанциями. Силовые автотрансформаторы имеют массу достоинств по сравнению с обычными силовыми трансформаторами при равных условиях. Автотрансформаторы имеют меньший вес, больший КПД, требуют меньше затрат при починке, а также позволяют регулировать напряжение, что активно применяется в лабораториях (ЛАТР) и ранее широко применялось в быту. Однако стоит учитывать, что автотрансформатор не имеет гальванической развязки с сетью, поэтому они менее безопасны, чем обычные трансформаторы, в которых между обмотками нет гальванической связи. Поэтому при работе с автотрансформаторами, особенно с повышающими, требуется строгое соблюдение техники безопасности.

Список литературы

1. Казанский, Н. В. Автотрансформатор / Н. В. Казанский. – М. : Гос. энергетическое изд-во, 1950. – 20 с.
2. Малинин, Р. М. Трансформаторы и автотрансформаторы питания / Р. М. Малинин. – М. : Гос. энергетическое изд-во, 1963. – 43 с.
3. О трансформаторе.ru [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://otransformatore.ru/raznoe/avtotransformator-ustrojstvo-shema-prinsip-dejstviya/>. – Дата доступа: 06.03.2022.
4. Трансформатор 220 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://transformator220.ru/harakteristiki/avtotransformatory/avtotransformatory.html>. – Дата доступа: 07.03.2022.

An autotransformer is one of the variants of transformers. The key difference from conventional transformers is the presence of only one winding for each of the phases, that is, the input and output have not only magnetic, but also galvanic coupling. In conditions of small transformation coefficients, within one or two units, any autotransformers show higher efficiency compared to transformer devices. Among other things, such devices are lighter in weight and more affordable than traditional multi-winding transformers.

Гремчук Владислав Алексеевич, студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, vlad.gremchuk@mail.ru.

Мальцев Олег Андреевич, студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, as2241466@gmail.com.

Научный руководитель – *Комар Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, v.komar@grsu.by.

УДК 378.016.53

В. А. ГРЕМЧУК, Я. С. ЯРОШЕВИЧ, В. А. РАПЧИНСКИЙ, Н. И. МИРОН, А. А. БОЙКО

ПОСТАНОВКА ДЕМОНСТРАЦИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ШКОЛЕ НА ТЕМУ ОПТИЧЕСКИХ ИЛЛЮЗИЙ

Представлена оригинальная постановка физических опытов по оптическим иллюзиям, которые наглядно показывают физическую природу света и демонстрируют основные законы физики.

Важнейшим элементом учебного процесса по курсу оптики в школе является демонстрационный эксперимент, обеспечивающий формирование у школьников навыков самостоятельного экспериментального исследования физических явлений и процессов. Демонстрационные опыты способствуют созданию физических понятий. Демонстрационные опыты по оптике в средней школе весьма многочисленны и разнообразны. При этом на одну и ту же тему, кроме основных, необходимых демонстраций, можно показать несколько возможных вариантов опытов, по-разному решающих поставленную задачу. Данная работа посвящена одной из самых загадочных тем в оптике «Оптические иллюзии» и рассматривает теоретические вопросы методики и техники постановки соответствующего демонстрационного эксперимента.

Актуальность работы связана с тем, что темы, связанные с оптическими иллюзиями, являются интересными и перспективными, поскольку с оптическими иллюзиями мы встречаемся довольно часто в повседневной жизни. Поэтому целью работы являлось разработка методических рекомендаций в виде презентаций и видеороликов с оригинальными постановками экспериментов с оптическими иллюзиями для школьников и студентов, наглядно показывающих виды иллюзий, а также демонстрирующие законы оптики, объясняющие оптические иллюзии.

В работе рассмотрены следующие эксперименты: преломление луча в растворе с градиентом концентрации и мираж свечи.

Опыт «Преломление луча в растворе с градиентом концентрации».

Для проведения эксперимента необходимо следующее:

- прозрачная емкость с водой,
- поваренная соль,
- лазер.

Суть опыта состоит в том, что в емкость добавляется пресная вода и насыщенный водный раствор поваренной соли. Вследствие диффузионных процессов в растворе возникает градиент концентрации. Если направить луч лазера под углом к торцу емкости, то будет наблюдаться эффект «искривления» хода лазерного луча, показанного на рисунке 1.

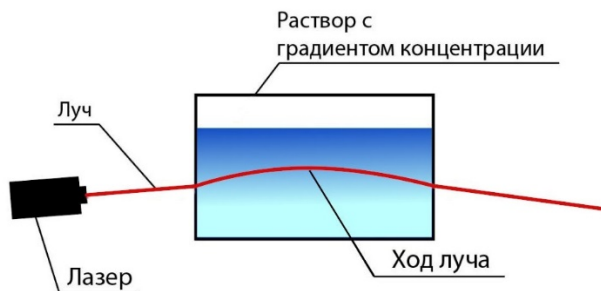


Рисунок 1 – Схема опыта «Преломление луча в растворе с градиентом концентрации»

Данная оптическая иллюзия объясняется с позиции разницы в показателях преломления различных слоев раствора, обусловленная наличием градиента концентрации соли в нем.

Опыт «Мираж свечи».

Для постановки данного эксперимента необходимо следующее: свеча, экран, источник света.

Свечу необходимо установить на подставку, зажечь ее. На свечу направляется свет от источника света. Оптической иллюзией будет возникать на экране позади свечи в виде движущейся тени, показанная на рисунке 2. Данная оптическая иллюзия возникает благодаря наличию градиента температур воздуха над горящей свечой, а также наличию конвекции.

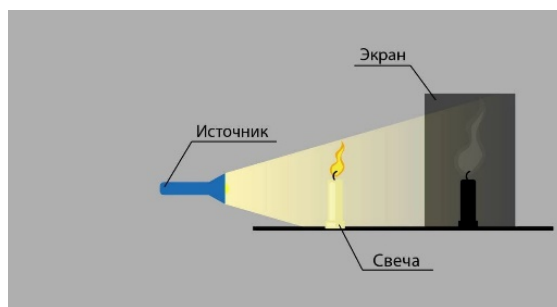


Рисунок 2 – Схема опыта «Мираж свечи»

Необходимо отметить, что приведенные демонстрационные эксперименты используются для объяснения эффекта миражей, в частности: нижний мираж, или же «озерный» мираж, и верхний мираж.

Нижний мираж – один из самых простых и часто встречаемых видов миражей. Такое явление наблюдается при большом вертикальном градиенте температуры (температура увеличивается сверху вниз) над нагретой ровной поверхностью. Чаще всего он наблюдается над асфальтированной дорогой или в пустынях, что создает иллюзию воды на поверхности.

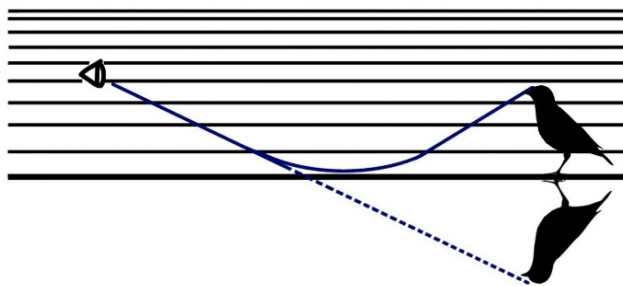


Рисунок 3 – Ход лучей при нижнем мираже

Верхний мираж наблюдается над холодной земной поверхностью, когда градиент температуры, в отличие от нижних миражей, направлен в обратную сторону, то есть с ростом высоты температура увеличивается. Верхние миражи встречаются не так часто, как нижние, однако они обладают большей стабильностью, нежели нижние. При наблюдении верхних миражей может казаться, что предмет летает или же находится гораздо ближе, чем на самом деле.

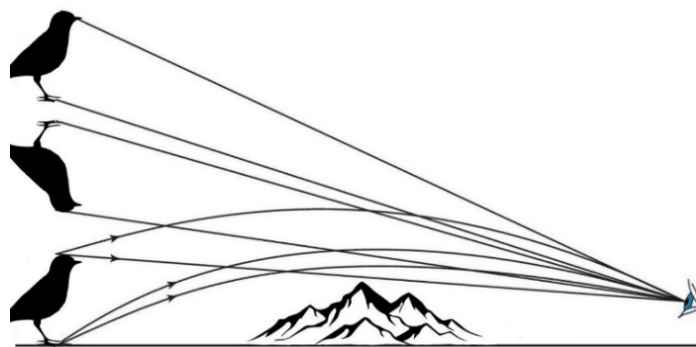


Рисунок 4 – Ход лучей при верхнем мираже

Таким образом, в работе представлена оригинальная постановка физических опытов по оптическим иллюзиям, которые наглядно показывают физическую природу света и демонстрируют основные законы физики.

Список литературы

1. Наркевич, И. И. Физика : учеб. / И. И. Наркевич, Э. И. Волмянский, С. И. Лобко. – Минск : Новое издание, 2004. – 680 с.
2. Оптика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://optika8.narod.ru/16.Miragi.htm>. – Дата доступа: 07.03.2022.
3. Тарасов, Л. В. Физика в природе / Л. В. Тарасов. – М., 1988. – 44 с.

The paper presents an original formulation of physical experiments on optical illusions, which clearly show the physical nature of light and demonstrate the basic laws of physics.

Гремчук Владислав Алексеевич, студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, vlad.gremchuk@mail.ru.

Ярошевич Янина Сергеевна, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, yanina_yaroshevich@mail.ru.

Рапчинский Владислав Александрович, учащийся 10 класса ФТ-1 ГУО «Лицей № 1 г. Гродно», Гродно, Республика Беларусь, vlad.rachinskiy@gmail.com.

Мирон Никита Иванович, учащийся 10 класса ФТ-1 ГУО «Лицей № 1 г. Гродно», Гродно, Республика Беларусь.

Бойко Ангелина Алексеевна, студентка 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, angelinabojko2017@gmail.com.

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

Маслов Игорь Сергеевич, директор ГУО «Лицей № 1 г. Гродно», Гродно, Республика Беларусь, imaslov@mail.ru.

УДК 536.5

В. С. ДАРИПАПА, П. Т. ДЕЖИЦ

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕРМОМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Разработана методика оценивания неопределенности результатов измерений при метрологической оценке термометров сопротивления.

Измерение температуры широко применяется в самых различных областях деятельности человека (науке, технике, промышленности, медицине, быту и т. д.). Среди средств измерения температуры одно из самых распространенных – термометр сопротивления (ТС). Поэтому весьма актуально совершенствование методов метрологической оценки термометров сопротивления [1].

Температура – скалярная физическая величина, характеризующая термодинамическую систему и количественно выражающая интуитивное понятие о разной степени нагретости тел.

Термометр сопротивления (рис. 1) – электронный компонент, датчик, предназначенный для измерения температуры. Принцип действия основан на зависимости электрического сопротивления металлов, сплавов и полупроводниковых материалов от температуры.

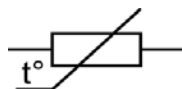


Рисунок 1 – Условное графическое обозначение термометра сопротивления

Выделяют два основных вида термометров сопротивления: металлические и полупроводниковые термометры сопротивления.

Преимущества термометров сопротивления:

1. Высокая точность измерений (обычно лучше $\pm 1^\circ\text{C}$), может достигать до $0,01^\circ\text{C}$.
2. Возможность исключения влияния изменения сопротивления линий связи на результат измерения при использовании 3- или 4-проводной схемы измерений.
3. Практически линейная характеристика.

Настоящая работа посвящена изучению методов метрологической оценки (поверки и калибровки) термометров сопротивления, а также созданию методики оценивания неопределенности результатов измерения при метрологической оценке термометров сопротивления.

При обработке результатов измерений при метрологической оценке термометров сопротивления руководствуются критерием годности термометра сопротивления. ТС считают годным и допускают к дальнейшей поверке в том случае, если отклонение его сопротивления от номинальной статической характеристики с учетом расширенной неопределенности результата измерения не превышает допуск соответствующего класса, т. е. выполнены одновременно два неравенства:

$$(R_k(t_x) - R_{НСХ}(t_x) + U) \frac{dR}{dt} \leq +t_x, \quad (1)$$

$$(R_k(t_x) - R_{НСХ}(t_x) - U) \frac{dR}{dt} \leq -t_x, \quad (2)$$

где $R_k(t_x)$ – среднее значение сопротивления поверяемого ТС, Ом;

t_x – средняя температура, измеренная эталонным ТС, $^\circ\text{C}$;

$R_{НСХ}(t_x)$ – значение сопротивления ТС по НСХ при температуре t_x , Ом;

U – расширенная неопределенность результата измерения сопротивления Т, Ом;

$\frac{dR}{dt}$

– чувствительность ТС по НСХ при температуре t_x , Ом/ $^\circ\text{C}$;

$\pm \Delta t_x$ – допуск ТС по ГОСТ Р 8.625 при температуре t_x , $^\circ\text{C}$.

Все основные характеристики неопределенности измерений приводятся в так называемом бюджете неопределенности (таблица 1).

Суммарную стандартную неопределенность измерения сопротивления ТС $u_c(R_k)$ оценивают по формуле:

$$u_c(R_k) = \sqrt{u^2(r_{lab2-j}) + u^2(\delta r_k) + u^2(\delta r_{rk}) + C_1^2 u^2(\delta t_{F1}) + C_2^2 u^2(\delta t_{F2})} \quad (3)$$

Таблица 1 – Бюджет неопределённости измерения сопротивления градуируемого термометра сопротивления

Источник неопределенности	Оценка стандартной неопределенности, тип, распределение, методика расчета	Коэффициент влияния	Вклад в суммарную стандартную неопределенность
Случайные эффекты при измерении	Тип А, нормальное распределение, $u(r_{lab2-j})$	1	$u(r_{lab2-j})$
Поверка измерительной установки	Тип В, нормальное распределение, $u(\delta r_k)$	1	$u(\delta r_k)$
Разрешающая способность измерительной установки	Тип В, равномерное распределение, $u(\delta r_{rk})$	1	$u(\delta r_{rk})$
Перепад температур по вертикальной оси рабочего объема	Тип В, равномерное распределение, $u(\delta t_{F1})$	C_1	$C_1 u(\delta t_{F1})$
Перепад температур по горизонтальной оси рабочего объема (либо между каналами в блоке)	Тип В, равномерное распределение, $u(\delta t_{F2})$	C_2	$C_2 u(\delta t_{F2})$

Список литературы

1. Об обеспечении единства измерений : Закон Респ. Беларусь, 11 нояб. 2019 г., № 254-З // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2019. – 2/2692.
2. Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Методика поверки. ГОСТ Р 8.624-2006 ГСИ. – Введ. 27.12.2007. – М. : ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» и «ВНИИМС», 2007.

A method for estimating the uncertainty of measurement results in the metrological evaluation of resistance thermometers has been developed.

Дарипапа Владислав Сергеевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, v.daripapa2k@gmail.com.

Дежиц Павел Тадеушевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, Matewcraft200144@mail.ru.

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

УДК 531.75

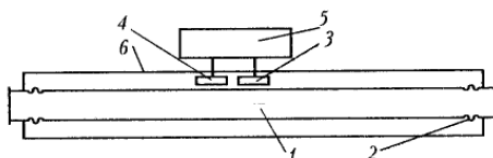
П. Т. ДЕЖИЦ, В. С. ДАРИПАПА

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ

Предложена методика обработки результатов измерений при метрологической оценке средств измерения плотности.

Плотность любого материала, независимо от его агрегатного состояния, является одним из важнейших физических свойств. Средства и методы измерения плотности широко используются в науке, технике и производстве, в том числе при автоматизации производственных процессов. Существуют ручные и автоматические устройства измерения плотности. Устройства автоматического измерения плотности – очень важный элемент в комплексной автоматизации большого количества процессов во многих отраслях промышленности. Мониторинг и оперативное управление испарителями, абсорберами, дистилляционными, ректификационными и другими устройствами требует непрерывного измерения плотности. Определение плотности веществ также облегчает вычисления, связанные с вычислением их массы. Учет количества материала в объемном выражении вызывает неудобства, поскольку объем вещества (в основном жидкости) зависит от температуры. Зная объем и плотность при приеме, дозировании и учете материала, можно выразить его количество в единицах массы. Иногда измеряют плотность технологической жидкости для определения концентрации растворенного вещества. Данные устройства применяются в химической, нефтеперерабатывающей, пищевой и иных отраслях промышленности.

Выделяют следующие методы измерения плотности вещества: поплавковый, гидростатический, весовой, вибрационный, ультразвуковой, радиоизотопный. На большинстве производств применяется вибрационный метод. Данный метод получил такую популярность благодаря своей простоте, надежности и точности. Вибрационный метод основан на определении резонансной частоты тела (вещества, материала), взаимодействующего с измеряемой средой (рис. 1).



1 – резонатор, 2 – сильфон, 3 – возбуждающая катушка (электромагнит),
4 – приёмная катушка, 5 – электронный преобразователь, 6 – корпус

Рисунок 1 – Схема вибрационного плотномера с однотрубным резонатором

Резонатор 1 выполняется в виде трубки, которая через упругие элементы (сильфоны) 2 соединяется с подводящими и отводящими трубопроводами. Труба изготавливается из специального сплава с низким коэффициентом термического расширения. Внутренняя поверхность для исключения отложений отполирована. Частота колебаний трубки измеряется с помощью приемной катушки 4 и подаётся в электронный преобразователь 5 [1]. Для обеспечения точности измерений плотности необходимо совершенствовать методы метрологической оценки плотномеров.

В настоящей работе рассмотрены методы метрологической оценки (поверки и калибровки) плотномеров и предложена методика обработки результатов измерений при этой оценке.

Абсолютную погрешность вибрационного проточного плотномера (ПП) при каждом измерении вычисляют по формуле (1) [2].

$$\Delta\rho = \rho_{t,p} - \rho_{пприв} \quad (1)$$

где $\rho_{t,p}$ – плотность, измеренная ПП при температуре и давлении поверки, кг/м³.

Если температура продукта в эталонном СИ отличается от температуры продукта в ПП более чем на 0,1 °С, значение плотности ρ_n приводят к температуре продукта в ПП по формуле:

$$\rho_{пприв} = \rho_{15} \cdot CT_{пп} \cdot CPL_{пп} \quad (2)$$

где $CT_{пп}$ – коэффициент, учитывающий влияние температуры на объем продукта, определенный для $t_{пп}$ и ρ_{15} ; $CPL_{пп}$ – коэффициент, учитывающий влияние давления на объем продукта, определенный для $t_{пп}$, $\rho_{пп}$ и ρ_{15} ; ρ_{15} – значение плотности продукта при $t = 15$ °С и $P = 0$ МПа, кг/м³.

В качестве эталонного СИ применяют пикнометр. При прямом методе взвешивания результат измерений плотности одним из пикнометров $\rho_{1(2)}$, кг/м, вычисляют по формуле:

$$\rho_{1(2)} = \frac{[W_3 - W_n] \left[1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \right] + \rho_a \cdot V_{tp}}{V_{tp}} \times 10^3 \quad (3)$$

где W_3 и W_n – средние арифметические значения показаний весов при взвешиваниях заполненного и пустого пикнометра соответственно, г; ρ_a – плотность атмосферного воздуха, г/см³; ρ_r – плотность материала гирь, г/см³; P_a – барометрическое давление, гПа; V_{tp} – вместимость пикнометра, приведенная к условиям отбора пробы продукта, см³.

При взвешиваниях пикнометров методом сравнения с известной массой (гирь) результат измерений плотности $\rho_{1(2)}$, вычисляют по формуле:

$$\rho_{1(2)} = \frac{\left[\frac{W_3}{W_{Г3}} M_3 - \frac{W_{П}}{W_{П}} M_{П} \right] \left[\frac{1 - \frac{0,0012}{8,0}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}} \right] + \rho_a \cdot V_{tp}}{V_{tp}} \cdot 10^3 \quad (4)$$

где $W_{Г3}$ и $W_{П}$ – средние арифметические значения показаний весов при взвешиваниях гирь, замещающих массу заполненного и пустого пикнометра, соответственно, г; M_3 и $M_{П}$ – известная условная масса гирь (из свидетельств о поверке), замещающих массу заполненного и пустого пикнометра, соответственно, г.

Далее вычисляют результат измерений плотности продукта вторым пикнометром по формуле (4) или (5). Если разность результатов измерений плотности продукта первым и вторым пикнометрами не превышает 0,20 кг/м³, результаты считают достоверными. В противном случае повторяют измерения.

Затем вычисляют среднее арифметическое значение этих результатов измерений плотности по формуле:

$$\rho_n = \frac{1}{2} \times (\rho_1 + \rho_2), \quad (5)$$

где ρ_n – результат измерения плотности эталонным СИ, кг/м³; ρ_1, ρ_2 – результаты измерений плотности первым и вторым пикнометрами соответственно, кг/м³.

Список литературы

1. Автоматизированный учет нефти и нефтепродуктов при добыче, транспорте и переработке : моногр. / А. Ш. Фатхутдинов [и др.]. – М. : Недра, 2002. – 416 с.
2. Преобразователи плотности поточные. Методика поверки на месте эксплуатации : МИ 2816–2012. – Введ. 06.12.2012. – М. : Гос. науч. метролог. центр ФГУП «Всерос. науч.-исслед. ин-т метрологии им. Д. И. Менделеева».

A method for processing the results of measurements in the metrological evaluation of density measuring instruments is proposed.

Дежниц Павел Тадеушевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, Matecraft200144@mail.ru.

Дарипара Владислав Сергеевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, v.daripara2k@gmail.com.

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

М. А. ДУБРОВНИК

ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА СОЛНЕЧНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

В настоящее время во всем мире увеличивается доля использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергетическом балансе стран. Для Беларуси эта тема также актуальна, так как способствует сокращению использования ископаемого топлива для отопления зданий, а также сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу. Поэтому разработка систем теплоснабжения зданий с использованием ВИЭ является перспективным направлением, в котором необходимы исследования.

Одной из перспективных областей применения ВИЭ является использование тепловых насосов. Тепловой насос можно рассматривать как энергосберегающую систему, благодаря которой возможно получение тепла для нужд системы отопления и ГВС за счет использования низкопотенциальных источников энергии.

В данной статье рассмотрим совместное использование низкотемпературных солнечных коллекторов и теплового насоса в системе солнечного теплоснабжения, комбинация которых позволяет обеспечить высокую энергоэффективность и устойчивую работу системы за весь период летних и переходных месяцев года. Основной принцип геотермального теплового насоса заключается в возможности отбора тепла из грунта и передачи теплоносителю. С применением грунтовых аккумуляторов тепловой энергии такие системы могут конкурировать и с традиционными источниками тепла.

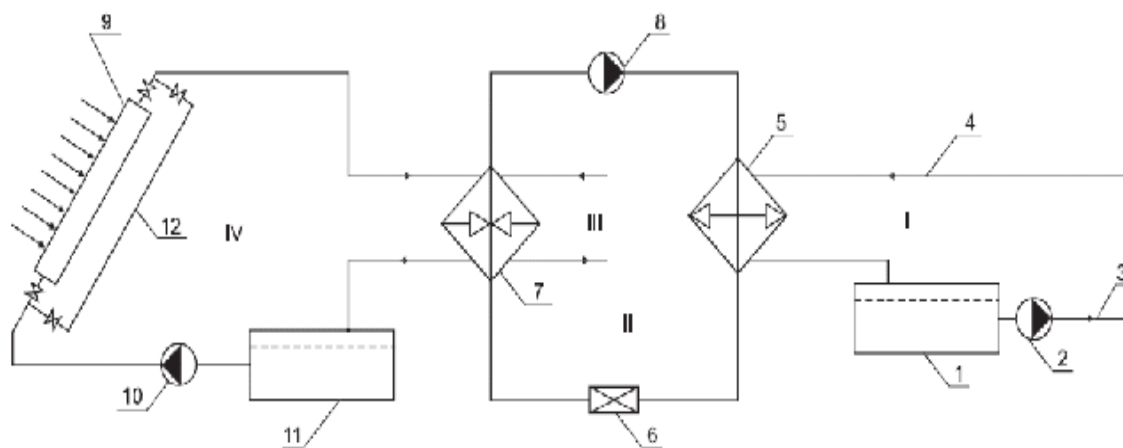
Принцип работы гибридной системы солнечного теплоснабжения.

Нагрев воды с использованием только солнечных коллекторов (СК) высокоэффективен только днем (особенно солнечным). Весной или осенью, а также в летние пасмурные дни, когда есть большая потребность в горячей воде, а солнечной инсоляции не хватает, в систему добавляется геотермальный тепловой насос (ТН), с помощью которого происходит нагрев воды даже в ночное время. Вследствие чего появляется сбалансированность в горячем водоснабжении при минимальных затратах на электроэнергию.

Принципиальная схема системы теплоснабжения изложена на рисунке 1 [1].

Такая система включает 4 контура:

- контур циркуляции теплоносителя;
- контур циркуляции хладагента в ТН;
- контур подачи воды из грунтового аккумулятора в испаритель ТН;
- система утилизации солнечной энергии с солнечных коллекторов.



- 1 – бак-аккумулятор; 2 – циркуляционный насос; 3, 4 – подающий и обратный трубопровод;
 5 – конденсатор теплового насоса (ТН); 6 – дроссель;
 7 – испаритель; 8 – компрессор;
 9 – солнечные коллекторы (СК); 10 – тепловой насос;
 11 – бак-аккумулятор низкопотенциального источника тепла;
 12 – обводной байпасный трубопровод

Рисунок 1 – Принципиальная схема теплоснабжения солнечных коллекторов с тепловым насосом

Первый контур предполагает наличие бак-аккумулятора 1, циркуляционного насоса 2, подающего 3 и обратного 4 теплопровода. Теплопроводы соединены с внутренней системой жилых зданий микрорайона и конденсатором 5 ТН второго контура.

Во втором контуре источника тепла в состав входит ТН, помимо конденсатора 5, находится дроссель 6, испаритель 7 и компрессор 8. Четвертый контур – это система утилизации солнечной энергии. Он включает в себя: низкотемпературные СК 9, насос 10 и бак-аккумулятор 11 низкопотенциального источника тепла, обводной байпасным трубопровод 12 со своей арматурой.

Принцип работы системы теплоснабжения следующий. При поглощении солнечного излучения СК, теплота передается теплоносителю (обычно вода или рассол (NaCl)). Когда теплоноситель нагрелся, он поступает в испаритель ТН для охлаждения и возвращается в бак-аккумулятор для повторного нагрева. Ночью и в пасмурные дни вода или рассол проходит через байпасную линию, обходя солнечные коллекторы, для сведения тепловых потерь к минимуму. При эксплуатации грунтового аккумулятора (на схеме не показано) вместо аккумулятора 11 данная система может работать зимой с достаточной высотой КПД (подача воды из грунтового аккумулятора в испаритель).

За счет солнечного тепла вырабатываемого низкотемпературными СК и передаваемого в испаритель 7, хладагент испаряется, а пар поступает в компрессор 8. Благодаря сжатым парам хладагента (температура 80–85 °С) происходит нагрев теплоносителя в первом контуре. К примеру, нагретый до 65 °С теплоноситель, поступает в бак-аккумулятор 1 и далее подается к жилым зданиям.

Поскольку температура теплоносителя близка к температуре окружающей среды, значительно снижаются потери тепла с поверхностей солнечных коллекторов. Это приводит к увеличению энергоэффективности системы солнечного теплоснабжения. Также уменьшается площадь поверхности СК, повышается их надежность. Потери тепла от тепловых труб при транспортировке теплоносителя снижаются, однако увеличивается необходимая площадь поверхности отопительных приборов с естественной циркуляцией воздуха, устанавливаемых в помещениях здания. Для предотвращения этого рекомендуется использовать фанкойлы [1]. Фанкойл представляет собой устройство, предназначенное для охлаждения или нагрева воздуха за счет циркулирующего через теплообменник тепло-хладоносителя [2].

Преимущества гибридной системы солнечного теплоснабжения:

- экологичность (отсутствие выбросов, отходов);
- автономность и независимость от централизованной сети и тарифов;
- легкость внедрения в уже существующую систему отопления;
- длительный срок службы оборудования (до 30 лет);
- бесперебойная работа теплового насоса при температуре –15 °С;
- тепловые насосы универсальны. зимой они обеспечивают тепло, жарким летом выполняют функцию кондиционирования.

Недостатки:

- стоимость (солнечные коллекторы и тепловой насос достаточно дорогое оборудование);
- зависимость от погодных условий солнечных коллекторов;
- окупаемость (от 8 лет) [3–4].

Таким образом, рассмотрен принцип работы, преимущества и недостатки гибридной системы солнечного теплоснабжения. Данная система позволяет быть независимой от центральной сети, а также от роста цен на теплотребление. В очень жаркое лето избыток солнечной энергии можно продавать государству, что ведёт к экономической прибыли. Существенный недостаток – стоимость системы и длительный срок окупаемости.

Список литературы

1. Перспективы совместного применения тепловых насосов и низкотемпературных солнечных коллекторов [Электронный ресурс] // energosovet.ru. – Режим доступа: http://www.energosovet.ru/bul_stat.php?idd=59. – Дата доступа: 28.02.2022.
2. Фанкойл, принцип работы [Электронный ресурс] // dantex.ru. – Режим доступа: <https://dantex.ru/articles/chto-takoe-fankoyl>. – Дата доступа: 28.02.2022.
3. Тепловые насосы [Электронный ресурс] // dom-i-remont. – Режим доступа: <https://dom-i-remont.info/posts/obshhie-voprosy/teplovye-nasosy-nedostatki-preimushhestva-problemy-i-vygody-vidy-tn>. – Дата доступа: 28.02.2022.
4. Солнечные коллекторы [Электронный ресурс] // ast75.ru. – Режим доступа: <https://ast75.ru/statiya.php?id=30>. – Дата доступа: 28.02.2022.

Currently, the share of the use of renewable energy sources (RES) in the energy balance of countries is increasing all over the world. For Belarus, this topic is also relevant, as it helps to reduce the use of fossil fuels for heating buildings, as well as reduce emissions of harmful substances into the atmosphere. Therefore, the development of heat supply systems for buildings using RES is a promising area in which research is needed.

Дубровник Максим Александрович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, dubrovnikmaksim97@gmail.com.

Научный руководитель – *Кропачева Людмила Владимировна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

Н. А. ЖИНКО

ОБОРУДОВАНИЕ КОТЕЛЬНОЙ АДМИНИСТРАТИВНО-ЖИЛОГО КОМПЛЕКСА

Целью данной статьи является анализ и выбор оборудования для создания котельной. Назначение котельной установки – теплоснабжение административно-жилого комплекса, предполагаемая мощность – около 10 кВт. Также необходимо рассмотреть основные процессы, происходящие в котельной установке, и построить принципиальную тепловую схему.

Современная котельная установка представляет собой сложное техническое сооружение и состоит из котла и вспомогательного котельного оборудования, размещенного в помещении котельной или вне ее границ и предназначенного для производства пара с необходимыми параметрами или для подогрева горячей воды, или того и другого одновременно [1].

Необходимо выделить 3 основных процесса, происходящих в котельной: процесс водоподготовки, воздухообмен котла, процесс функционирования тепловой сети.

Работа тепловой сети.

Сетевая вода при помощи циркуляционного насоса (установлен перед котлом) подается на поверхности нагрева водогрейного котла. Достигая определенной температуры на поверхностях нагрева, сетевая вода направляется к тепловым пунктам (теплообменникам), где происходит процесс отдачи тепла воде, которая движется к потребителям. Охлажденная сетевая вода движется обратно к котлу, в процессе к ней добавляется подпиточная вода.

Котёл – конструктивно объединенный в одно целое комплекс устройств для получения пара или для нагрева воды под давлением. В состав котла входят: топка, пароперегреватель, водяной экономайзер, воздухоподогреватель, обмуровка, каркас, арматура [1].

Топливный тракт – комплекс оборудования для подготовки топлива к сжиганию и подачи в топку [2].

Поверхности нагрева (экраны трубы и котельный пучок) – элементы котла, в которых происходит передача теплоты от факелов и продуктов сгорания теплоносителю (воде или пару).

Каркас котла – опирающаяся на фундамент металлическая конструкция для удержания барабана котла, трубной системы, лестниц и мостов, иногда обмуровки [2].

Обмуровка котла – система огнеупорных и теплоизоляционных ограждений или конструкций котла, предназначенная для уменьшения тепловых потерь и обеспечения газовой плотности [3].

Топка (топочное устройство) – часть котла, предназначенная для сжигания топлива с целью преобразования его химической энергии в тепло. Это может быть камера с колосниками или без них, зольник, устройство для подачи топлива и воздуха с целью удаления шлака. Топка должна обеспечить полное и устойчивое сгорание топлива с малыми потерями тепла. В топке происходит теплоотдача излучением (радиацией) к экранам.

Насос сетевой воды – насос, необходимый для циркуляции теплоносителя (воды или пара) по тепловой сети [2].

Процесс водоподготовки.

Процесс водоподготовки начинается с забора питательной воды со скважины или очистных сооружений. Затем вода проходит через механический фильтр и деаэрактор, после чего становится мягче и чище. После завершения подготовки вода хранится в закрытом резервном баке. При необходимости подпиточным насосом вода из бака подается в экономайзер, где подогревается до температуры подачи в сеть и на поверхности нагрева.

Многочисленные фильтры и деаэраторы предназначены для механической очистки, обезжелезивания, стерилизации и умягчения воды, т. к. без этих процессов тепловая сеть при работе с неподготовленным теплоносителем быстро выйдет из строя [4].

Бак-расширитель – ёмкость больших объёмов, предназначенная для хранения резервов подпиточной воды.

Насос подпиточной воды – насос, необходимый для подачи подпиточной воды из бака-расширителя в тепловую сеть [4].

Экономайзер – устройство, обогреваемое продуктами сгорания топлива и предназначенное для подогрева или частичного парообразования воды, поступающей в котел [3].

Воздухообмен котла.

Воздух из атмосферы попадает в воздухоподогреватель, откуда при достижении определенной температуры с помощью вентилятора попадает в топку котла для достижения котлом максимального КПД. Отработанные газы при помощи дымососа после фильтрации выбрасываются в атмосферу.

Воздухоподогреватель – устройство, предназначенное для подогрева воздуха, поступающего в топку для горения топлива за счёт использования теплоты уходящих газов [4].

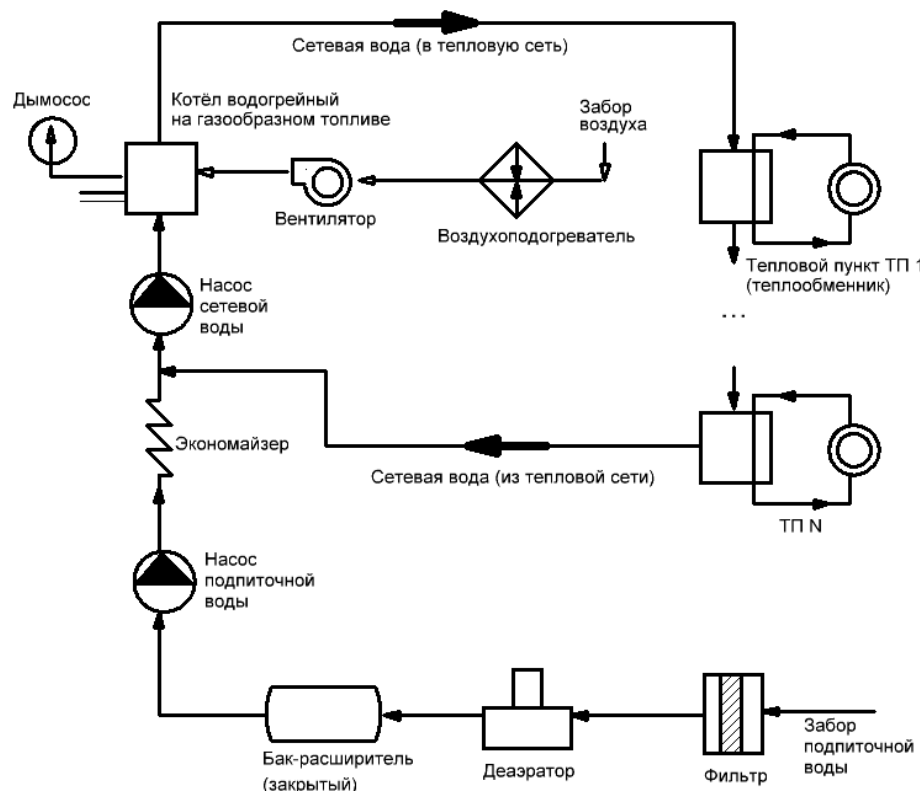


Рисунок 1 – Принципиальная тепловая схема котельной установки

Вентилятор – устройство для принудительной подачи подогретого воздуха из воздухоподогревателя в топку котла.

Дымосос – устройство для принудительного вывода из топки котла отфильтрованных отработанных газов [4].

В итоге, изучив 3 основных процесса, происходящих в котельной установке, необходимо построить принципиальную тепловую схему:

В заключение можно сделать вывод, что в конкретной котельной установке происходит 3 основных процесса: цикл тепловой сети, водоподготовка и воздухообмен котла. Для функционирования тепловой сети необходим непосредственно котёл и его вспомогательное оборудование, а также сетевые насосы. В процессе водоподготовки задействовано оборудование фильтрации, экономайзер, бак-расширитель и насосы подпиточной воды. Для воздухообмена котла предусмотрен воздухоподогреватель, вентилятор и дымосос.

Список литературы

1. Тарасюк, В. М. Эксплуатация котлов. Практическое пособие для оператора котельной / В. М. Тарасюк. – Минск, 2006.
2. Соколов, Б. А. Котельные установки, работающие на твердом топливе : учеб. пособие / Б. А. Соколов. – М. : Изд. центр «Академия», 2012.
3. Варфоломеев, Ю. М. Отопление и тепловые сети / Ю. М. Варфоломеев, О. Я. Кокорин. – М. : Инфра-М, 2006.
4. Елистратов, С. Л. Котельные установки и парогенераторы / С. Л. Елистратов, Ю. И. Шаров. – Новосибирск : НГТУ, 2017. – 102 с.

This article discusses the equipment necessary for the functioning of the boiler room, the purpose of each component, the interaction of this equipment. The processes of interaction of the main working devices have been studied, and a thermal circuit diagram has also been constructed.

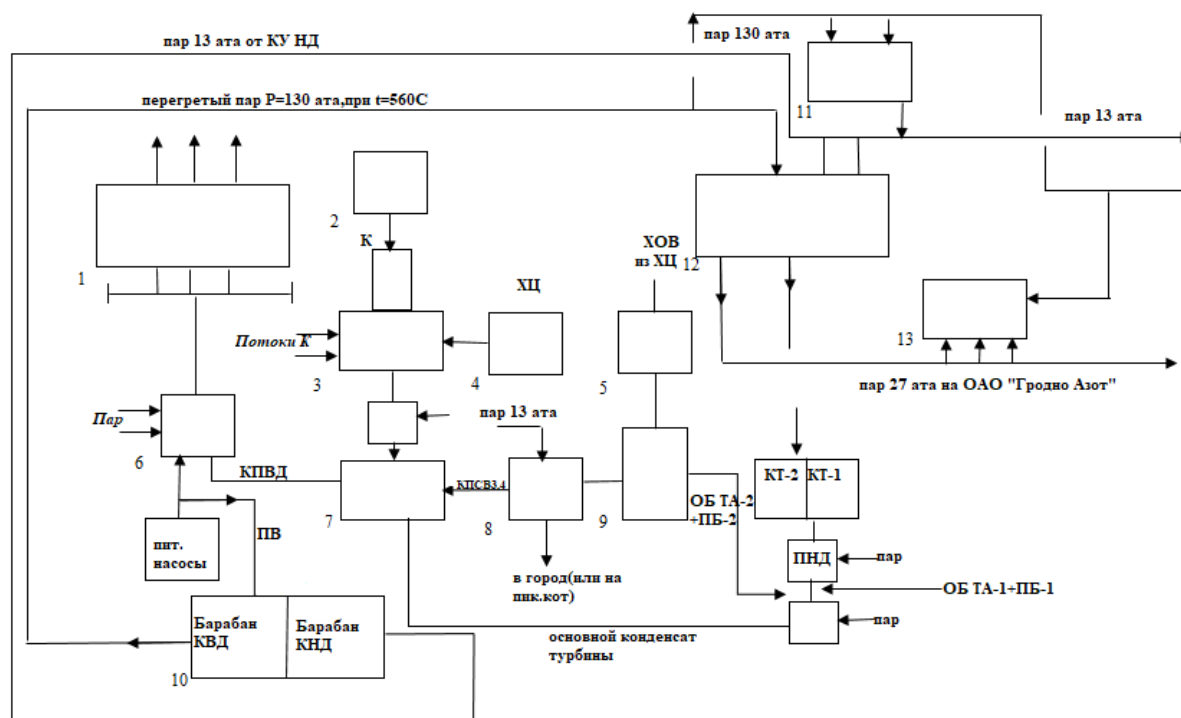
Жинко Никита Александрович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, zhinkonik@mail.ru.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, german@grsu.by.

ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ НА ПРИМЕРЕ ГРОДНЕНСКОЙ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ-2

Гродненская теплоэлектроцентраль-2 (ТЭЦ-2) введена в эксплуатацию в 1970 году для обеспечения технологическим паром и электроэнергией открытого акционерного общества (ОАО) «Гродно Азот» (потребитель I категории), а также подачи отопления и горячего водоснабжения (по закрытой схеме) для жилищно-коммунального сектора г. Гродно. Источником водоснабжения выступает река Неман (через водозабор ОАО «Гродно Азот»). Система водоснабжения является оборотной с градирнями.

Расчетные нагрузки расхода тепла от ТЭЦ на нужды отопления, вентиляции и горячего водоснабжения промышленных предприятий и жилищно-коммунальных нужд города составляют 971,4 МВт (835,4 Гкал/ч). Технологические нагрузки в паре составляют 203,5 МВт (175 Гкал/ч). Выдача электрической мощности осуществляется через закрытое распределительное устройство (ЗРУ) на напряжение 110 кВ.



- 1 – котлы БКЗ 320 140ГМ; 2 – подача сырой воды на подогрев ПСВ 1, 2; 3 – деаэратор 7 ата;
4 – подача из ХЦ ОК, ЗК, ГОВ; 5 – деаэратор теплосетевой; 6 – подогреватели высокого давления (ПВД);
7 – деаэраторы 6 ата; 8 – подогреватели сетевой воды (ПСВ 3, 4);
9 – основные бойлера ТА-1, 2 и пиковые бойлера ТА 1, 2;
10 – котёл-утилизатор, состоящий из контура высокого давления (КВД), контура низкого давления (КНД) и ГПСВ;
11 – быстродействующее редукционно-охладительное устройство (БРОУ);
12 – турбины (ТА 1-3); 13 – резервируется редукционно-охладительными установками (РОУ)

Рисунок 1 – Блок-схема Гродненской ТЭЦ-2

Пар, поступивший в турбины типа ПТ, расходуется на выработку электроэнергии, подогрев питательной воды в регенеративной системе турбоустановки, обеспечение отпуска тепла с паром 27 ата и 13 ата на ОАО «Гродно Азот», нагрев сетевой воды в основных и пиковых бойлерах и на тепловые собственные нужды станции. Часть пара, обеспечивающая выработку электроэнергии на конденсационном потоке, поступает в конденсатор, где отдает тепло охлаждающей воде, направляемой в градирни. Пар из

турбины Р-50 используется для подогрева питательной воды турбоустановки и для отпуска пара 13 ата. Подача пара 27 ата на ОАО «Гродно Азот» резервируется редукционно-охладительными установками (РОУ 140/30). Резервное питание паром коллектора 13 ата может осуществляться через быстродействующее редукционно-охладительное устройство БРОУ 140/13.

Подогрев сетевой воды производится в основных и пиковых бойлерных установках турбин, в конденсаторе ТА-2 при работе в режиме ухудшенного вакуума, в двух подогревателях сетевой воды, в газовых подогревателях сетевой воды котла-утилизатора, водогрейных котлах пиковой котельной и электродной бойлерной установке. Основные бойлеры турбин ПТ (по два на турбину) включены по сетевой воде параллельно и питаются паром теплофикационных отборов. Выдерживание графика температуры прямой сетевой воды обеспечивается изменением давления пара в отборе в пределах 0,7–2,5 ата (максимальный нагрев воды в основных бойлерах – до 120 °С при давлении в отборе 2,5 ата). Дополнительный подогрев воды (до 150 °С) может производиться в двух пиковых бойлерах, которые подключены по сетевой воде после основных бойлеров и питающихся паром из коллектора 13 ата, которые могут работать так же и при остановленной турбине. При недостатке отборного пара и др. причинах необходимый подогрев сетевой воды обеспечивается водогрейными котлами.

Питательная вода, подаваемая в котлы БКЗ-320, является смесью конденсатов (из регенеративных подогревателей и конденсаторов турбин, бойлеров, возврат конденсата от внешних потребителей) и химобессоленной воды, подготовленной в водоподготовительной установке (ВПУ) для компенсации невозврата конденсата с производства и восполнения внутриванционных потерь пара, конденсата и питательной воды. ВПУ обеспечивает также подготовку химочищенной воды для подпитки теплосети и очистку конденсата, возвращаемого от потребителей тепловой энергии в паре.

Часть исходной воды, поступающей на ТЭЦ, направляется в схему технического водоснабжения и на подпитку градирен, а остальной поток, нагретый до 35 °С в охладителях замазученного конденсата, производственного конденсата и подогревателях сырой воды, поступает на ВПУ. Химочищенная вода подается в атмосферные деаэраторы на подпитку теплосети. Химобессоленная вода поступает на деаэрацию в вакуумный деаэратор, в который подается и очищенный на ВПУ конденсат потребителей пара. После вакуумного деаэратора смесь химобессоленной воды и конденсата направляется в деаэраторы питательной воды 6 ата, смешиваясь с потоком основного конденсата, и питательными насосами подается на котлы БКЗ-320. Подогрев воды в атмосферных и вакуумном деаэраторах производится паром теплофикационных отборов турбин. Деаэратор 6 ата питается паром выхлопа турбины ТГ-0,75 или из производственного отбора через РУ-13/6. Из этого же отбора пар берется на мазутное хозяйство и распыл мазута в форсунках, подогрев воздуха в калориферах котлов БКЗ-320 (совместно с паром из расширителей непрерывной продувки).

In this article describes the main technological processes implemented in the combined heat and power plant and other energy facilities on the example of Grodno CHP-2.

Журавская Карина Валерьевна, студентка 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, sa451giu32@mail.ru.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, german@grsu.by.

УДК 616-71

В. В. КОЗЛОВСКИЙ, А. Ю. БРЕЗИН, В. А. СКРУНДЬ ПУЛЬСОКСИМЕТР НА ОСНОВЕ ДАТЧИКА MAX30102

Представлены результаты разработки простейшего пульсоксиметра на основе датчика MAX30102 и микроконтроллера ESP8266.

Пульсоксиметр представляет устройство, которое путём анализа спектров поглощения инфракрасного излучения, прошедшего через живую ткань, определяет уровень кислорода в крови и частоту сердечных сокращений.

Датчик пульсоксиметра представляет собой комбинацию из двух светоизлучающих диодов красного и инфракрасного свечения в комбинации с фотодиодом, регистрирующим количество излучения, прошедшего через ткань. Обычно датчик располагается на кончике пальца или мочке уха пациента.

Свет проходит через ткани и сосуды, частично поглощаясь в них. Поглощение гемоглобином света двух различных по длине волн меняется в зависимости от насыщения крови кислородом. Так, гемоглобин, связанный с кислородом, лучше поглощает инфракрасный свет, а свободный от кислорода гемоглобин –

красный свет. Изменяя попеременно (на двух длинах волн) сигнал с выхода фотодиода и выполняя несложные расчёты с помощью простейшей ЭВМ, возможно получить значение насыщения крови кислородом.

В качестве основы прибора выбран датчик MAX30102 [1], работающий на отражение. В датчик интегрированы светодиоды и фотоприемник, а также встроены оптические элементы. Используемая в MAX30102 электронная схема обработки сигналов характеризуется низким уровнем собственного шума и обеспечивает подавление внешней засветки. В процессе измерений используется канал красного и инфракрасного света с регулируемой программным образом интенсивностью свечения и длительностью сеансов измерения. Датчик имеет встроенный 18-битный АЦП с буфером на 32 измерения, а также схемы коррекции результата измерений.

Взаимодействие датчика с внешними устройствами происходит через стандартный интерфейс I²C. MAX30102 может быть программно переведён в режим ожидания с практически нулевым током потребления, что позволяет отказаться от выключателя питания. Датчик имеет высокую чувствительность и оснащён встроенным термометром, позволяющим корректировать результат измерения и компенсировать ошибки, возникающие с изменением температуры окружающей среды.

Для обработки результатов измерения и вывода их на внешний жидкокристаллический дисплей применён микроконтроллер ESP8266 [2].

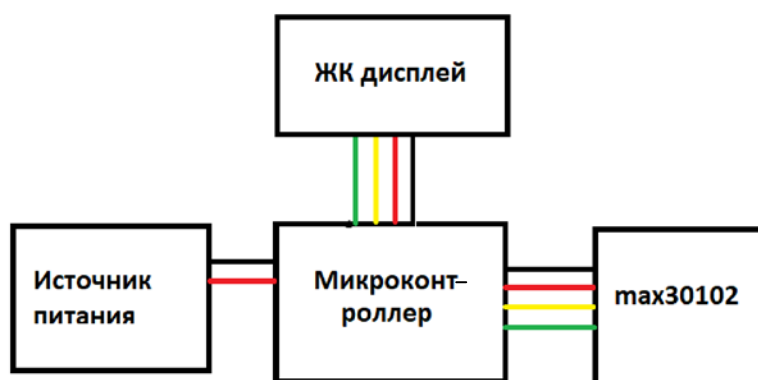


Рисунок 1 – Блок-схема устройства

Программное обеспечение устройства написано на языке C++ и работает по следующему алгоритму:

1. Испускание инфракрасного излучения из светодиода датчика MAX30102.
2. Измерение интенсивности испущенного излучения.
3. Измерение интенсивности отражённого излучения.
4. Вычисление содержания кислорода через отношение интенсивности отражённого излучения к интенсивности испущенного излучения.
5. Вывод вычисленной величины на ЖК дисплей.
6. Возврат к пункту 1.

Список литературы

1. Maxim Integrated Products – MAX30102 High-Sensitivity Pulse Oximeter and Heart-Rate Sensor for Wearable Health [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX30102.pdf>. – Дата доступа: 13.03.2022.
2. Espressif Systems – ESP8266 Technical Reference [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266-technical_reference_en.pdf. – Дата доступа: 13.03.2022.

The results of the development of the simplest pulse oximeter based on the MAX30102 sensor and the ESP8266 microcontroller are presented.

Козловский Владислав Вячеславович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, kozlovskii9928@gmail.com.

Брезин Александр Юрьевич, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

Скрундь Владислав Александрович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, vladskrund20@gmail.com.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, доцент, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, german@grsu.by.

К. С. ЛАМАН

МЕТОД БЕСКОНТАКТНОЙ ДИАГНОСТИКИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Рассмотрена система бесконтактного диагностирования технического состояния типовых элементов радиоэлектронного оборудования, сущность которой состоит в регистрации инфракрасного (ИК) излучения, исходящего от исследуемого объекта и его обработки с помощью интерференционно-голографической системы. Разработанное устройство существенным образом сократит время поиска неисправности в конструктивных элементах аппаратуры и откроет возможности прогнозирования в ней появления неисправностей.

Рост функциональной значимости, сложности и миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры, привели к большим трудностям обеспечения её качества и надежности. Все это привело к повышению требований к достоверности оценки состояния и прогнозирования работоспособности аппаратуры и ее элементов. Информация, полученная при контроле, должна не только фиксировать факт наличия неисправности, но и устанавливать причинно-следственные связи, которые необходимы для понимания существа физических процессов, вызывающих неисправности и для обеспечения оперативных корректирующих действий.

Решение этих вопросов лежит на пути создания бесконтактных систем диагностирования технического состояния типовых элементов радиоэлектронного оборудования. Наиболее перспективным является бесконтактный тепловой метод, сущность которого состоит в регистрации инфракрасного (ИК) излучения, исходящего от исследуемого объекта, без непосредственного механического контакта с ним.

Однако потенциальная разрешающая способность современных приборов при фиксации температуры для различных вариантов устройств диагностики не позволяет в полном объеме использовать эти методы для оперативного и надежного диагностирования функционального состояния радиоэлементов. Актуальным является вопрос повышения разрешающей способности фиксации температуры путем разработки и использования методик проведения точных измерений физических величин, основанных на новых физических эффектах и принципах.

Анализ потенциальных технических возможностей оптических методов измерений и, в особенности, методов голографической интерферометрии, позволяет сделать вывод об актуальности разработки высокочувствительного измерителя температуры. Для проведения таких измерений выходной сигнал с термоприемника должен быть однозначно взаимосвязан с одним из параметров когерентного оптического излучения. При фиксации изменений этого параметра можно определить характер изменений малых токов и напряжений. Удобнее всего в качестве такого параметра оптического когерентного излучения использовать кривизну фазового фронта светового потока. Фиксация изменений фазового фронта такого светового потока и их анализ с успехом могут быть реализованы технически при использовании методов голографической интерферометрии. Структурная схема разработанного устройства представлена на рис. 1.

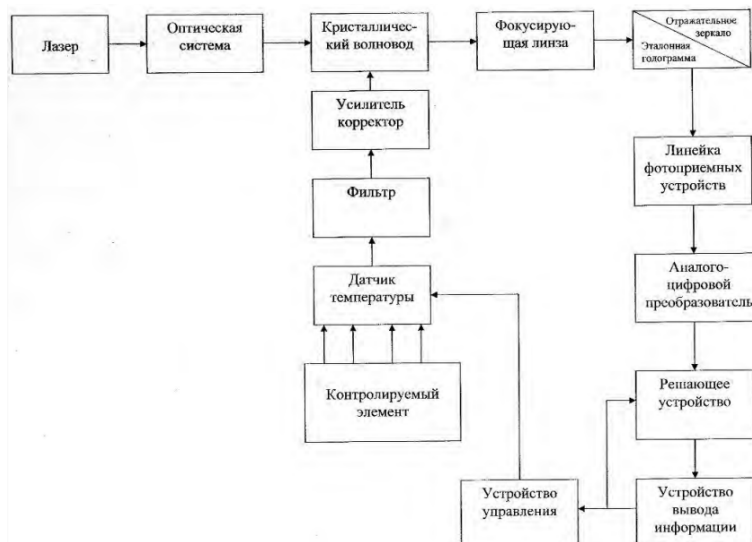


Рисунок 1 – Структурная схема метода диагностики

Схема работает следующим образом: ИК-излучение поступает на термодатчик, который вырабатывает электрический сигнал, измеряемый и фиксируемый специальной схемой включения.

Далее электрический сигнал поступает на усилитель-корректор (УК), где происходит усиление сигнала и его корректировка по уровню. На фильтре (Ф) отсеиваются побочные излучения (наводки сети, работа электрических двигателей, генераторов и т. д.). Для получения максимальной вольтовой чувствительности измерения выходного сигнала в устройстве применены интерференционно-голографические методы измерения. Эти методы позволяют построить высокочувствительные широкодиапазонные элементы для более качественного решения задачи бесконтактной диагностики. Данный метод будет реализовывать электронно-оптическая часть (ЭОЧ) устройства.

ЭОЧ работает следующим образом. Излучаемый лазером световой поток через систему линз направляется на боковую грань кристаллического волновода, где он преломляется, фокусируется в точке и попадает на выходную грань волновода, снова преломляется, выходит за пределы волновода и попадает на фокусирующую линзу. Линза фокусирует световой поток в точках оптической оси, в зависимости от кривизны волнового фронта падающего на нее светового потока. Кривизна волнового фронта потока определяется положением точки фокуса, которое зависит от приложенного к его клеммам напряжения, т. е. от интенсивности потока ИК-излучения. Фокусирующая линза направляет световой поток на эталонную голограмму.

Падающий на голограмму световой поток частично дифрагирует от нее, а часть его проходит через голограмму, отражается зеркалом и повторно проходит через голограмму, частично дифрагируя от нее. Дифрагированный от голограммы первичный световой поток и световой поток, прошедший через голограмму, отраженный зеркалом и снова прошедший через голограмму, попадают в плоскость линейки фотоприемных устройств (ЛФПУ), где образуют интерферограмму в виде темных и светлых колец эллиптической формы. Расчеты показали, что разработанное устройство тепловой диагностики позволяет измерять электрическое напряжение с точностью до 8–10 В. Каждому положению точки фокуса в кристаллическом волноводе в зависимости от величины управляющего напряжения на его клеммах будет соответствовать однозначная кривизна волнового фронта светового потока, падающего на эталонную голограмму, а значит, и соответствующий цифровой двоичный код с выходов аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

При использовании связки аналоговый коммутатор (АК) – аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) производится опрос каждого фотоприемника, входящего в состав ЛФПУ. Выходной код сравнивается с эталонным кодом. Устройство управления позволяет также управлять положением датчика температуры.

Линейка фотоприемных устройств позволяет фиксировать через ЭОЧ малейшие колебания сигнала с датчика. Устройство отображения позволяет контролировать исходное положение системы и отображать распределение температурных потенциалов на тепловой карте.

Таким образом, данное устройство может обеспечить качественное решение задачи измерения температуры элементов радиоаппаратуры, построения ее тепловой карты, а также проведения анализа отклонений температуры от заданных допусков с указанием возможных причин неисправности и местоположения диагностируемого элемента на плате.

Список литературы

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : в 5 т. Т. 4 : Оптика : учеб. пособ. / Д. В. Сивухин. – М. : Физматлит, 2017. – 792 с.
2. Алешкевич, В. А. Курс общей физики. Оптика : учеб. / В. А. Алешкевич. – М. : Физматлит, 2010. – 320 с.
3. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. Т. 2 : Электричество и магнетизм. Волны. Оптика : учеб. / И. В. Савельев. – М. : Наука, 2018. – 500 с.

A system for non-contact diagnostics of the technical condition of typical elements of radio-electronic equipment is considered, the essence of which is the registration of infrared (IR) radiation emanating from the object under study and its processing using an interference-holographic system.

Ламан Каролина Сергеевна, студентка 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, karolina.attwood@mail.ru.

Научный руководитель – *Ассанович Борис Алиевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, bas@grsu.by.

УДК 004.457

П. Р. МАКЕЙ

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО DDS-ГЕНЕРАТОРА

Целью работы является создание программного обеспечения для DDS-генератора со встроенным милливольтметром. Разработанный авторами генератор планируется использовать в составе учебно-демонстрационного лабораторного комплекса по изучению колебаний и электромагнитной индукции.

В качестве метода цифровой генерации сигнала использован метод цифрового вычислительного синтеза (DDS). Для реализации метода необходимо иметь величины мгновенных значений величины напряжения на всем периоде сигнала. При этом значения выходного напряжения могут быть рассчитаны в процессе работы алгоритма либо же заранее записаны в виде таблицы-массива в виде констант, которые по очереди выводятся в цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). В разработанном генераторе в качестве ЦАП используется 8-битный порт микроконтроллера, нагруженный на R-2R матрицу.

Мгновенное значение фазы непрерывного синусоидального сигнала циклически изменяется в диапазоне от 0 до 2π . Значение фазы генерируется в цифровом виде. Функция переноса, которой обладает счетчик, позволяет реализовать в синтезаторе DDS непрерывное циклическое изменение величины фазы. Поскольку примененный ЦАП не способен работать в области отрицательных напряжений, сигнал должен иметь постоянную составляющую, которая позволяет вписать всю амплитуду в диапазон от нуля до величины опорного напряжения ЦАП.

Выражение для расчета функции сигнала имеет следующий вид:

$$f(x) = \frac{V_c + A \sin(2\pi x_i + P)}{N_i},$$

где V_c – постоянная составляющая сигнала, A – амплитудное значение напряжения, x_i – мгновенное значение напряжения, P – значение аккумулятора фазы, N_i – разрядность ЦАП.

Массив мгновенных значений напряжения синусоидального сигнала хранится в памяти микроконтроллера. Каждый такт работы генератора происходит инкрементация значения величины аккумулятора фазы на некоторую величину, от которой зависит частота. Согласно мгновенному значению выбирается определенный элемент из массива:

$$f_{out} = \frac{M \cdot f_c}{2^n}$$

где f_{out} – частота выходного сигнала, M – прирост значения аккумулятора фазы, f_c – частота сигнала тактирования, n – разрядность аккумулятора фазы.

Т. к. массив ограничен 256 значениями, что соответствует разрядности в 8 бит, аккумулятор фазы для обеспечения большей разрешающей способности выбран величиной в 24 бита. Для выбора элемента из массива используется предварительное деление на 4, что ограничивает максимальную величину на значениях в 8 бит.

Вторая задача, решаемая авторами при написании программного обеспечения – измерение амплитудных значений сигнала при помощи встроенного в микроконтроллер 10-битного аналого-цифрового преобразователя, который работает в режиме непрерывных измерений, с максимальной частотой дискретизации 125 кГц, и генерацией прерываний по завершению измерения.

На вход АЦП подается сигнал, который предварительно усиливается и выпрямляется при помощи прецизионного двухполупериодного выпрямителя на базе операционного усилителя. Методика измерения состоит в следующем: АЦП производит непрерывные измерения с максимальной частотой. При появлении нового значения производится сравнение с предыдущим, и, если значение больше, чем предыдущее, величина перезаписывается, заменяя предыдущее значение, в ином случае остается неизменной. Измерения производятся в течение 1 секунды. По истечении этого времени микроконтроллер по таймеру обнуляет значение переменной с целью получения новых данных.

Третья задача – создание пользовательского интерфейса и алгоритмов управления прибором. Для управления устройством использованы: 4 кнопки, с помощью которых производится изменение частоты, переменный резистор, которым производится регулировка амплитуды выходного сигнала, а также знакосинтезирующий жидкокристаллический дисплей на 2 строки по 16 символов.

Область экрана условно разделена на 4 части в соответствии с выводимой информацией (рис. 1).



Рисунок 1 – Интерфейс и органы управления DDS-генератора

Регулировка частоты осуществляется с помощью кнопок 1, 2, 3, 4. Кнопки 1 и 3 производят перемещение курсора соответственно влево и вправо. С помощью кнопок 2 и 4 осуществляется увеличение или уменьшение значения выбранного разряда на экране. Вращая ручку регулировки амплитуды можно установить необходимое амплитудное значение сигнала, генерируемого прибором. В верхнем положении переключателя милливольтметра осуществляется измерение значения напряжения с выхода генератора. В нижнем положении осуществляется измерение напряжения с разъема на задней панели прибора (внешний датчик).

Программное обеспечение генератора состоит из основного цикла и нескольких независимых алгоритмов, работающих по прерываниям. В момент включения прибора происходят следующие начальные операции:

- Инициализация знакосинтезирующего дисплея (для упрощения чтения кода была создана специальная функция).

- Обнуление большинства переменных, присваивание аккумулятору фазы значения, обеспечивающего синтез синусоидального сигнала с частотой в 1 Гц.

Далее генератор переходит в основной режим работы, в котором происходит одновременное выполнение нескольких функций:

- Вывод в порт ЦАП значений синусоидального сигнала.
- Опрос АЦП и выполнение алгоритма измерения амплитудного значения сигнала.
- Опрос кнопок.
- Вывод информации на дисплей (в основном цикле).
- Обнуление раз в секунду значения измеренного напряжения.

Весь код структурно разделен на 3 части. В отдельных функциях находятся опрос кнопок, работа с дисплеем, в основном цикле осуществляется вызов необходимых функций и обработка вспомогательных процессов.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка и изготовление унифицированных установок для лабораторного практикума и демонстраций по общей физике (колебания, электричество и магнетизм)», финансируемого за счет средств фонда инновационного развития университета. Результаты работы использованы при изготовлении опытной партии из пяти лабораторного практикума по курсу «Механика».

Список литературы

1. ATmega8A datasheet [Электронный ресурс] / Microchip Technology comp. – 2018. – Режим доступа: <https://www.microchip.com/wwwproducts/productds/ATmega8A>. – Дата доступа: 12.09.2021.
2. Учебный курс. Опрос кнопок [Электронный ресурс] / ChipEnable.ru. – 2021. – Режим доступа: <https://chipenable.ru/index.php/programming-avr/38-uchebnyy-kurs-opros-knopok.html>. – Дата доступа: 12.09.2021.
3. Учебный курс. AVR библиотека для LCD с произвольным подключением выводов [Электронный ресурс] / ChipEnable.ru., – 2021. – Режим доступа: <https://chipenable.ru/index.php/programming-avr/159-avr-lcd-biblioteka.html>. – Дата доступа: 12.09.2021.
4. Электрорадиоизмерения / В. И. Нефедов [и др.]. – М. : Наука, 2018.

The paper presents a brief description of the device of a laboratory dds-generator designed for research and laboratory classes at the university.

Макей Прохор Романович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, prohormakey123@gmail.com.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, german@grsu.by.

УДК 629.3.066

О. А. МАЛЫЦЕВ, В. А. ГРЕМЧУК

УСТРОЙСТВО ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трансформаторы являются одними из основных электрических машин в энергетике. Знание устройства и принципа работы трехфазного трансформатора необходимо для его грамотной эксплуатации и ремонта.

Трансформаторы – статические электромагнитные аппараты, с помощью которых возможно преобразовать переменный ток из одного класса напряжения в другой, при этом с неизменной частотой. В энергосистемах трансформатор, который преобразовывает электроэнергию трехфазного напряжения, называют трехфазным силовым. Для передачи электроэнергии от генераторов электростанций к линиям электропередач (ЛЭП) применяют повышающие трансформаторы (они увеличивают класс напряжения), от

ЛЭП к распределительным подстанциям и далее к потребителям – понижающие (они уменьшают класс напряжения) [1].

Трёхфазный ток можно трансформировать тремя совершенно отдельными однофазными трансформаторами. В этом случае обмотки всех трех фаз магнитно не связаны друг с другом: каждая фаза имеет свою магнитную цепь. Преобразование трёхфазной системы напряжения можно реализовать с помощью трёх однофазных трансформаторов. Но при этом будет использован аппарат значительного веса и внушительных размеров. Но тот же трёхфазный ток можно трансформировать и одним трехфазным трансформатором, у которого обмотки всех трех фаз магнитно связаны между собой, так как имеют общую магнитную цепь. Поэтому в сетях мощностью до 60 тыс. кВА его применение является оптимальным вариантом [2].

Представим себе три однофазных трансформатора, приставленных один к другому так, что три стержня их образуют один общий центральный стержень (рисунок 1). На каждом из остальных трех стержней наложены первичные и вторичные обмотки (на рисунке вторичные обмотки не изображены). Предположим, что первичные катушки всех стержней трансформатора совершенно одинаковы и намотаны в одном направлении (на рисунке первичные катушки намотаны по часовой стрелке, если смотреть на них сверху). Соединим все верхние концы катушек в нейтраль О, а нижние концы катушек подведем к трем зажимам трехфазной сети.

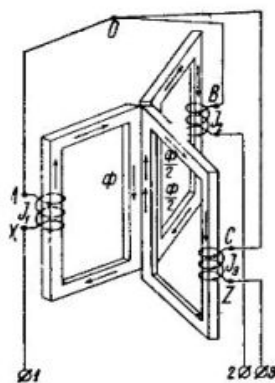


Рисунок 1

Токи в катушках трансформатора создадут переменные во времени магнитные потоки, которые будут замыкаться каждый в своей магнитной цепи. В центральном составном стержне магнитные потоки сложатся и в сумме дадут ноль, ибо эти потоки создаются симметричными трехфазными токами, относительно которых мы знаем, что сумма мгновенных значений их равна нулю в любой момент времени. Например, если бы в катушке AX ток I_1 был наибольший и проходил в указанном на рисунке направлении, то магнитный поток был бы равен наибольшему своему значению Φ и был направлен в центральном составном стержне сверху вниз. В двух других катушках BY и CZ токи I_2 и I_3 в тот же момент времени равны половине наибольшего тока и имеют обратное направление по отношению к току в катушке AX (таково свойство трехфазных токов). По этой причине в стержнях катушек BY и CZ магнитные потоки будут равны половине наибольшего потока и в центральном составном стержне будут иметь обратное направление по отношению к потоку катушки AX. Сумма потоков в рассматриваемый момент равна нулю. То же самое имеет место и для любого другого момента. Отсутствие потока в центральном стержне не означает отсутствия потоков в остальных стержнях. Если бы мы уничтожили центральный стержень, а верхние и нижние ярма соединили в общие ярма (см. рис. 2), то поток катушки AX нашел бы себе путь через сердечники катушек BY и CZ, причем магнитодвижущие силы этих катушек сложились бы с магнитодвижущей силой катушки AX. В таком случае мы получили бы трехфазный трансформатор с общей магнитной цепью всех фаз.

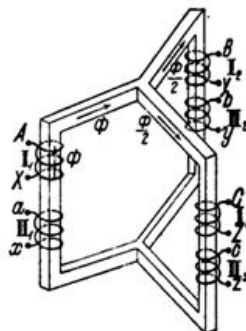


Рисунок 2

Следствием сдвига по фазе магнитных потоков в сердечниках на $1/3$ периода является такой же сдвиг по фазе и электродвижущих сил, индуцируемых как в первичных, так и во вторичных катушках, наложенных на стержнях. Электродвижущие силы первичных катушек почти уравнивают приложенное трехфазное напряжение. Электродвижущие силы вторичных катушек при правильном соединении концов катушек дают трехфазное вторичное напряжение, которое подается во вторичную цепь. В отношении конструкции магнитной цепи трехфазные трансформаторы, как и однофазные, разделяются на стержневые и броневые. Стержневые трехфазные трансформаторы подразделяются на:

- трансформаторы с симметричной магнитной цепью (рисунок 3),
- трансформаторы с несимметричной магнитной цепью (рисунок 4).

У первого трансформатора стержни расположены по вершинам углов равностороннего треугольника; у второго трансформатора стержни расположены в одной плоскости. Расположение стержней по вершинам углов равностороннего треугольника дает равные магнитные сопротивления для магнитных потоков всех трех фаз, так как пути прохождения этих потоков одинаковы. В самом деле, магнитные потоки трех фаз проходят каждый в отдельности через один вертикальный стержень полностью и через два других стержня по половине.

На рис. 4 пунктиром изображены пути замыкания магнитного потока фазы стержня 2. Легко видеть, что для потоков фаз стержней 1 и 3 пути замыкания их магнитных потоков совершенно одинаковы. Это значит, что у рассматриваемого трансформатора магнитные сопротивления для потоков равны между собою. Расположение стержней в одной плоскости приводит к тому, что магнитное сопротивление для потока средней фазы (на рис. 4 для фазы стержня 2) меньше, нежели для потоков крайних фаз (на рис. 4 – для фаз стержней 1 и 3). Следствием неравенства магнитных сопротивлений для потоков разных фаз трехфазного трансформатора является неравенство токов холостой работы в отдельных фазах при одном и том же фазном напряжении. Однако при небольшой насыщенности железа ярма и хорошей сборке железа стержней это неравенство токов незначительно. Так как конструкция трансформаторов с несимметричной магнитной цепью значительно проще, чем трансформатора с симметричной магнитной цепью, то первые трансформаторы и нашли себе преимущественное применение. Трансформаторы с симметричной магнитной цепью встречаются редко.

Вторую группу трехфазных трансформаторов составляют броневые трансформаторы. Броневой трансформатор можно рассматривать как бы состоящим из трех однофазных броневых трансформаторов, приставленных один к другому своими ярмами. На рис. 5 схематически изображен броневой трехфазный трансформатор с вертикально расположенным внутренним стержнем. Легко видеть из рисунка, что плоскостями АВ и CD он может быть разбит на три однофазных броневых трансформатора, магнитные потоки которых могут замыкаться каждый по своей магнитной цепи. Пути прохождения магнитных потоков на рис. 5 указаны пунктирными линиями [3].

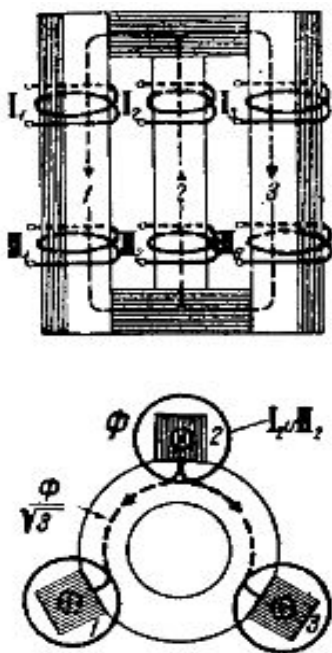


Рисунок 2

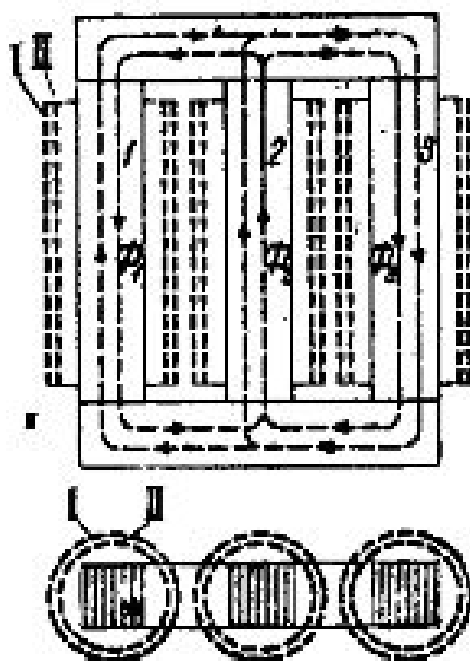


Рисунок 2

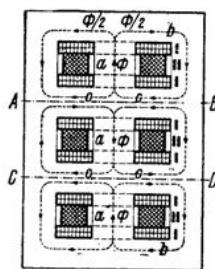


Рисунок 5

Изучение устройства и принципа работы трехфазного трансформатора может дать не только понимание физики происходящего в нем процесса, необходимое для грамотной эксплуатации, но и объяснить причины использования конкретно этих типов трансформаторов для конкретных задач в энергетике.

Список литературы

1. Принцип действия трехфазного трансформатора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ruselt.ru/articles/printsip-deystviya-trekhfaznogo-transformatora>. – Дата доступа: 09.03.2022.
2. Трехфазный трансформатор: строение, виды, принцип работы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://220v.guru/elementy-elektriki/transformatory/trehfaznyy-transformator-stroenie-vidy-princip-raboty.html#stroenie>. – Дата доступа: 09.03.2022.
3. Принцип действия и устройство трехфазных трансформаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/main/osnovy/473-princip-dejstvija-i-ustrojjstvo.html>. – Дата доступа: 09.03.2022.

Transformers are one of the main electrical machines in the power industry. Knowledge of the device and the principle of operation of a three-phase transformer is necessary for its competent operation and repair.

Мальцев Олег Андреевич, студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, as2241466@gmail.com.

Гремчук Владислав Алексеевич, студент 2 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, vlad.gremchuk@mail.ru.

Научный руководитель – *Комар Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, v.komar@grsu.by.

УДК 677.016.671.3

Ю. И. МАРУЩАК, Н. Н. ЯСИНСКАЯ, И. А. ПЕТЮЛЬ, К. А. ЛЕНЬКО

ВЛИЯНИЕ ПЛОЩАДИ КОНТАКТА МАТЕРИАЛОВ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТКАНЕЙ

Представлены результаты исследования влияния площади контакта материалов на статический и кинетический коэффициенты тангенциального сопротивления текстильных полотен. Результаты исследования позволят учитывать площадь контакта как фактор, который оказывает влияние на величину коэффициента тангенциального сопротивления.

В настоящее время требования к повышению качества текстильной продукции белорусского производства для внедрения на мировой рынок приводят к необходимости придания специальных свойств на этапе заключительной отделки тканей, улучшающих их потребительские и эксплуатационные характеристики. Например, обработка хлопчатобумажных и льняных тканей силиконовыми препаратами позволяет придать готовым полотнам дополнительную мягкость, шелковистость. Так, в последние годы авторами ведутся исследования по аппретированию текстильных материалов силиконовыми смягчителями и ферментсодержащими композициями, в ходе которых полотна и изделия приобретают дополнительную гладкость [1, 2].

Актуальной проблемой в настоящее время остается отсутствие регламентированных методик для определения качества проведения заключительной умягчающей отделки и сравнения степени приобретенного шелковистого грифа текстильных материалов. В текстильном материаловедении для этой цели измеряют такую силу, как сопротивление трению, возникающее при относительном перемещении в плоскости касания двух соприкасающихся тел, находящихся под действием нормальной нагрузки [3]. Трение текстильных материалов играет важную роль в технологии швейного производства и оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики этих материалов [4].

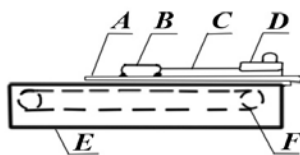
Для текстильных материалов свойственно одновременное проявление трения и цепкости. Сопротивление, возникающее при совместном проявлении трения и цепкости, называется тангенциальным сопротивлением [3]. Основной характеристикой тангенциального сопротивления является коэффициент тангенциального сопротивления [5]. Статический или начальный коэффициент тангенциального сопротивления ($f_{ст}$) связан с измеренной силой, необходимой для начала движения одной поверхности по другой. Кинетический коэффициент тангенциального сопротивления, или коэффициент трения скольжения (f_k), связан с силой, необходимой для поддержания такого движения [3]. Коэффициент тангенциального сопротивления для различных тканей варьируется в диапазоне от 0,3–1,0 [4], причем кинетический коэффициент меньше статического.

Существенное влияние на коэффициент оказывают скорость движения, волокнистый состав, плотность, переплетение, окончательная отделка изделий, температура, влажность и т. д. Также, из литературных источников [4] известно, что на показатель также сильное влияние оказывает площадь контакта материалов. Таким образом, целью данной работы является проведение исследований по определению влияния площади контакта на коэффициент тангенциального сопротивления текстильных полотен.

Существует большое число приборов и методов для определения коэффициента тангенциального сопротивления или трения. В данной работе остановимся на рассмотрении метода горизонтальной плоскости.

В качестве объекта для исследований выбрана отбеленная хлопчатобумажная ткань (арт. 857) производства ОАО «БПХО» (Республика Беларусь) постельного назначения поверхностной плотностью 134 г/м^2 . Ткань подвергли умягчению периодическим способом с применением силиконовой эмульсии при концентрациях 10, 50, 100 г/л. В качестве силиконового мягчителя применялся препарат Силикол RG-810/36+Ц300 производства ООО «Фермент» (Республика Беларусь). Силикол RG-810 – гидрофильная силиконовая эмульсия с ферментным препаратом «Целлюлаза» активностью 300 ед./г.

Подготовленные образцы испытывали на приборе FPT-F1, область применения которого распространяется на измерение коэффициентов статического и кинетического трения текстиля. На рисунке 1 представлена упрощенная схема установки, используемой для определения коэффициентов тангенциального сопротивления.



A – несущая плоскость; B – салазки; C – нейлоновая нить; D – пружинный динамометр;
E – основание; F – цепная передача с постоянной скоростью

Рисунок 1 – Установка для определения коэффициентов трения

Анализируя нормативно-техническую базу документов, устанавливающих требования к методу горизонтальной плоскости, было определено, что для полимерных пленок и писчей бумаги оптимальным вариантом колодки является квадратная пластина со стороной 65 мм и массой $m_k = 200 \pm 5 \text{ г}$ [6]. Исходя из этого в целях исследования была выбрана колодка 1 с соответствующими размерами, изготовленная из стали. Для исследования влияния площади контакта на коэффициент тангенциального сопротивления в качестве колодки была выбрана прямоугольная пластина из дюралюминия, размеры которой ($65 \times 120 \text{ мм}$) обеспечивают требуемую массу ($m_k = 200 \pm 5 \text{ г}$), которая признана оптимальной. Толщина обеих колодок составляет 6 мм. К одному концу колодок крепится рым-болт. Несущая плоскость представляла собой полированный лист из дюралюминия $120 \times 400 \times 6 \text{ мм}$. Испытуемые образцы, располагаемые на несущей плоскости, вырезали в направлении основы и утка так, чтобы их длина в этом направлении составляла 380 мм, а ширина 105 мм. Длина образца, предназначенного для фиксации на колодке, составляла 200 мм, а ширина 90 мм. С помощью односторонней липкой ленты закрепили образцы на несущей плоскости и колодке. Конец нейлоновой нити прикрепили к рым-болту колодки с закрепленным на ней образцом (рисунок 2).

Включали механизм передвижения, предварительно отрегулированный на заданную скорость. Технические характеристики прибора позволяют тестировать образцы на различных скоростях. Экспериментально установлено, что наибольшая чувствительность метода достигается при установке скорости $v = 100 \text{ мм/мин}$.

Вследствие сил трения между контактирующими поверхностями колодка и движущаяся несущая плоскость оставались неподвижными относительно друг друга до тех пор, пока сила, сдвигающая салазки, не превысила силу статического трения между поверхностями. Отметим это максимальное первоначальное значение силы как силу, являющуюся компонентом статического коэффициента трения. С помощью программного обеспечения к прибору отметили среднее значение силы при равномерном движении

поверхностей относительно друг друга на расстоянии 250 мм. Эта сила равна кинетической силе, необходимой для поддержания движения поверхностей относительно друг друга.



Рисунок 2 – Определение коэффициента тангенциального сопротивления тканей на приборе FPT-F1

Статический и кинетический коэффициент тангенциального сопротивления рассчитывали по формуле:

$$f_{\text{ст,к}} = \frac{F_{\text{ст,к}}}{m_k g} \quad (1)$$

где $F_{\text{ст}}$ – сила, соответствующая началу движения, Н; $F_{\text{к}}$ – среднее значение силы, соответствующее равномерному скольжению поверхностей относительно друг друга, Н; m_k – масса колодки, г; g – гравитационное ускорение, принимаемое равным $9,80665 \text{ м/с}^2$.

Для каждого из образцов (как по основе, так и по утку) испытание повторяли 13 раз. При этом первые 10 результатов для каждого образца не учитывали, так как из-за притирания поверхностей силы трения меняются. За конечное значение принимали среднее значение по результатам последних трех испытаний с точностью до двух значащих цифр. Гистограмма зависимости статического коэффициента тангенциального сопротивления хлопчатобумажной ткани, обработанной разными концентрациями мягчителя, от площади колодки представлена на рисунке 3. Гистограмма зависимости кинетического коэффициента тангенциального сопротивления хлопчатобумажной ткани от площади колодки представлена на рисунке 4.

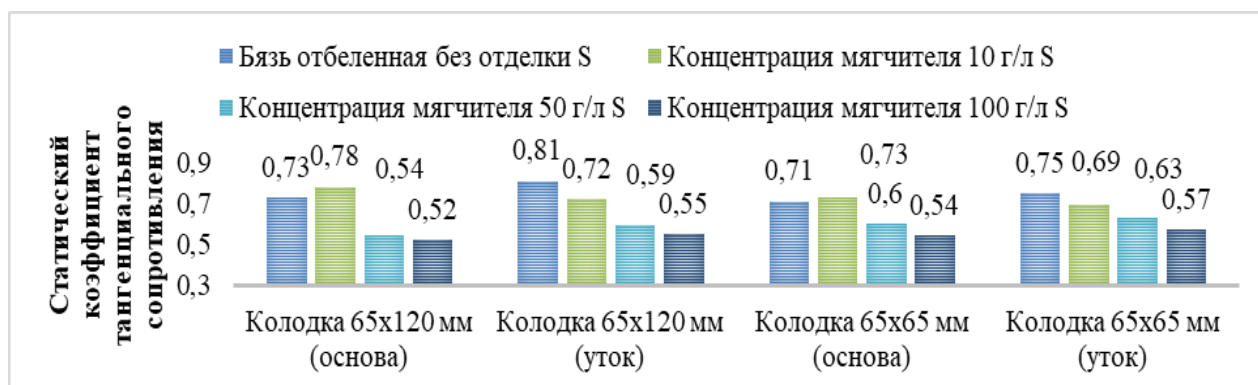


Рисунок 3 – Статический коэффициент тангенциального сопротивления при различной площади контакта текстильных материалов

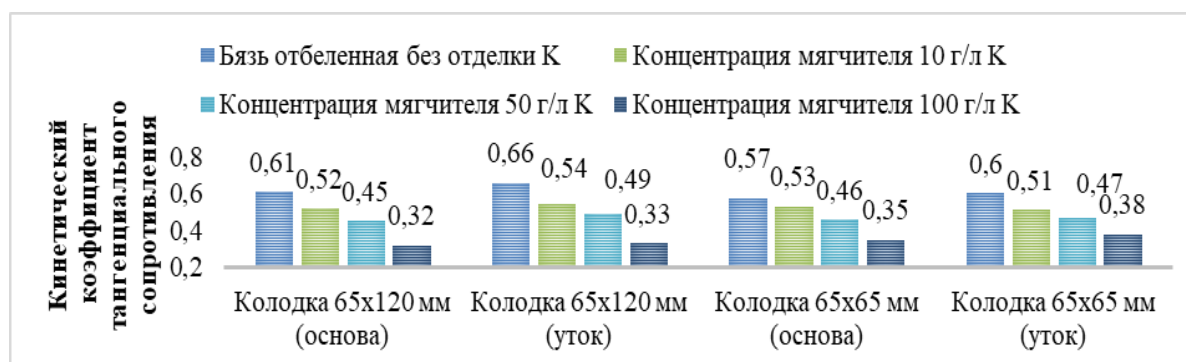


Рисунок 4 – Кинетический коэффициент тангенциального сопротивления при различной площади контакта текстильных материалов

Согласно полученным результатам испытаний, при увеличении площади контакта (увеличении площади колодки), коэффициенты тангенциального сопротивления хлопчатобумажной ткани повышаются. Для необработанных хлопчатобумажных тканей и обработанных в мягчителе рекомендуется использовать колодку размером 65×120, так как при увеличении площади контакта текстильных материалов повышается чувствительность метода, о чем свидетельствует наибольшая разность в коэффициентах тангенциального сопротивления образцов, обработанных при различных концентрациях силиконового мягчителя. Данная методика позволит определять качество проведенной заключительной умягчающей отделки текстильных материалов и сравнивать степень приобретенного шелковистого грифа.

Список литературы

1. Котко, К. А. Нетрадиционный способ придания мягкости хлопкольным махровым изделиям / К. А. Котко, Н. Н. Ясинская, Н. В. Скобова // *Материалы и технологии*. – 2020. – № 5. – С. 7–10.
2. Оценка драпируемости хлопчатобумажной ткани с использованием 3D-сканирования / К. А. Ленько [и др.] // *Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития : материалы Междунар. науч.-исслед. конф. / ОриПС ; редкол.: А. Н. Попов [и др.]*. – Оренбург, 2021. – С. 43–47.
3. Бузов, Б. А. Практикум по материаловедению швейного производства / Б. А. Бузов. – М. : Изд. центр «Академия», 2004. – 415 с.
4. Флегонтов, А. Н. Разработка методов оценки и прогнозирования тангенциального сопротивления льняных тканей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / А. Н. Флегонтов ; Костром. гос. ун-т. – Кострома, 2014. – 16 с.
5. Стельмашенко, В. И. *Материалы для одежды и конфекционирование : учеб.* / В. И. Стельмашенко, Т. В. Розаренова. – М. : Изд-во «Юрайт», 2019. – 308 с.
6. *Материалы электроизоляционные полимерные пленочные и листовые. Метод определения коэффициентов трения. ГОСТ 27492-87*. – Введ. 01.01.89. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 11 с.

The paper presents the results of a study of the influence of the contact area of materials on the static and kinetic coefficient of tangential resistance of textile fabrics. The proposed study will help to take into account the contact area as a factor that affects the value of the tangential resistance coefficient.

Марущак Юлия Игоревна, студентка 4 курса Витебского государственного технологического университета, Витебск, Республика Беларусь, tonk.00@mail.ru.

Ясинская Наталья Николаевна, доктор технических наук, доцент, Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь, yasinskayNN@rambler.ru.

Петюль Ирина Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь, petyl@inbox.ru.

Ленько Ксения Александровна, Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь, kotya240497@mail.ru.

Научные руководители – Ясинская Наталья Николаевна, доктор технических наук, доцент, Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь, yasinskayNN@rambler.ru.

Петюль Ирина Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь, petyl@inbox.ru.

УДК 620.9

Е. А. МЕШКЕВИЧ

ФОТОЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Рассмотрены основные способы использования солнечной энергии для получения электричества, способы утилизации солнечных батарей и влияние солнечных элементов на экологию.

В настоящее время развитие электроэнергетики Республики Беларусь осуществляется согласно Комплексному плану развития электроэнергетической сферы до 2025 года и на основе Отраслевой программы развития электроэнергетики на 2016–2020 годы, которой также предусмотрены меры по поддержке возобновляемой энергетики [1].

Солнечная энергетика – это отрасль науки и техники, разрабатывающая научные основы, методы и технические средства использования энергии солнечного излучения на Земле и в космосе для получения электрической, тепловой или других видов энергии и определяющая области и масштабы эффективного использования энергии Солнца в экономике страны [2].

Энергетика в современном мире является основой развития основополагающих отраслей промышленности, определяющих общий прогресс производства. Во всех промышленных развитых государствах темпы развития энергетики опережают темпы развития остальных отраслей [3].

Существуют следующие способы использования солнечной энергии для получения электричества и тепла [4]:

- Применение систем солнечных батарей и электростанций.
- Использование коллекторов, нагреваемых солнечными лучами, для использования разогретой воды в отоплении и электрогенераторов.
- Термовоздушные электростанции, преобразующие солнечную энергию для раскручивания турбогенераторов.
- Аэродинамические солнечные электростанции.

На данный момент массово используются две «солнечных» технологии – фотоэлектрические панели для генерации энергии и солнечные коллекторы для подогрева воды. Эти устройства оказывают как положительное, так и отрицательное влияние на окружающую среду, правда, последнее афишируется меньше.

Как уверяют продавцы и производители СЭС, солнечные панели вырабатывают энергию без загрязнения окружающей среды и выброса вредных веществ, однако при этом не афишируются особенности производства фотоэлектрических элементов.

Для изготовления 1 м² солнечных батарей требуется примерно 600 кВт/часов энергии, а модуль площадью 1 м² в год вырабатывает 200 кВт/часов. То есть солнечная электростанция на 1 кВт (примерно 6,5 м²) требует для своего производства 3900 кВт/час (среднегодовое потребление небольшого дома или квартиры), которые отработает только через 3 года. Более того, к примеру, солнечные электростанции китайского производства изготавливаются на заводах, подключенных к ТЭС, то есть для их производства требуются дополнительные выбросы в атмосферу.

Кроме чисто энергетических проблем также появляются экологические вопросы. При производстве кремния (основы для фотоэлектрических элементов) образуются побочные химические вещества, опасные для человека и окружающей среды. Ядохимикаты характерны и для производственного процесса свинцово-кислотных АКБ для СЭС, которые до сих пор распространены в Индии и Китае.

Все указанные выше проблемы носят технический характер и во многом зависят от государства. Если обеспечен полный цикл переработки и утилизации ядохимикатов – влияние на экосистему минимизируется в несколько раз и не идет в сравнение с ТЭС и АЭС, которые отравляют гектары земли и миллионы тонн пресной воды. Кроме того, совершенствуется и сама технология производства – те же тонкопленочные модули требуют при производстве в 10 раз меньше кремния, чем твердотельные аналоги.

Что касается того, как солнечная энергия и ее влияние проявляются при производстве энергии, то отмечается 3 отрицательных фактора:

- В местности, где работают солнечные электростанции, средняя температура ниже на 5 градусов, чем по региону, что может сказаться на растениях и частично фауне.
- СЭС требуют много земли (в 8 раз больше, чем ТЭС) на производство 1 кВт энергии, и часто это земли, на которых обитает флора и фауна. При отсутствии возможности изменить ареал некоторые виды могут пострадать.
- Электростанции-концентраторы убивают отраженными лучами птиц, что наблюдалось в Калифорнии при запуске СЭС на 320 тысяч зеркал [5].

В солнечных элементах содержатся тяжелые металлы, такие как кадмий и свинец, которые могут нанести вред окружающей среде, если не будут переработаны или утилизированы должным образом. В ближайшие десятки лет придется регламентировать процедуру утилизации солнечных панелей, иначе есть вероятность, что все будет выбрасываться просто на свалку. К 2050 году объем отходов в виде отработанных солнечных панелей составит 60–78 млн тонн, если с ним ничего не делать.

Наиболее серьезные вопросы вызывают проблемы с утилизацией, особенно панелей на базе токсичных редкоземельных элементов. Однако высокопроизводительные их варианты очень дороги и применяются в

основном в аэрокосмической промышленности. А более дешевые модули, на базе теллурида кадмия, изготавливаются преимущественно солидными американскими производителями. Эти компании известны тем, что осуществляют безопасную утилизацию старых солнечных батарей без вреда для окружающей среды, причем за свой счет.

Дополнительным плюсом следует назвать современные технологии, позволяющие повторно использовать в производстве свыше 92 % полупроводниковых материалов и 77 % стекла. Это не только пропорционально снижает экологический вред, но и удешевляет изготовление очередных поколений солнечных батарей [6].

Проблема утилизации солнечных панелей может «взорваться» с полной силой через два-три десятилетия и нанести значительный вред окружающей среде, поскольку возникнет огромное количество отходов, и их сложно перерабатывать.

Один из способов утилизации – «глубокая» переработка. В этом случае перерабатывается только стекло, алюминий и медь. Все остальные компоненты, в том числе кремний, уничтожаются.

Если говорить о «тонкой» технологии, то с ней достигается максимальный процент переработки всех компонентов солнечных модулей, включая кремниевые составляющие.

Условно процесс делится на этапы [7]:

- Отделение стекла и металлических частей, которые отправляются на переработку уже обкатанными методами и могут быть использованы для изготовления каркаса и корпуса новых модулей.
- Посредством термической обработки удаляются все пластиковые элементы.
- Соединительные компоненты вытравливаются, чтобы полностью освободить кремниевые пластины.
- Большая часть кремния переплавляется и может быть использована для производства новых ячеек.

Промышленная отрасль производства фотоэлектрических панелей и другого необходимого для СЭС оборудования действительно является экологически небезопасной. Однако измерять вред для окружающей среды любой производственной сферы следует в совокупности, учитывая полный цикл ее работы.

При таком подходе вред для экологии солнечных батарей значительно ниже, чем у станций, работающим на углеводородном, и тем более атомном топливе. А в самом ближайшем будущем гелиоэнергетика станет не только максимально безопасной, но и значительно более дешевой и доступной.

Список литературы

1. Постановление Министерства энергетики Республики Беларусь от 31.03.2016 № 8 : в ред. Постановления М-ва энергетики Респ. Беларусь от 04.09.2019 № 31 [Электронный ресурс] / М-во энергетики Респ. Беларусь, 2016. – 56 с. – Режим доступа: <https://energodoc.by/document/view?id=2944&subMenuId=681>. – Дата доступа: 11.02.2022.
2. Солнечная энергетика : учеб. пособие / В. И. Виссарионов [и др.] ; под ред. В. И. Виссарионова. – М. : Изд. дом МЭИ, 2008.
3. Экологические последствия развития солнечной энергетики [Электронный ресурс] / Н. С. Картамышева [и др.] // Технические науки: проблемы и перспективы : материалы III междунар. науч. конф., Санкт-Петербург, июль 2015 г. – СПб. : Свое издательство, 2015. – С. 59–62. – Режим доступа: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/126/8495>. – Дата доступа: 21.02.2022.
4. Вредны ли солнечные батареи? [Электронный ресурс] // Все об альтернативной энергетике. – Режим доступа: <https://tcip.ru/blog/solar-panels/vredni-li-solnechnye-batarei.html>. – Дата доступа: 21.02.2022.
5. Солнечная энергия как экологический фактор, или Как СЭС влияют на окружающую среду [Электронный ресурс] // Alternative Solution. – Режим доступа: <https://altshop.in.ua/blog/solnechnaya-energiya-kak-ekologicheskij-faktor-ili-kak-ses-vliayut-na-okruzhayuschuyu-sredu>. – Дата доступа: 21.02.2022.
6. Вред от солнечных батарей для экологии: есть ли предпосылки для такого мнения? [Электронный ресурс] // Альтернативная энергетика. – Режим доступа: <https://mywatt.ru/poleznaya-informaciya/vred-ot-solnechnyh-batarej-dlya-ekologii-est-li-predposylki-dlya-takogo-mneniya>. – Дата доступа: 22.02.2022.
7. Утилизация солнечных панелей: что включает и как обстоят дела в России [Электронный ресурс] // Сайт о солнечных батареях и ветряках. – Режим доступа: <https://nova-sun.ru/solnechnye-paneli/utilizatsiya-solnechnyh-panelej>. – Дата доступа: 22.02.2022.

The main ways of using solar energy to generate electricity, ways of recycling solar panels and the impact of solar cells on the environment are considered.

Мешкевич Екатерина Александровна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, kmeshkevich2001@gmail.com.

Научный руководитель – *Кропачева Людмила Владимировна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

М. В. ПУЗЫРЁВ, В. Ю. СТУПАКЕВИЧ, Н. И. ШУЛЬГАН

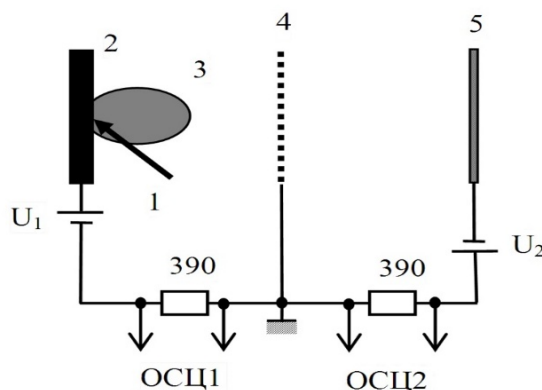
**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОМ ИСТОЧНИКЕ
ПРИ ОСАЖДЕНИИ АЛМАЗОПОДОБНОЙ УГЛЕРОДНОЙ ПЛЁНКИ**

Изучены физические процессы в лазерно-плазменном источнике, который используется для нанесения наноструктур. В работе использовался метод управления ионным и электронным потоками в эрозионной лазерной плазме. В качестве мишени использовался графит. Получена алмазоподобная углеродная пленка на кремниевой подложке.

Метод лазерно-плазменного нанесения нанопокровов обладает рядом преимуществ по сравнению с другими. И, прежде всего, возможностью получения плазмы из любого вещества в любом агрегатном состоянии и стерильностью.

Физические явления, происходящие при воздействии мощного лазерного излучения на вещества (нагрев, плавление, испарение и плазмообразование) описаны в монографиях [1–3].

Для нанесения нанопокровов достаточно воздействовать лазерным излучением на мишень и продукты разрушения в виде плазмы, распространяясь перпендикулярно к поверхности мишени, достигают поверхности подложки, расположенной на некотором расстоянии от мишени параллельно последней [4, 5].



1 – лазерное излучение; 2 – лазерная мишень; 3 – эрозионный плазменный факел; 4 – сетка; 5 – подложка; ОСЦ 1, ОСЦ 2 – сигналы, снимаемые на первый и второй канал осциллографа с сопротивлений нагрузки 390 Ом; U_1 и U_2 – независимые источники питания

Рисунок 1 – Электрическая схема эксперимента

Однако есть у этого метода и недостатки, достаточно сложные устройства плавной регулировки параметров при автоматизации режимов нанесения наноплёнок.

С целью устранения вышесказанного в [6] было предложено получать из лазерной плазмы поток ионов и плавно регулировать энергию ионов и плотность ионного потока с помощью плавного изменения потенциала электрического поля. Электрическая схема таких экспериментов представлена на рис. 1.

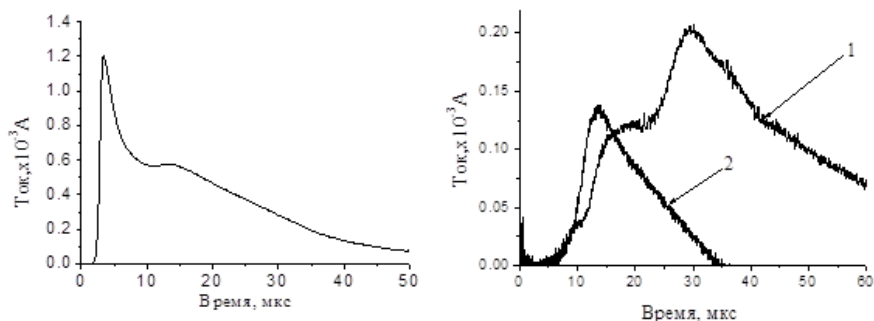
Приборы и техника эксперимента. Эксперименты проводились с помощью частотно-импульсного лазера Nd^{3+} : YAG ТП LS-2137 фирмы «Lotis» с длиной волны $\lambda = 1064$ нм и длительностью импульса на полувывоте $\tau \approx 20$ нс. Исследования проводились в вакууме при давлении остаточных газов $\sim 10^{-3}$ Па. В качестве мишени использовался пиролитический графит марки УПВ-1, для получения алмазоподобных нанопокровов. Схема установки подробно описана в [6]. В качестве подложки использовались пластины из технически чистой меди и кремния КЭФ 20. Измерения временных параметров свечения эрозионного лазерного факела производились с помощью осциллографа Tektronix TDS 2022B. Измерение толщины пленки проведены на растровом сканирующем микроскопе S-400 Hitachi (Япония).

Расстояние сетка – мишень – 2,5 см, расстояние сетка – подложка – 10 см. Общее расстояние мишень – подложка – 12,5 см. Разность потенциалов сетка – мишень 2,5 В. Разность потенциалов сетка – подложка (ускоряющий электрод) изменялось в диапазоне от 10 до 400 В. Плотность мощности лазерного излучения составляла $5 \cdot 10^8$ Вт/см².

Результаты и их обсуждение. На рис. 2а представлено изменение тока в промежутке мишень – сетка. Как видно из этого рисунка, на кривой имеется два ярко выраженных «горба». Первый определяется суммой двух токов: обратным током электронов к мишени и прямым током ионов к сетке. Второй «горб» определяется в основном током ионов к сетке. Общая форма кривой зависит только от потенциала в промежутке мишень –

сетка, а при постоянном потенциале на её форму не влияют процессы, происходящие в промежутке сетка – подложка. Это объясняется тем, что сетка заземлена.

На рис. 2б представлены кривые изменения ионного потока на различные подложки при положительном потенциале на сетке по отношению к подложке 100 В для различных подложек. Кривая тока на медную подложку (см. рис. 3) имеет несколько «горбов». Как показывают эксперименты [7], основной «горб» определяется ионами углерода однократной ионизации. Перед ним имеется ещё несколько «горбов», которые определяются более скоростными ионами большей кратности ионизации.



а – изменение тока во времени в промежутке мишень – сетка;

б – изменение тока во времени в промежутке сетка–подложка для различных материалов подложки.

Плотность мощности лазерного излучения составляла $5 \cdot 10^8$ Вт/см².

Ускоряющее напряжение между сеткой и подложкой 100В: 1 – медь, 2 – КЭФ20.

Рисунок 2

При тех же условиях ток на подложку из КЭФ20 отличается по форме и амплитуде. Для объяснения этого были проведены эксперименты по измерению средней скорости ионов в зависимости от потенциала электрического поля, приложенного к промежутку сетка – подложка для кремниевой мишени. На рис. 4 представлены результаты этих экспериментов. Как видно из этого рисунка, скорость ионов растет при увеличении потенциала до ~100 В, а дальше с увеличением потенциала рост скорости замедляется. Это можно объяснить тем, что средняя скорость ионов определялась по кривым ионного тока, а ионный ток определяется не только прямым потоком ионов на подложку, но и обратным потоком ионов за счет вторичной эмиссии, а также перезарядными токами в кремниевой подложке из КЭФ 20. Оценки реальной скорости самых быстрых ионов основного потока у поверхности подложки при потенциале в промежутке сетка – подложка 100 В дают величину ~80 км/с. Оценки по теории первичного выбивания Зигмунда [8] показывают, что при таких скоростях ионов они обладают кинетической энергией, достаточной для появления вторичной эмиссии ионов.

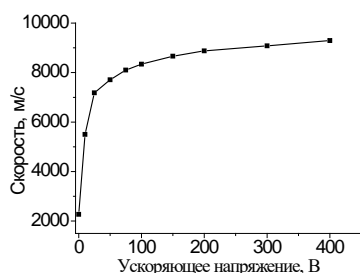
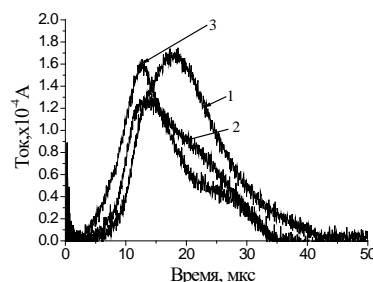


Рисунок 3 – Зависимость средней скорости частиц от разности потенциалов между сеткой и подложкой КЭФ20. Точка 0 соответствует средней скорости частиц на сетке



1 – ускоряющее напряжение 10 В; 2 – ускоряющее напряжение 100 В; 3 – ускоряющее напряжение 400 В.

Рисунок 4 – Изменение тока во времени на подложке для различных ускоряющих потенциалов между сеткой и подложкой

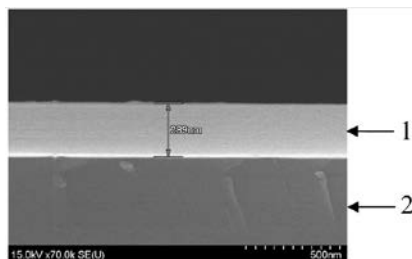
Таким образом, можно объяснить результаты экспериментов, изображенных на рис. 3 и 4. Так как атомы кремния с фосфором имеют меньшую массу, чем атомы меди, то вторичная эмиссия на кремниевой подложке выражена сильнее, чем на меди. Вследствие этого компенсация первичного тока ионов обратным током ионов вторичной эмиссии на кремниевой мишени больше.

На рис. 3 представлены изменения ионных токов на подложку КЭФ20 при различных ускоряющих потенциалах в промежутке сетка – подложка.

Кривая 1 на рис. 4 представляет собой прямой ток ионов при отсутствии вторичной эмиссии, так как ускорение ионов после сетки минимально.

При потенциале в промежутке сетка – мишень 400 В (кривая 3, рис. 4) поведение кривой ионного тока можно объяснить согласно теории Зигмунда следующим образом. Первоначально кинетическая энергия ионов максимальна, а при сечении столкновения с атомами подложки уменьшается и поэтому ионы углерода диффундируют на некоторую глубину материала мишени. С течением времени на подложку попадают ионы с меньшей кинетической энергией, и в этом случае реализуется режим травления поверхности мишени за счёт вторичной эмиссии. На кривой 3 рис. 4 это особенно видно после 20 мкс, а после 30 мкс вторичная эмиссия исчезает и происходит нанесение ионов лазерной мишени на очищенную поверхность подложки.

Как видно из рис. 4, наиболее удачным режимом для напыления углеродной пленки на поверхность кремниевой мишени является режим, отображенный на кривой 2 рис. 4. В этом режиме было произведено напыление алмазоподобной пленки на кремний КЭФ20 в течение 30 мин. Результаты эксперимента изображены на рис. 5. Как видно из этого рисунка, удалось получить равномерную достаточно толстую алмазоподобную пленку. Судя по структуре прилегающего слоя, она имеет достаточно высокую адгезию из-за того, что предварительно поверхность подложки травилась ионным потоком, формирующимся из лазерной плазмы графитовой мишени.



1 – алмазоподобная углеродная плёнка, 2 – кремниевая подложка

Рисунок 5 – Алмазоподобная углеродная плёнка на кремниевой подложке

Проведенные эксперименты позволили определить наиболее удобные условия для нанесения лазерно-плазменным методом алмазоподобных пленок. Получены однородные алмазоподобные пленки достаточно большой толщины высокой адгезии к поверхности кремниевой подложки.

Список литературы

1. Действие лазерного излучения большой мощности на металлы / С. И. Анисимов [и др.]. – М. : Наука, 1970. – 272 с.
2. Реди, Дж. Действие мощного лазерного излучения / Дж. Реди. – М. : Мир, 1974. – 468 с.
3. Goncharov, V. K. The Influence of ND Laser Irradiation Parameters on Dynamics of Metal Condensed Phase Propagating Near Target / V. K. Goncharov, K. V. Kozadaev, M. V. Puzyrev // Engineering Physics and Mechanics. – New York : Nova, 2010. – P. 441–447.
4. Pulsed Laser Deposition of Thin Films / ed. by D. B. Chrisey, G. K. Hubler. – New York : J. Wiley, 1994. – 613 p.
5. Pulsed lased deposition of diamondlike carbon films on polycarbonate / Bonelli [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2003. – Vol. 93. – P. 859–865.
6. Гончаров, В. К. Физические процессы в лазерном источнике ионов алюминия с управляемой энергией для нанесения нанопленок / В. К. Гончаров, М. В. Пузырев, В. Ю. Ступакевич // Вестн. БГУ. Физика. – 2017. – № 3. – С. 79–87.
7. Гончаров, В. К. Динамика свечения спектральных линий углерода лазерной плазмы в вакууме / В. К. Гончаров, М. В. Пузырев, В. Ю. Ступакевич // Современные средства диагностики плазмы и их применение : материалы X конф., Москва, 14–16 нояб. 2016 г. / НИЯУ МИФИ ; редкол.: В. А. Курнаев [и др.]. – М., 2016. – С. 126–129.
8. Зигмунд, П. Распыление ионной бомбардировкой / П. Зигмунд ; под ред. Р. Бериша // Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. – М. : Мир, 1984. – С. 55, 75.

The physical processes in a laser-plasma source, which is used to deposit nanostructures, have been studied. We used the method of controlling ion and electron flows in an erosive laser plasma. Graphite was used as a target. A diamond-like carbon film on a silicon substrate has been obtained.

Пузырёв Михаил Валентинович, кандидат физико-математических наук, доцент, Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ, Минск, Республика Беларусь, puzyrev@bsu.by.

Ступакевич Валерий Юзефович, ст. преподаватель кафедры информационных систем и технологий Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, tv_sad@grsu.by.

Шульган Никита Игоревич, студент факультета радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, nikita.shulgan@gmail.com.

Научный руководитель – *Пузырев Михаил Валентинович*, кандидат физико-математических наук, доцент, Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ, Минск, Республика Беларусь, puzyrev@bsu.by.

К. К. САВВА, П. Р. МАКЕЙ

ПРЕЦИЗИОННЫЙ DDS-ГЕНЕРАТОР СИНУСОИДАЛЬНОГО СИГНАЛА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА

Рассмотрен разработанный авторами блок управления лабораторно-демонстрационной установкой, созданный в рамках проекта «Разработка и изготовление унифицированных установок для лабораторного практикума и демонстраций по общей физике (колебания, электричество и магнетизм)» и реализующий функции DDS-генератора с милливольтметром переменного тока.

Основные характеристики разработанного устройства: частота формируемого синусоидального сигнала – 1–5000 Гц с точностью 0,01 Гц; диапазон измерения переменного напряжения частотой 0–5 кГц – от 0 В до 1000 мВ с точностью 1 мВ.

Блок-схема устройства представлена на рис. 1. В качестве основы схемы использован микроконтроллер (МК) Atmega8A [1] со встроенным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), работающий на тактовой частоте 16 МГц.

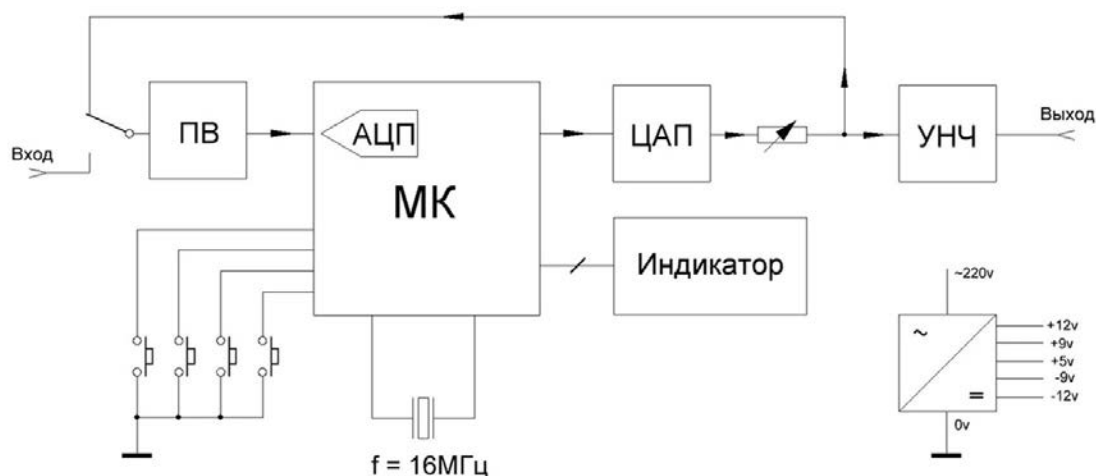


Рисунок 1 – Блок-схема DDS-генератора

Для управления прибором использованы 4 кнопки и двухстрочный алфавитно-цифровой жидкокристаллический индикатор типа 1602. Формирование выходного синусоидального сигнала осуществляется методом прямого цифрового синтеза с применением 8-разрядного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), построенного на основе R-2R матрицы на дискретных резисторах сопротивлением 10 кОм и 20 кОм.

Выход ЦАП буферизирован схемой повторителя, сигнал с которого поступает на регулятор амплитуды и, далее, на выходной усилитель низкой частоты, построенный на основе интегральной микросхемы TDA2030 [2] в типовом включении. Применение мощного УНЧ обусловлено необходимостью работы генератора на низкоомную (4–30 Ом) нагрузку, в качестве которой используется катушка, приводящая в движение маятник на основе системы пружин и постоянного магнита.

Милливольтметр реализован с использованием встроенного в МК 10-битного АЦП и схемы прецизионного выпрямителя (ПВ) [3], собранной на основе операционного усилителя LM358 [4].

Устройство включает в себя источник питания, формирующий двуполярные напряжения ± 9 В и ± 12 В, необходимые для питания аналоговой части, а также канал с напряжением +5 В, питающий цифровые узлы прибора.

Генератор выполнен на одной печатной плате, размещенной в корпусе размером 260×180×65 мм. Всего изготовлено пять описанных устройств, планируемых к использованию в составе лабораторных установок для изучения колебаний.

Список литературы

1. ATmega8A datasheet [Электронный ресурс] / Microchip Technology comp. – 2018. – Режим доступа: <https://www.microchip.com/wwwproducts/products/ATmega8A>. – Дата доступа: 12.09.2021.
2. TDA2030 datasheet [Электронный ресурс] / alldatashit.com. – 2017. – Режим доступа: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/25043/STMICROELECTRONICS/TDA2030.html>. – Дата доступа: 12.09.2021.

3. Прецизионные выпрямители на ОУ [Электронный ресурс] / nauchebe.net. – 2014–2021. – Режим доступа: <http://nauchebe.net/2014/06/precizionnye-vupryamiteli-na-ou-v-ustrojstvax-na-mikrosxemax>. – Дата доступа: 29.06.2021.

4. Lm358 datasheet [Электронный ресурс] / alldatasheet.com. – 2017. – Режим доступа: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/3067/MOTOROLA/LM358/256/1/LM358.html>. – Дата доступа: 12.09.2021.

The paper presents a brief description of the device of a laboratory dds-generator designed for research and laboratory classes at the university.

Савва Корней Константинович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, 2518korney@gmail.com.

Макей Прохор Романович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, prohormakey123@gmail.com.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, german@grsu.by.

УДК 004, 517

Е. О. САКОВИЧ

АНАЛИЗ ЭКГ В MATLAB

Проводится обработка сигнала электрокардиограммы в программной среде MATLAB для упрощения их анализа. Данные для обработки сигнала взяты приблизительно, опираясь на реальные медицинские данные.

Электрокардиограмма, или ЭКГ, – современный способ диагностики, который показывает наличие заболеваний сердца различной степени тяжести – от аритмий до инфаркта. Во время исследований на кардиографе происходит графическая запись сердечных импульсов, по которым врач может определить возможные отклонения в работе органа.

Графическое отображение сердечных сокращений представляет собой ломаную линию. Каждый ее элемент показывает состояние органа, дает характеристику деятельности определенным отделам сердца. Сейчас в лечебных учреждениях кардиограмма сердца производится на высокочастотных кардиографах.

У человека сигнал ЭКГ – очень слабый физиологический низкочастотный электрический сигнал, максимальная амплитуда которого обычно не превышает 5 мВ, а частота сигнала составляет от 0,05 до 100 Гц. Сигнал ЭКГ улавливается электродами, установленными на поверхности кожи человека. Из-за явления поляризации между электродом и тканью кожи это вызывает серьезные помехи для сигнала ЭКГ. Кроме того, человеческое тело – сложная жизненная система, и существуют прочие физиологические сигналы, мешающие сигналам ЭКГ. А так как сигнал ЭКГ имеет характеристики слабого, низкочастотного, высокого импеданса и т. д., он является чрезвычайно чувствительным к помехам.

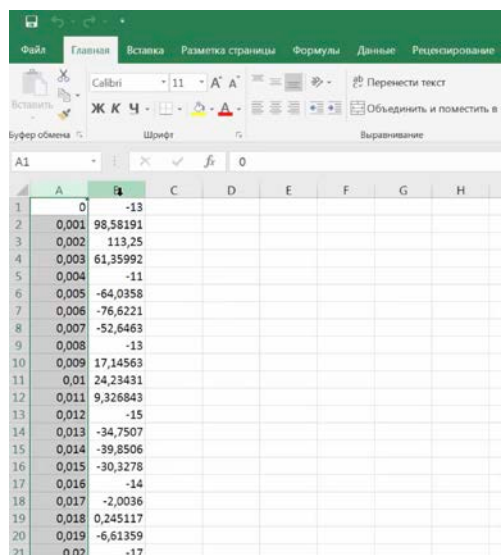
В итоге, сигнал ЭКГ – слабый, типичное значение которого составляет всего 1 Мв, с низким частотным диапазоном, сосредоточенным около 20 Гц, с регулярной нестабильностью, т. к. на сигнал влияют даже внутренние органы человеческого тела, а также положение сердца, дыхание, возраст, регулярность его тренировок. Также внешние помехи при измерении сигнала крайне сильные, и различные шумы могут возникнуть из-за помех промышленной частоты, шума контакта электродов, артефактов движения самого человека, электромиографического шума, дрейфа базовой линии и изменений амплитуды ЭКГ, вызванных дыханием, а также машинного шума от другого электронного оборудования и многих других аспектов.

Первоочередная задача – предобработка загруженных данных. Важно проанализировать форму электрокардиограммы, понять расстояние между отдельными зубцами, оценить их высоту, но вид доставшегося сигнала не совсем позволяет это сделать.

Исходные данные, они же значения кардиограммы, хранятся в Excel файле, где первый столбец – это значение времени, а второй – значение напряжения.

Для импортирования этого файла в среду MATLAB необходимо использовать инструмент Import Tool, который позволяет численные данные из Excel файла импортировать в MATLAB в виде векторов и столбцов. При импортировании мы выбираем то, что мы импортируем Column vectors, то есть вектора-столбцы, и при нажатии кнопки Import selection в рабочем пространстве появятся две, указанные при импорте с Excel файла, переменные, в данном случае – переменные t и sig, первый и второй столбец соответственно.

Чтобы визуализировать и обработать данный сигнал, необходимо открыть инструмент Signal Analyzer. Загрузив сигнал sig для визуализации его во временной области, можно для удобства настроить его цвет и задать временные значения.



	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0	-13						
2	0,001	98,58191						
3	0,002	113,25						
4	0,003	61,35992						
5	0,004	-11						
6	0,005	-64,0358						
7	0,006	-76,6221						
8	0,007	-52,6463						
9	0,008	-13						
10	0,009	17,14563						
11	0,01	24,23431						
12	0,011	9,326843						
13	0,012	-15						
14	0,013	-34,7507						
15	0,014	-39,8506						
16	0,015	-30,3278						
17	0,016	-14						
18	0,017	-2,0036						
19	0,018	0,245117						
20	0,019	-6,61359						
21	0,02	-17						

Рисунок 1 – Данные ЭКГ, находящиеся в файле Excel

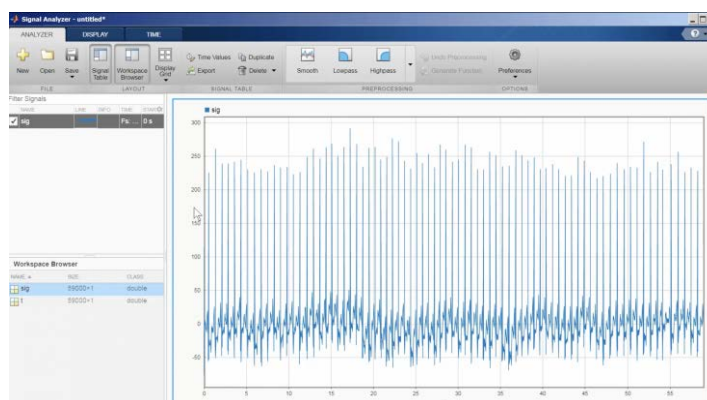


Рисунок 2 – Необработанный сигнал в инструменте Signal Analyzer

На рисунке 2 можно увидеть, что сигнал нестабилен, и, скажем, плавает во времени, потому что у него есть постоянная составляющая, мешающая оценить высоты отдельных зубцов. Далее для дальнейшей работы с сигналом создается копия сигнала sig, с названием sig_copy, цвет которого будет изменен на более контрастный. Теперь можно воспользоваться фильтром верхних частот, он же инструмент Highpass Filter, чтобы пропустить спектральные компоненты выше 5 Гц. Это уберет постоянную составляющую. Теперь можно сравнить результаты операции во временной оси и увидеть, что постоянная составляющая действительно пропала. Далее можно приблизить определенную область сигнала для удобства перемещения во временной оси, воспользовавшись инструментом Panper.

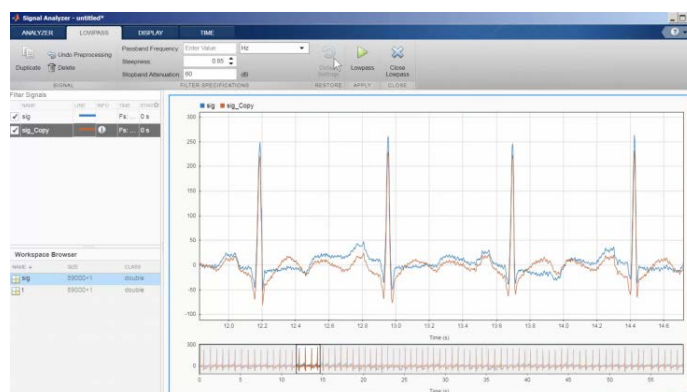


Рисунок 3 – Приблизённая область сигнала

Приблизив, можно хорошо увидеть наличие некоего высокочастотного дрожания сигнала, поэтому теперь необходимо воспользоваться инструментом Lowpass, то есть фильтром нижних частот. Подавив все частоты выше 10 Гц, мы еще более сгладим сигнал. На нем гораздо проще оценить расстояние между отдельными зубцами. Далее его можно экспортировать обратно в рабочее пространство MATLAB. Таким образом, сигнал ЭКГ импортирован и обработан успешно.

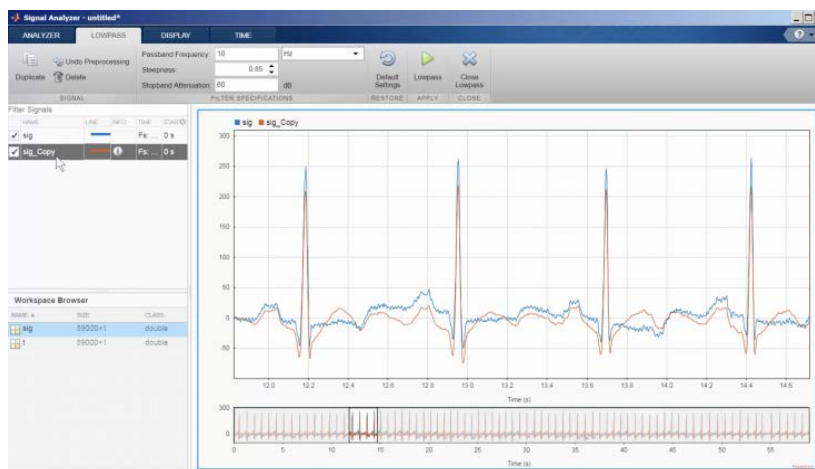


Рисунок 4 – Окончательный результат и различие между изначальным и обработанным сигналом

Список литературы

1. Кубланов, В. С. Анализ биомедицинских сигналов в среде MATLAB / В. С. Кубланов, В. И. Борисов, А. Ю. Долганов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. гос. ун-та, 2016. – 120 с.
2. Лайонс, Ричард. Цифровая обработка сигналов / Ричард Лайонс. – М. : Изд-во «БЕК», 2006.

The electrocardiogram signal is processed in the MATLAB software environment to simplify their analysis. Data for signal processing is approximate, based on real medical data.

Сакович Егор Олегович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, egoriger@mail.ru.

Научный руководитель – *Ассанович Борис Алиевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, bas@grsu.by.

УДК 533.924

О. И. ТИХОН, А. С. БОНДАРЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН В РЕАКЦИОННО-РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЕ СВЧ ПЛАЗМОТРОНА РЕЗОНАТОРНОГО ТИПА

Представлены результаты изучения особенностей нагрева кремниевых пластин в реакционно-разрядной камере СВЧ плазмотрона резонаторного типа СВЧ энергией, при прямом воздействии на поверхность плазмой и при изоляции пластин от газового разряда. Показано, что в случае обработки пластин в плазменном объеме СВЧ разряда основной вклад в температуру поверхности кремниевых пластин вносит передача тепла СВЧ излучением.

Высокая степень ионизации и плотность плазмы СВЧ разряда обусловила её применение для реализации множества технологических процессов промышленного производства изделий интегральной микро- и нанoeлектроники. Среди методов выполнения операций обработки полупроводниковых материалов выделяются как предусматривающие непосредственное воздействие плазмы на образец за счёт частичного заполнения рабочего реакционного объема устройства генерации СВЧ разряда, так и с отделением зоны плазмообразования и переносом активных частиц в рабочую зону. Энергозависимость процессов взаимодействия активных частиц с поверхностью обрабатываемого материала обуславливает наличие факторов, оказывающих влияние на скорость их протекания. В случае выполнения операций газового травления или удаления фоторезистивного материала с поверхности полупроводниковой пластины, реализуемых в объеме СВЧ разряда, отдельно выделяется зависимость от величины потока травящих частиц к поверхности и её температуры.

Рассматривая условия проведения операции СВЧ плазмохимического удаления фоторезистивных покрытий с поверхности кремниевых пластин, реализуемого внутри реакционно-разрядного объема СВЧ плазмотрона резонаторного типа, следует учитывать некоторые особенности возбуждения и поддержания СВЧ разряда. В частности, при формировании газового разряда часть СВЧ энергии, проникающей внутрь объемной плазмы, обеспечивает разогрев полупроводниковой пластины. Рост температуры материала связан со способностью кремния хорошо поглощать СВЧ энергию за счёт высокого значения его тангенса угла диэлектрических потерь. Комплексный показатель температуры кремниевой пластины в процессе СВЧ плазменной обработки, таким образом, обуславливается рядом составляющих теплового потока: описанной выше передачей тепла в пластину непосредственно электромагнитными волнами; конвективным теплообменом между пластиной и окружающей её плазмой с собственным значением газовой температуры; теплом, излучаемым и поглощаемым поверхностью пластины; теплопроводностью внутри пластины [1]. Так как значение температуры пластины оказывает существенное влияние на скорость проведения операции удаления слоя фоторезиста [2] актуальными задачами являются управление нагревом при СВЧ плазменной обработке и исследование возможности реализации разогрева пластины до начала процесса плазмообразования без использования специальных нагревательных элементов.

Целью исследования являлось определение влияния контакта плазмы с поверхностью кремниевых пластин на температуру нагрева в объеме СВЧ разряда и оценка интенсивности разогрева при бесплазменной обработке.

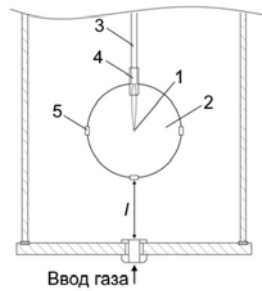
Для проведения экспериментов была использована СВЧ вакуумно-плазменная установка резонаторного типа. Источником энергии для процесса плазмообразования выступал малогабаритный СВЧ магнетрон средней мощности 2М261-М22. Питание магнетрона осуществлялось разработанным трёхфазным импульсным источником питания, обеспечивающим возможность выбора режима генерации и величины подводимой к СВЧ разряду мощности [3]. В качестве рабочего газа при формировании СВЧ разряда использовался атмосферный воздух, величина давления в разрядной камере составляла 133 Па.

Измерение температуры нагрева полупроводниковых пластин выполнялось с использованием контактного метода. Схема проведения измерений представлена на рисунке 1. Термоэлектрическим преобразователем при проведении экспериментов являлась хромель-алюмелевая термопара 1, регистрация показаний которой осуществлялась с помощью универсального мультиметра. Термопара была пропущена через керамическую вакуумно уплотнённую трубку-держатель 3, которая была введена в резонирующий объём через герметичный ввод в задней крышке камеры. Контактный спай термопары размещался между двумя кремниевыми пластинами 2 диаметром 100 мм. С помощью фторопластовых держателя 4 и зажимов 5 термопара плотно удерживалась в центральной области пластин.

Были проведены три серии экспериментов – измерение температуры при прямом воздействии плазменного СВЧ разряда на поверхность кремниевых пластин; при отсутствии контакта плазма-пластина за счёт использования изоляционного материала; при нагреве СВЧ энергией без возбуждения СВЧ разряда. Исследуемые пластины располагались в центральной области реакционно-разрядного объема СВЧ плазменной установки на расстоянии 100 мм от передней стенки камеры. Температура регистрировалась через 10 секунд после подачи питания на СВЧ магнетрон. Генерация энергии осуществлялась в импульсном режиме со скважностью сигнала анодного тока ~2, обеспечиваемом работой одного блока инвертора источника питания, на четырёх значениях потребляемой от сети мощности в диапазоне 570–1860 Вт. Полученные экспериментальные результаты представлены на рисунке 2.

Представленные графические зависимости показывают, что при низком значении потребляемой магнетроном мощности для всех режимов проведения экспериментов степень нагрева кремниевых пластин отличается незначительно. Увеличение мощности приводит к росту скорости нагрева пластин для случаев прямого воздействия плазмы на его поверхность и СВЧ нагрева без возбуждения газового разряда. При больших значениях мощности в исследуемом диапазоне (1365 Вт и 1860 Вт) влияние окружающей кремниевую пластину СВЧ плазмы с собственным значением газовой температуры показывает скорость разогрева выше по сравнению с показаниями для изолированных пластин. Более высокий уровень температуры связан с дополнительным компонентом теплообмена за счёт взаимодействия СВЧ энергия – плазма – поверхность пластины. Случай СВЧ нагрева пластин в отсутствие такого взаимодействия показывает закономерно значительно более высокую скорость разогрева по причине поглощения кремнием большей части вводимой в объём резонатора электромагнитной энергии.

Анализ полученных экспериментальных данных, таким образом, показывает, что в случае обработки пластин в объеме плазмы СВЧ разряда основной вклад в температуру поверхности кремниевой пластины вносит передача тепла СВЧ излучением. Конвективный теплообмен с плазмой влияет на температуру в заметно меньшей степени. Значительные скорости СВЧ нагрева без возбуждения разряда позволяют рассмотреть возможность реализации процесса управляемого быстрого предварительного нагрева полупроводниковых пластин энергией СВЧ поля перед плазмохимической обработкой в плазмотроне резонаторного типа.



- 1 – термопара; 2 – Si пластины;
3 – керамическая трубка-держатель;
4 – фторопластовый держатель;
5 – фторопластовый зажим

Рисунок 1 – Схема методики измерения температуры нагрева кремниевых пластин диаметром 100 мм

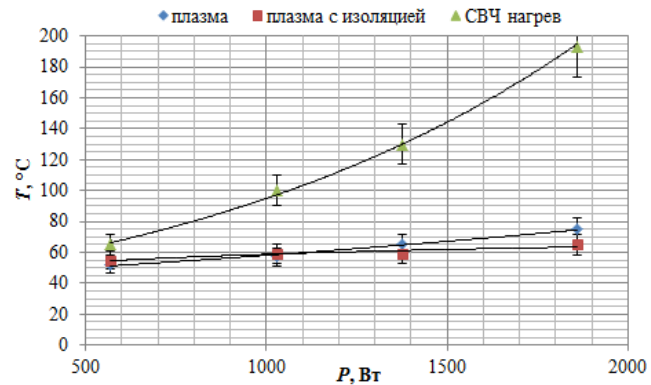


Рисунок 2 – Зависимость температуры кремниевых пластин от значения потребляемой СВЧ генератором мощности после 10 секунд обработки при различных условиях воздействия СВЧ энергии на поверхность

Список литературы

1. Zhang, S.-L. Rapid thermal processing with microwave heating / S.-L. Zhang, R. Buchta, D. Sigurd // Thin Solid Films. – 1994. – Vol. 246, № 1–2. – P. 151–157.
2. Плазменные процессы в производстве электронной техники : в 3 т. / А. П. Достанко [и др.] ; под общ. ред. А. П. Достанко. – Минск : ФУАинформ, 2001. – Т. 3. – 244 с.
3. Исследование характера изменения величины СВЧ мощности в плазменном объеме при квазипостоянном режиме её генерации / О. И. Тихон [и др.] // Приборостроение – 2021 : материалы XIV междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–19 нояб. 2021 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 357–358.

The results of studying the features of silicon wafers heating in the reaction-discharge chamber of a microwave resonator-type plasmatron by microwave energy, by direct exposure of the surface to plasma and with isolation of the wafers from a gas discharge, are presented. It is shown that in the case of wafer processing in the plasma volume of a microwave discharge, the main contribution to the surface temperature of silicon wafers is made by microwave radiation heat transfer.

Тихон Олег Игоревич, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, kritgar@bsuir.by.

Бондаренко Анна Сергеевна, магистрант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, ajph8802@gmail.com.

Научный руководитель – *Мадвейко Сергей Игоревич*, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, madveyko@bsuir.by.

СЕКЦИЯ 4. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 37.016:53

А. В. ГАЙДУКЕВИЧ

РЕШЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ МЕТОДОМ РАЗМЕРНОСТЕЙ

Раскрыта значимость метода размерностей в процессе обучения физике, а также сущность метода размерностей при решении физических задач. Представлено подробное решение задачи на определение энергии гравитационного взаимодействия двух точечных масс через метод размерностей.

Анализ размерностей применяется в физике еще со времен Ньютона. Именно Ньютон сформулировал тесно связанный с методом размерностей принцип подобия. Принцип подобия, сформулированный Ньютоном, заключается в том, что отношение v^2/S прямо пропорционально отношению F/m . Хотя метод размерностей был по существу введен уже при построении основ классической механики, его эффективное применение для решения физических задач началось в конце XIX – в начале XX века. Большая заслуга в пропаганде этого метода и решении с его помощью ряда интересных и важных задач принадлежит выдающемуся физiku Джону Вильяму Стрэтту (лорду Рэлею). В 1915 году Рэлей писал: «Я часто удивляюсь тому незначительному вниманию, которое уделяется великому принципу подобия даже со стороны весьма крупных ученых. Нередко случается, что результаты кропотливых исследований преподносятся как вновь открытые «законы», которые, тем не менее, можно было получить априорно в течение нескольких минут».

Одним из общих методов решения является решение задач методом размерности. Метод размерностей может быть использован для получения аналитических зависимостей между физическими величинами, описывающими физическое явление или процесс, и проведения численных оценок. С помощью метода размерностей также можно получать численные оценки исследуемых величин, отталкиваясь от того обстоятельства, что коэффициенты пропорциональности в получаемых аналитических зависимостях имеют величину порядка единицы.

Анализ размерностей при решении задач широко используется в научных исследованиях. Суть данного метода заключается в том, что искомая закономерность может быть представлена в виде произведения степенных функций физических величин, от которых зависит искомая характеристика. Важным моментом в решении является нахождение этих величин. Анализ размерностей левой и правой частей соотношения позволяет определить аналитическую зависимость с точностью до постоянного множителя.

Рассмотрим задачу, на примере решения которой продемонстрируем суть метода размерностей.

Определим энергию гравитационного взаимодействия двух точечных масс m_1 и m_2 , находящихся на расстоянии r друг от друга.

Кроме метода анализа размерностей, дополним решение задачи принципом симметрии входящих величин. Соображения симметрии дают основания считать, что энергия взаимодействия должна зависеть от m_1 и m_2 одинаковым образом, то есть в окончательное выражение они должны войти в одинаковой степени:

$$W = G^a m_1^b m_2^b r^c \quad (1)$$

Необходимо проанализировать размерности физических величин, входящих в уравнение (1):

$$[W] = \text{Дж} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2 = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2},$$

$$[G^a] = (\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2})^a = \text{м}^{3a} \cdot \text{кг}^{-a} \cdot \text{с}^{-2a},$$

$$[m_1^b] = \text{кг}^b,$$

$$[m_2^b] = \text{кг}^b,$$

$$[r^c] = \text{м}^c.$$

Необходимо подставить полученные размерности в уравнение (1):

$$\begin{aligned} \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} &= \text{м}^{3a} \cdot \text{кг}^{-a} \cdot \text{с}^{-2a} \cdot \text{кг}^b \cdot \text{кг}^b \cdot \text{м}^c; \\ \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} &= \text{кг}^{-a+2b} \cdot \text{м}^{3a+c} \cdot \text{с}^{-2a}. \end{aligned}$$

Необходимо сравнить показатели степеней в обеих частях последнего уравнения:

$$\begin{aligned} -a + 2b &= 1, \\ 3a + c &= 2, \\ -2a &= -2. \end{aligned}$$

Решая данную систему уравнений, получаем: $a = 1$; $b = 1$; $c = -1$. Следовательно, уравнение принимает следующий вид:

$$W = G \frac{m_1 m_2}{r}.$$

Таким образом, решение задач методом размерностей является дополнительным методом, позволяющим лучше понять взаимодействие величин, их влияние друг на друга. Данный метод может быть использован в случае, если искомая величина может быть представлена в виде степенной функции. В некоторых случаях метод размерностей является единственным способом решить задачу и позволяет хотя бы оценить ответ.

The significance of the method of dimensions in the process of teaching physics, as well as the essence of the method of dimensions in solving physical problems, is revealed. A detailed solution of the problem of determining the energy of the gravitational interaction of two point masses through the method of dimensions is presented.

Гайдукевич Анна Викторовна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, ануа-gaydukevich@mail.ru.

Научный руководитель – *Харазян Оксана Гагиковна*, кандидат педагогических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, kharazian.og@gmail.com.

УДК 372.853

В. И. ГЛЕБОВИЧ

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ ПО РАБОТЕ С ГРАФИКАМИ В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ ФИЗИКЕ

Представлена авторская классификация качественных задач по физике с графическим содержанием и методические рекомендации по использованию таких задач в процессе обучения физике. Приведены количественные задачи, для решения которых необходимо использовать графический метод. Описаны предметные и межпредметные компетенции, формируемые при решении задач графическим методом или качественных задач по физике с графическим содержанием.

Одним из способов визуализации учебного материала в процессе обучения физике является использование графиков зависимости физических величин. Графическое представление физических законов и процессов позволяет наглядно представить зависимость, что в свою очередь, дает возможность учащимся лучше понять материал и углубить свои знания. Использовать графики необходимо в комплексе на всех этапах учебного процесса.

В процессе обучения физике основным способом закрепления и применения полученных знаний является решение задач. В методической литературе задачи по физике разделяют на качественные, количественные (или расчетные) и экспериментальные. Большую педагогическую ценность имеют именно качественные задачи, поскольку с их помощью можно выявить уровень усвоения знаний и глубину понимания учащимися физических процессов и законов. В отдельную группу качественных задач можно выделить задачи, в которых основное внимание уделяется графикам зависимости физических величин.

Качественные задачи по физике с графическим содержанием можно разделить на два класса в зависимости от того, что требуется выполнить в ходе решения задачи: интерпретировать имеющийся в условии график или построить график зависимости физических величин. В свою очередь, задачи на интерпретацию графика по способу представления результатов можно разделить на три типа:

1. Задачи на аналитическую интерпретацию графика.
2. Задачи на вербальную интерпретацию графика.
3. Задачи на количественную интерпретацию графика.

Задачи на построение графиков зависимости физических величин можно разделить на два типа.

1. *Задачи на построение графика функции по заданному условию.*
2. *Задачи на перестроение заданного графика функции* [1].

Решение качественных задач с графическим содержанием может быть организовано на всех этапах процесса обучения физике (таблица 1). Каждый из типов задач, представленных в классификации, находит свое применение на определенных этапах урока и позволяет решить дидактические задачи конкретного этапа учебного занятия [1].

Таблица 1 – Рекомендации по использованию качественных задач с графическим содержанием в процессе обучения физике

Этап урока (учебного процесса)	Виды качественных графических задач
Актуализация опорных знаний	Задачи на сравнение графиков зависимостей физических величин и на построение графика функции по вербальному описанию физического процесса.
Изучение нового учебного материала	Задачи на описание этапов физического процесса и на построение графика функции по табличным данным.
Первичное закрепление изученного материала	Задачи на характеристику условий протекания явления или процесса и на построение графика по заданной функции.
Повторение и закрепление учебного материала	Задачи на запись функциональной зависимости с числовыми значениями коэффициентов и на перестроение графика с учетом заданных условий.
Контроль знаний	Задачи на запись функциональной зависимости с числовыми значениями коэффициентов и на перестроение графика в других координатных осях.
Систематизация и обобщение знаний	Задачи на запись функциональной зависимости в общем виде и на сравнение графиков зависимостей физических величин.
Выполнение домашнего задания	Задачи на построение графика функции по табличным данным и на построение графика функции по вербальному описанию физического процесса.
Подготовка к решению вычислительных задач	Задачи на непосредственное определение по графику значений неизвестных физических величин и на косвенное определение по графику значений неизвестных физических величин.

Еще одним видом задач по физике являются количественные или расчетные задачи. Кроме общего и частных алгоритмов решения таких задач, необходимо овладеть ещё одним «инструментом», применение которого, позволит успешно решать физические задачи различных типов и уровней сложности. Таким «инструментом» являются методы решения задач.

Одним из важных методов решения физических задач является графический метод. Значение данного метода для решения физических задач определяется рядом причин. *Во-первых*, математическая форма записи законов физики представляет собой функциональную зависимость между физическими величинами, следовательно, физические закономерности можно представить в форме графика функции. Такое представление закономерностей является наглядным и удобным для анализа описанной в условии задачи физической ситуации, а также для выполнения её требований. *Во-вторых*, для расчета некоторых физических величин необходимо выполнить операцию интегрирования. Поскольку в школьном курсе математики не изучают понятие интеграла, то при решении задач можно от операции интегрирования перейти к операции суммирования, то есть определению площади под графиком функции [2].

Задачи, для решения которых необходимо использовать графический метод, можно разделить на четыре типа.

Первый тип задач. Задачи, в условии которых значение одной (или нескольких) из физических величин задано в графической форме. Для выполнения основных расчётов задачи необходимо из предложенного графика определить значение неизвестной величины. Таким образом, работа с графиком выступает как промежуточный этап решения задачи.

Второй тип задач. Задачи, основным требованием которых является построение графика зависимости указанных физических величин. Решение данного типа задач сводится к выводу формулы, выражающей искомую зависимость физических величин, в построении и анализе графика полученной зависимости.

Третий тип задач. Задачи, в условии которых задан график, отражающий некоторый физический процесс. Для решения данного типа задач, необходимо проанализировать имеющийся график, иногда необходимо его перестроить в других координатах, затем определить по графику неизвестные физические величины или формулу для их вычисления. Таким образом, это задачи, все условие которых задано в графической форме.

Четвертый тип задач. Задачи, для решения которых необходимо построить график зависимости физических величин, отражающий описанный в условии задачи физический процесс. Предварительно для построения графика необходимо вывести формулу, выражающую зависимость физических величин. Затем необходимо по графику определить неизвестные физические величины или формулу для их вычисления [2].

Решение задач графическим методом или качественных задач с графическим содержанием позволяет сформировать определенные предметные компетенции по физике, а также межпредметные компетенции по физике и математике (таблица 2).

Таблица 2 – Предметные и межпредметные компетенции, формируемые при решении качественных задач по физике с графическим содержанием

Предметные компетенции по физике	Межпредметные компетенции по физике и математике
<i>1. Задачи на аналитическую интерпретацию графика.</i>	
Знания характера зависимости физических величин.	Умения представлять графическую информацию в аналитической форме, устанавливать соответствие между графиком функции и характером зависимости физических величин, определять из графика точные значения физических величин.
<i>2. Задачи на вербальную интерпретацию графика.</i>	
Умения применять законы физики для описания процессов (явлений) на качественном уровне, описывать физическое явление (процесс), сравнивать условия и характеристики протекания физических явлений и процессов.	Умения исследовать графики функций, то есть определять: область определения функции, область значений функции, нули функции, промежутки возрастания и убывания, точки максимума и минимума, наибольшее и наименьшее значение функции на отрезке и их физический смысл, умение определять площадь фигуры под графиком функции и ее физическое значение. Знание физического смысла угла наклона графика функции, точек перегиба точек пересечения с осями координат.
<i>3. Задачи на количественную интерпретацию графика.</i>	
Знание и понимание сущности физических законов, их математической записи.	Умения исследовать графики зависимости физических величин, определять точные значения физических величин с учетом заданных условий и масштаба графика, определять площадь фигуры под графиком функции и ее физический смысл.
<i>4. Задачи на построение графика функции по заданному условию.</i>	
Умения представлять и обрабатывать результаты наблюдений и измерений с помощью таблиц и графиков	Умения строить график зависимости физических величин по данным, представленным в табличной форме
Умения представлять физические закономерности в графической форме	Умения строить график зависимости физических величин по заданной функции, определять характер функциональной зависимости.
Умения представлять словесную информацию о физическом процессе в аналитической, а затем в графической форме.	Умения строить график зависимости физических величин.
<i>5. Задачи на перестроение заданного графика функции.</i>	
Знания закономерностей взаимосвязи физических величин.	Умения применять формы записи функции для построения графиков зависимостей физических величин, знания о влиянии числовых коэффициентов функции на внешний вид графика зависимости.

Таким образом, решение качественных задач с графическим содержанием и решение количественных задач графическим методом позволяет сформировать предметные и межпредметные компетенции по физике. Предметные компетенции по физике позволяют изучать и представлять физические закономерности в графической форме. Межпредметные компетенции связаны с умениями экстраполировать знания по математике о функциях и их свойствах на область физики (таблица 2).

Список литературы

1. Глебович, В. И. Методические основы использования качественных задач с графическим содержанием в процессе обучения физике / В. И. Глебович // Вестник образования. – 2021. – № 7. – С. 32–43.
2. Харазян, О. Г. Методические основы обучения графическому методу решения физических задач / О. Г. Харазян, В. И. Глебович // Вести БГПУ. Сер. 3, Физика. Математика. Информатика. Биология. География. – 2020. – № 4. – С. 45–52.

The article presents the author's classification of qualitative problems in physics with graphic content and methodological recommendations for the use of such problems in the process of teaching physics. Quantitative tasks are given, for the solution of which it is necessary to use a graphical method. Subject and interdisciplinary competencies are described, which are formed when solving problems by a graphical method or qualitative problems in physics with graphic content.

Глебович Валентина Ивановна, аспирант кафедры теоретической физики и теплотехники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, glebovicz_vi@mail.ru.

Научный руководитель – Харазян Оксана Гагиковна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, kharazian.og@gmail.com.

Н. М. ГОТОВЧИЦ

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕЗЕНТАЦИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И ОПТИКИ
В КУРСЕ ФИЗИКИ СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ**

Проанализировано преимущество применения презентаций на уроках физики. Показано, что интерактивные методы преподавания предоставляют учителю и учащимся уникальную возможность сочетания компьютерных и традиционных методов организации учебной деятельности: с их помощью можно работать практически с любым имеющимся программным обеспечением и одновременно реализовать различные приемы индивидуальной и коллективной, публичной работы учащихся.

В современных условиях главной задачей образования является не только получение обучающимися определенной суммы знаний, но и формирование у них умений и навыков самостоятельного приобретения знаний. Использование компьютерных технологий в учебном процессе позволяет обеспечить переход от механического усвоения знаний к овладению навыками самостоятельно приобретать новые знания и умения, приобщает обучаемых к современным методам работы с информацией. Компьютерные технологии качественно изменяют содержание, методы и организационные формы обучения и при определенных условиях могут способствовать сохранению и развитию индивидуальных способностей обучаемых, их личностных качеств; формированию познавательных способностей; стремлению к самосовершенствованию [1, 2].

Еще до появления новой информационной технологии эксперты, проведя множество экспериментов, выявили зависимость между методом усвоения материала и способностью восстановить полученные знания некоторое время спустя. Если материал был звуковым, то человек запоминал около 1/4 его объема. Если информация была представлена визуально – около 1/3. При комбинировании воздействия (зрительного и слухового) запоминание повышалось до половины, а если человек вовлекался в активные действия в процессе изучения, то усвояемость материала повышалась до 75 % [3].

Преимущества презентаций:

1. При помощи слайдов, сменяющих друг друга на экране, удержать внимание класса гораздо легче, чем двигаясь с указкой между развешенными плакатами.

2. Возможность воспользоваться официальными шпаргалками.

Презентация – это не только то, что видит и слышит учащиеся, но и заметки для выступающего: о чём не забыть.

3. Мультимедийные эффекты.

Слайд презентации – не просто изображение. В нём, как и в любом компьютерном документе, могут быть элементы анимации, аудио- и видеофрагменты.

4. Копируемость.

Копии электронной презентации создаются мгновенно и ничем не отличаются от оригинала. При желании можно получить на руки все показанные материалы.

5. Транспортабельность – флешка с презентацией гораздо компактнее набора плакатов и гораздо меньше пострадает от частого использования на уроках. Файл презентации можно переслать по электронной почте, опубликовать в интернете.

Использование компьютерной техники в качестве средства обучения, совершенствующего процесс преподавания, повышает его качество и эффективность.

Список литературы

1. Камзеева, Е. Е. Интернет-уроки по физике / Е. Е. Камзеева // Физика в школе. – 2011. – № 3. – С. 5–8.
2. Информатизация общего среднего образования : науч.-метод. пособие / под ред. Д. Ш. Матроса. – М. : Педагогическое общество России, 2004. – 384 с.
3. Коротков, А. М. Компьютерное образование с позиций системно-деятельностного подхода / А. М. Коротков // Физика : еженедельная методическая газета для преподавания физики, астрономии и естествознания. – М. : Изд. дом «Первое сентября», 2004. – № 34. – С. 9–13.

The advantage of using presentations in physics lessons is analyzed. It is shown that interactive teaching methods provide the teacher and students with a unique opportunity to combine computer and traditional methods of organizing educational activities: with their help, you can work with almost any available software and at the same time implement various methods of individual and collective, public work of students.

Готовчиц Никита Михайлович, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, aqwcvuxn@yandex.ru.

Научный руководитель – *Тарковский Викентий Викентьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, tarkovsky@grsu.by.

А. С. КИРКО

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ГРАФИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ
КАК СРЕДСТВО ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ**

Раскрыто понятие комплексной графической задачи. Разработана комплексная графическая задача для диагностики и контроля знаний учащихся 10 класса по разделу «Термодинамика».

Решение задач – неотъемлемая составная часть процесса обучения физике, поскольку она позволяет формировать и обогащать физические понятия, развивать физическое мышление учащихся и их навыки применения знаний на практике [1]. В процессе обучения физике решение комплексных графических задач может выступить эффективным средством для диагностики и контроля знаний учащихся, полученных в рамках конкретного раздела.

Хоть нет общего методологического определения для физической задачи, будем использовать определение, предложенное А. В. Усовой и Н. Н. Тулькибаевой: «Физическая учебная задача – это ситуация, требующая от учащихся мыслительных и практических действий на основе использования законов и методов физики, направленных на овладение знаниями по физике, умениями применять их на практике и развитие мышления» [2]. Под *комплексной задачей по физике* будем понимать задачу, которая включает ученика в деятельность по установлению и усвоению связей между структурными элементами учебного материала в рамках различных тем одного раздела школьного курса физики.

При составлении комплексной задачи можно использовать один из двух методов:

- выбрать несколько задач, содержание которых охватывает изученный в данном разделе учебный материал, затем объединить условия и требования данных задач для получения одной комплексной задачи;
- выбрать одну задачу, содержание которой максимально охватывает структурные элементы учебного материала в рамках различных тем изученного раздела, затем дополнить требования данной задачи таким образом, чтобы она стала комплексной для данного раздела.

Требования комплексной задачи могут быть составлены на основе двух подходов, определяющих в дальнейшем способ решения задач:

1. Требования задачи могут зависеть друг от друга, то есть выполнение каждого следующего требования невозможно без выполнения предыдущих.
2. Требования задачи могут не зависеть друг от друга, то есть последовательность выполнения требований может быть различной.

Как следует из названия, *графическая комплексная задача по физике* так же должна включать в себя задания, связанные с анализом и/или синтезом графиков. Комплексная графическая задача по физике – это задача, решение которой требует применения знаний из различных тем одного раздела школьного курса физики, решение которых требует применения навыков по работе с графиками.

Неотъемлемым компонентом образовательного процесса является диагностика, с помощью которой определяется достижение поставленных целей. Без диагностики невозможно эффективное управление дидактическим процессом. *Диагностика* – это точное определение результатов дидактического процесса. Важным компонентом диагностирования является контроль. *Контроль* – это наблюдение за процессом усвоения знаний, умений и навыков. Составной частью контроля является проверка. *Проверка* – система действий и операций для контроля за усвоением знаний, умений и навыков.

Графики повсеместно существуют в нашем мире, а в физике они являются распространённым методом анализа, синтеза и демонстрации информации. Разумеется, без них уже невозможно представить целые разделы физики, а значит, при обучении физике графики нужно использовать как для получения новых знаний, так и для их проверки. Комплексные графические задачи при диагностике одновременно могут проверять и навыки работы с графиками, и приобретённые о разделе знания, и навыки решения задач.

Рассмотрим пример комплексной графической задачи для диагностики и контроля знаний учащихся 10 класса по разделу «Термодинамика». Термодинамика – это раздел физики, изучающий тепловые свойства макроскопических систем. Термодинамика изучается в школьном курсе физики в 10 классе и при её изучении, большую часть времени, ученики изучают «идеальный газ» и его свойства. Как следствие, задачи в этом разделе также про идеальный газ.

Данная задача предлагает ученикам в качестве условия график зависимости объёма газа от его температуры цикла, в котором газ по порядку переходит из одного состояния в другое. Всего состояний 4, а значит и процессов 4 (так как это цикл).

Условие задачи: На рисунке 1 представлен график зависимости объёма газа от температуры. «Стрелочками» обозначены 4 процесса, протекающих за цикл. Цифрами обозначены номера 4-х состояний, между которыми меняется газ.

Вопросы и задания:

1. Как называются процессы $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 4$ и $4 \rightarrow 1$?
2. По графику определить V_1 , V_2 , V_3 и V_4 .
3. По графику определить T_1 и T_2 .
4. Учтя, что количество вещества 40 моль, определить P_1 и P_2 .
5. Учтя, что система замкнутая, рассчитать P_3 , P_4 , T_3 и T_4 .
6. Найдите совершаемую газом работу в каждом из процессов цикла (A_{12} , A_{23} , A_{34} и A_{41}).
7. Учтя, что газ одноатомный, найдите изменение внутренней энергии в каждом из процессов цикла (ΔU_{12} , ΔU_{23} , ΔU_{34} и ΔU_{41}).
8. В каких процессах газ получает тепло, а в каких отдаёт?
9. Найдите количество теплоты для каждого из процессов (Q_{12} , Q_{23} , Q_{34} и Q_{41}).
10. Построить этот же цикл в других системах координат $P(V)$ и $P(T)$.
11. Найти КПД цикла.

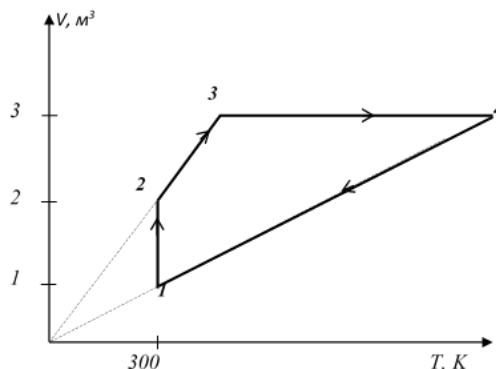


Рисунок 1 – Условие комплексной графической задачи по разделу «Термодинамика»

Первый пункт проверяет теоретические знания учащихся об изопроцессах и о том, как эти процессы выглядят на графиках. Во втором и третьем пункте учащимся необходимо считывать данные с графика. В четвертом пункте, используя дополнительные данные (количество вещества) ученики должны применить уравнение Менделеева-Клапейрона (уравнение состояния идеального газа), то есть пункт проверяет знание одного из важнейших уравнений в термодинамике и способность использовать его для вычислений. Пятый пункт можно решать либо так же, как и пункт 4, но быстрее будет использовать свойства конкретных изопроцессов, а значит, пункт может проверить способность оптимального способа решения. Шестой пункт проверяет знание формул работы для разных видов процессов. Седьмой – знание формул изменения внутренней энергии для разных процессов. Восьмой пункт проверяет теоретические знания о тепле (выделяемом или поглощаемом) в разных процессах, хотя его можно решить, решив девятый пункт. Девятый пункт проверяет знания формулы тепла в процессах и способность его рассчитать. Десятый пункт проверяет способность строить новые графики (что можно сделать либо с помощью самого изначального графика, либо с помощью полученных данных). Одиннадцатый пункт тоже можно решить несколькими способами (с помощью площади фигуры, или рассчитав с помощью данных). Данная задача проверяет как способность считывать данные с графика, так и способность строить новые графики по полученным данным (анализ и синтез). Задачи подобного типа подходят и для систематизации и обобщения, так и для диагностики и контроля знаний, но занимают довольно продолжительный отрезок времени (по сравнению с другими задачами), поэтому, как метод диагностики и контроля знаний, на мой взгляд, данная задача подходит больше.

Список литературы

1. Шефер, О. Р. Методика формирования у учащихся умений комплексно применять знания для решения физических задач : моногр. / О. Р. Шефер. – Челябинск : ИИУМЦ «Образование», 2009. – 135 с.
2. Бугаев, А. И. Методика преподавания физики в средней школе: теорет. основы : учеб. пособие / А. И. Бугаев. – М. : Просвещение, 1981. – 288 с.

The concept of a complex graphic problem is disclosed. The complex graphic task for diagnostics and control of knowledge of pupils of 10 class on section «Thermodynamics» is developed.

Кирко Алексей Сергеевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, kirkass@bk.ru.

Научный руководитель – *Харазян Оксана Гагиковна*, кандидат педагогических наук, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, kharazian.og@gmail.com.

В. А. ЛОТАШИНСКАЯ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ОБМЕН ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ АНТРОПОМЕТРИЧЕСКИХ И БИОИМПЕДАНСНЫХ ДАННЫХ

В результате обмена веществ у человека происходит превращение энергии из одного вида в другой: из энергии сложных соединений в тепловую, механическую и электрическую. Полученная энергия израсходуется на совершение механической работы, поддержание теплового баланса и на молекулярные процессы в организме. Распределение энергии зависит от возраста, питания и физических нагрузок [1].

Обмен веществ характеризуется основным обменом (ОО) и удельным основным обменом (УОО). Основной обмен определяется как потеря энергии в единицу времени в окружающее пространство при соблюдении определенных условий [2]. Удельный основной обмен – это отношение основного обмена к площади поверхности тела. Отношение энергии, выделяемой площадью поверхности тела в единицу времени, к половозрастной категории человека изменяется меньше, чем при отношении величины основного обмена к массе тела [2]. Площадь поверхности тела определяется по формуле:

$$S(\text{м}^2) = 0,007184 \cdot m^{0,425} \cdot L^{0,725}, \quad (1)$$

где m – масса тела (кг), L – рост (см).

В настоящее время существует два способа определения основного обмена. Первый способ: ОО определяется с помощью регрессивных уравнений, определяемых через антропометрические параметры. Существуют специальные таблицы для определения ОО в зависимости от возраста и пола.

Таблица 1 – Уравнения для расчёта величины основного обмена, ккал/сутки

Возраст, лет	Пол	Уравнения для расчета ОО
10–20	М	$16,6 \cdot m + 77 \cdot L + 572$ или $4,865 \cdot m + 925,5 \cdot L - 358$
	Ж	$7,4 \cdot m + 482 \cdot L + 217$ или $739 + 12,11 \cdot m - 39,4 \cdot L$
21–30	М	$15,4 \cdot m - 27 \cdot L + 717$
	Ж	$13,3 \cdot m + 334 \cdot L + 35$ или $6,57 \cdot m + 879,9 \cdot L - 477$

В данной таблице m – масса тела, измеряется в килограммах (кг), L – рост, измеряется в метрах (м).

Второй способ основан на методе биоимпедансного анализа состава тела человека (БИА). БИА основан на измерении электрической проводимости биологических тканей, что позволяет оценивать морфологические и физиологические параметры организма человека в довольно широком диапазоне. Используя данные БИА, основной обмен для индивидов возрастной группы 18–20 лет определяется по формуле:

$$\text{ОО} = 31,19 \cdot \text{АКМ} + 624,369, \quad (2)$$

где АКМ – активная клеточная масса, измеренная в кг.

Как видно по формуле (2), ОО зависит только от активной клеточной массы. Так же, исходя из определения, основной обмен определяется и площадью поверхности тела, формул, связывающих эти две величины, нет. Анализ изменений площади поверхности тел показывает, что они изменяются в достаточно широком диапазоне: у юношей – 30 %, у девушек – 50 %. Обработка результатов измерений биоимпедансным методом для определения активной клеточной массы и расчетов по определению площади поверхности тела по формуле (1) позволяет определить уравнения для основного обмена, выраженные через активную клеточную массу и площадь поверхности. Данные уравнения представлены в таблице 2.

Таким образом, определены регрессионные уравнения связи между основным обменом, активной клеточной массой и площадью поверхности тела для юношей и девушек 18–20 лет. Анализ экспериментальных данных показывает, что тепловые потери, осуществляемые через поверхность тела, изменяются в весьма существенном диапазоне: у юношей – до 35 %, у девушек – до 50 %.

Таблица 2 – Регрессионные уравнения связи основного обмена, определенные через активную клеточную массу и площадь поверхности тела для юношей и девушек возрастной категории 18–20 лет

Пол	Регрессионное уравнение ОО, ккал/сутки
Юноши	$\text{ОО} = 596,547 + 31,813 \cdot m_{\text{АКМ}} + 5,42922 \cdot S$
	$\text{ОО} = 30,25 \cdot m_{\text{АКМ}} + 348 \cdot S$
Девушки	$\text{ОО} = 590,1 \cdot m_{\text{АКМ}} + 115,1 \cdot S$
	$\text{ОО} = 23,72 \cdot m_{\text{АКМ}} + 479,51 \cdot S$

Список литературы

1. Мартиросов, Э. Г. Технологии и методы определения состава тела человека / Э. Г. Мартиросов, Д. В. Николаев, С. Г. Руднев. – М. : Наука, 2006. – 248 с.
2. Павловская, Е. В. Обмен энергии и регуляция массы тела / Е. В. Павловская, Т. В. Строкова // Вопросы диетологии. – 2013. – Т. 3, № 2. – С. 29–36.

An analysis of two methods for determining basal metabolism is presented: through anthropometric parameters and by measuring the electrical conductivity of biological tissues. Regression equations for the relationship between basal metabolism, active cell mass, and body surface area are presented. The analysis of heat losses carried out through the surface of the body is given.

Лоташинская Виктория Александровна, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, arsenovich308@gmail.com.

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, Республика Беларусь, a.zharnow@grsu.by.

УДК 628.91

З. А. ОМЕЛЬЧЕНКО

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ БЕЛОГО СВЕЧЕНИЯ В СВЕТОДИОДАХ

Рассмотрен принцип работы светодиода. Описаны основные методы получения белого свечения в светодиодах. Отмечены преимущества и недостатки каждого из методов.

Всего десять–двенадцать лет назад о светодиодах мало кто слышал. Еще реже можно было встретить тех, кто мог бы поделиться опытом в использовании твердотельных источников света для подсветки вывесок. Сегодня же светодиоды занимают уверенные позиции на рынке производства электрифицированной рекламы, все активнее конкурируя с люминесцентными лампами и приходя на смену все реже встречающимся неоновым трубкам. Наибольшей популярностью по вполне очевидным причинам среди сайнмейкеров пользуются LED-модули, которые излучают белый свет. Чтобы максимально реализовывать потенциал LED-технологий в производстве световой рекламы, прежде всего, необходимо лучше понимать природу белых светодиодов и знать об их сильных и слабых сторонах.

Рассмотрим принцип работы диода. Светоизлучающий диод представляет собой электронное устройство, которое излучает свет, когда через него пропускают электрический ток. Диод состоит из кристалла (нередко называемого чипом), который изготовлен из полупроводникового материала с вкраплениями примесей, необходимых для создания *p-n*-перехода (или электронно-дырочного перехода). В диоде ток проходит от стороны *p* (анода) к стороне *n* (катода), но не в обратную сторону. Носители заряда (электроны и дырки) поступают в *p-n*-переход от электродов с разным напряжением. При столкновении электронов с дырками происходит высвобождение энергии в виде фотонов [1].

Цвет свечения (или длина волны излучаемого света) светодиода определяется материалами, из которых изготовлен светодиод. Монохроматические диоды выпускаются в различных цветах, включая красный, синий, янтарно-желтый, зеленый и ультрафиолетовый, со светоотдачей от 10 до 200 люменов. Чтобы получить LED-устройства, излучающие белый свет, прибегают к одной из трех распространенных в настоящее время технологий, о чем далее рассказывается более подробно.

Если лампы накаливания и люминесцентные лампы по сути своей – источники белого света, то белые светодиоды таковыми не являются. В отличие от более традиционных ламп, светодиоды генерируют свет очень узкого диапазона длин волн в видимом спектре, результатом чего является их почти монохромное свечение. Именно поэтому светодиоды особенно эффективно использовать в световых установках, излучающих какой-либо определенный основной цвет, к примеру, в светофорах и указателях. Между тем в вывесках чаще всего необходима внутренняя подсветка, излучающая белый свет, по цветовой температуре и индексу цветопередачи сопоставимый со свечением привычных люминесцентных ламп. В этом случае выбор в пользу светодиодов не создаст никаких дополнительных сложностей в работе дизайнеров, поскольку воспроизведение цветов на лицевой стороне вывески будет именно таким, какое требуется заказчику.

Основными способами для получения белого свечения в светодиодах являются: а) нанесение слоя желтого фосфора на синие кристаллы; б) нанесение нескольких слоев разноцветных фосфоров на кристаллы, излучающие свет, близкий по цвету к ультрафиолетовому; в) RGB-системы, в которых за счет смешения света множества монохромных красных, зеленых и синих диодов достигается свечение белого цвета [2].

В первом случае чаще всего используют кристаллы синих светодиодов, которые покрывают желтым фосфором. Фосфор поглощает некоторое количество синего света и излучает желтый свет. При смешении непоглощенного синего света с желтым, человеческий глаз воспринимает свечение диода как белое.

Второй метод представляет собой не так давно разработанную технологию получения твердотельных источников белого света на основе комбинации диода, излучающего свечение, близкое по цвету к ультрафиолетовому, и нескольких слоев разноцветных фосфоров. В последнем случае белый свет получают путем смешивания трех базовых цветов (красного, зеленого и синего). Качество белого света улучшают за счет дополнения конфигурации RGB диодами с янтарно-желтым свечением, что позволяет охватывать желтую часть спектра.

У каждого из этих подходов есть свои плюсы и минусы. Так, для белых светодиодов, изготавливаемых по принципу комбинации синих кристаллов с фосфором, характерны достаточно низкий индекс цветопередачи (около 70), склонность к генерации белого света холодных тонов, неоднородность оттенка свечения при достаточно высокой световых эффективности и относительно небольшой стоимости.

Белые светодиоды, полученные на основе комбинации диодов, с близким к ультрафиолетовому цвету свечения и разноцветных фосфоров, обладают более высоким индексом цветопередачи, могут генерировать белый свет более теплых оттенков и отличаются большей однородностью оттенков свечения от диода к диоду. При этом они не столь энергоэффективны и не столь ярки, как первые.

В свою очередь, принцип RGB позволяет создавать светодинамические эффекты в световых установках со сменой цвета свечения и различными тонами белого свечения и потенциально может обеспечивать очень высокий индекс цветопередачи. В то же время светодиоды отдельных цветов по-разному реагируют на величины рабочего тока, окружающую их температуру и регулирование яркости, и нуждаются в достаточно сложных и дорогостоящих системах управления для достижения стабильного цвета свечения.

Для всех светодиодных модулей, излучающих белый свет, характерен ряд достоинств и недостатков, распространяющийся на твердотельные источники света в целом. Этим особенностям следует уделить отдельное внимание.

Преимущества LED-технологий. Бесспорным достоинством светодиодов является их световая эффективность. Так, поставляемые в настоящее время на рынке LED-модули генерируют световой поток в диапазоне от 25 до 80 люменов на каждый ватт потребляемой мощности. К примеру, у ламп накаливания световая эффективность не превышает 5–10 лм/Вт.

Второй плюс в использовании светодиодов – их долговечность, которая в среднем составляет 25–50 тыс. часов. Для сравнения: лампа накаливания мощностью 75 Вт работает примерно 1 тыс. часов, компактная люминесцентная лампа сопоставимой яркости – от 8 тыс. до 10 тыс. часов. Долговечность LED-модулей позволяет существенно сокращать затраты на обслуживание световых установок и покупку новых источников света для замены вышедших из строя ламп. К примеру, светодиодный светильник при работе восемь часов в день, способен прослужить 18 лет до того, как выйдет из строя, будет потреблять меньше электроэнергии, чем другие источники света и почти не потребует обслуживания.

Рассмотрим более детальное сравнение долговечности светодиодов и ламп дневного света. Обычно срок службы люминесцентных ламп оценивается в 30 тыс. часов. Что же касается светодиодов, считается, что заменять LED-модули на новые необходимо только тогда, когда уровень яркости их свечения составляет не более 30 % от первоначальной величины. Согласно данным Министерства энергетики США, самый долговечный из уже протестированных светодиодов непрерывно проработал 35 тыс. часов, прежде чем достиг этого показателя. В силу постоянного развития светодиодных технологий среднестатистический ресурс LED-модулей продолжает увеличиваться. По оценкам экспертов, срок службы современных белых светодиодов оценивается в 17–20 лет при ежедневной эксплуатации в течение восьми часов.

Стоит заметить, что светодиоды не перегорают, как люминесцентные или газоразрядные лампы, а в большинстве случаев со временем просто утрачивают свою первоначальную яркость.

Все эти плюсы в эксплуатации твердотельных источников света обеспечивают экономию электроэнергии, сокращение затрат на обслуживание световых конструкций и снижение цены владения вывеской со светодиодной подсветкой на протяжении ее срока службы в целом. В конструкции светодиодов не используются опасных для человеческого здоровья веществ, в отличие от компактных люминесцентных ламп, внутри которых содержатся ртутные пары. Немаловажным плюсом светодиодной технологии является и тот факт, что при диммировании (снижении яркости свечения) оттенок цвета их свечения не меняется в отличие, к примеру, от ламп накаливания, свет которых в этом случае желтеет.

Светодиоды – оптимальный выбор для использования в вывесках, которые работают в постоянном или достаточно частом режиме включения/выключения. К примеру, люминесцентные лампы при частом выключении выходят из строя гораздо быстрее, а газоразрядным лампам требуется достаточно ощутимый промежуток времени, чтобы заработать в полную силу после включения питания. Светодиоды во включенном состоянии начинают излучать свет почти мгновенно: к примеру, красный LED-модуль достигает полной яркости свечения за микросекунды [3].

Светодиоды, по сути своей являющиеся твердотельными устройствами, сложно повредить при внешних ударах, в отличие от люминесцентных ламп, неоновых трубок и ламп накаливания, которые при падении или сильном внешнем воздействии разрушаются без возможности починки.

Недостатки. Оценивая различные потребительские свойства и качества светодиодов, чаще всего их основным минусом называют более высокую стоимость в сравнении с традиционными источниками света. Эта величина еще более увеличивается за счет необходимости в использовании большего числа LED-модулей при достижении требуемой яркости свечения вывески, а также за счет затрат на требуемые для их работы электронику и блоки питания. И все же стоит заметить, что в целом стоимость владения (включая затраты на электроэнергию и обслуживание) светодиодной световой конструкцией ощутимо ниже, чем вывеской аналогичного размера и яркости, оснащенной какими-либо другими источниками света [4].

В режиме эксплуатации выявляется и еще одна особенность светодиодов, которую, пожалуй, следует отнести к их недостаткам: сильная зависимость от температуры, окружающей световую конструкцию. Если LED-модули подвергаются сильному нагреву, происходит перегрев их корпусов, и в результате это может привести к преждевременному выходу светодиодов из строя. В частности, известно, что повышение эксплуатационной температуры на 10 градусов Цельсия может сократить срок службы светодиода вдвое.

Таким образом, для обеспечения максимально возможного срока службы светодиодов необходима соответствующая система отвода тепла. Поэтому при оценке предполагаемой долговечности светодиодов следует учитывать рекомендованную производителем рабочую температуру и решения, внедренные им в конструкцию LED-модуля для нивелирования нагрева.

Возможность регулирования яркости свечения светодиодов в вывеске является еще одним немаловажным аспектом, который целесообразно учитывать при проектировании той или иной световой конструкции. Диммирование LED-подсветки позволяет оптимизировать эксплуатацию установки, реализовать в рекламном изделии дополнительные светодинамические эффекты, а также увеличить срок службы диодов. Подробнее об этом мы расскажем в ближайшем времени.

Список литературы

1. Физическая природа белых светодиодов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.signbusiness.ru/publications/theory/774-fizicheskaya-priroda-belyh-svetodiodov-tehnologii-izgotovleniya-dostoinstva-i-nedostatki-verdotelnyh-istochnikov-belogo-sveta.php>. – Дата доступа: 13.03.2022.
2. Шуберт, Ф. Е. Светодиоды [Электронный ресурс] / Ф. Е. Шуберт. – Режим доступа: <https://www.elec.ru/library/nauchnaya-i-tehnicheskaya-literatura/svetodiody-shubert>. – Дата доступа: 13.03.2022.
3. Как синий цвет стал белым [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://polit.ru/article/2014/10/07/ps_led. – Дата доступа: 13.03.2022.
4. Получения белого света. Основные способы получения белого света [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.gaw.ru/html/cgi/txt/gl/led/poluchenir_belogo_sveta.htm. – Дата доступа: 13.03.2022.

This article discusses the main methods for obtaining white glow in LEDs. The advantages and disadvantages of each of the methods were identified.

Омельченко Захар Артемович, студент 3 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, zah-bakh@mail.ru.

Научный руководитель – *Комар Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и электроники факультета физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

УДК 37.016:53

Д. В. ШИКЕЛЯ

МЕТОДИКА ОБУЧЕНИЯ ФИЗИКЕ ЧЕРЕЗ СЮЖЕТНУЮ ЛИНИЮ ГЕРОЕВ НАСТОЛЬНОЙ РОЛЕВОЙ ИГРЫ

Представлена методика преподавания физики, использующая элементы настольных ролевых игр. Объяснены преимущества и недостатки такого подхода к обучению. Разработана контрольная работа для 8-го класса по разделу «Тепловые явления», использующая в своей основе данную методику.

Общая суть методики сводится к объяснению материала при помощи примеров, показанных в контексте фэнтези, контексте магического мира. Несмотря на кажущуюся ненаучность, такой подход работает ровно аналогично различным «чёрным ящикам» из уже существующих задач. Брошенное под углом к горизонту тело может быть огненным шаром, этот же огненный шар может разогреть газ в сосуде, который частично выйдет

или заставит сосуд разорваться, ну а взрыв шара может толкнуть стоящего близко к пропасти персонажа, придав ему ускорение – и, возможно, столкнуть его так, что мы получим уже тело, падающее вертикально вниз.

Подход к проведению занятий в форме ролевой игры разделяется на два основных момента: организация базовых занятий (уроков объяснения нового материала, закрепления знаний, применения знаний на лабораторных работах) и интеграция ролевых элементов в проверочные, самостоятельные и контрольные работы. Им следует идти в комбинации: «интересные» контрольные после стандартных занятий могут не возыметь должного эффекта, тогда как «интересные» занятия, вылившиеся в стандартные письменные работы, могут вызвать в детях чувство предательства и отторжения. Прочитав один из источников вдохновения для составления задач: «Это, наверное, всё равно, что на День Рождения вместо торта поставить на стол кастрюлю с кашей» [1]. А поскольку любая игровая механика требует построения с детским коллективом доверительных, если даже не дружеских отношений (редкий ребёнок захочет играть со «злой училкой»), подобная ситуация крайне и крайне нежелательна.

Разрабатываемая мной методика проведения базовых занятий ещё не до конца проработана, однако я склоняюсь к использованию построения занятий, отличного от предлагаемых Министерством образования календарно-тематических планирований. Я считаю целесообразным объединение занятий по каждой теме в т. н. «приключения» – цельные, но при этом поддающиеся корректировкам сюжеты, в которые в качестве диалогов, загадок и ситуаций будут вписаны информация и задачи изучаемого раздела. Оптика может предстать в качестве путешествия на некий демиплан, полный кристаллов, отражающих и преломляющих лучи, порой делаая их смертоносными. Тепловые явления 8-го класса могут происходить в тундре или пустыне – и здесь же могут быть существа, атакующие холодом и огнём. Электрические явления могут рассматриваться на примере логова штормового гиганта или лаборатории изобретателя. Механика же и вовсе не имеет ограничений для применения.

В начале каждого раздела будет объяснена информация, аналогичная нескольким параграфам существующих учебников – сюжетно это может быть представлено как получение задания от какого-либо сюжетного персонажа, либо подготовка к предстоящей экспедиции. Лабораторные работы можно представить в виде боевых столкновений или загадок. Оставшаяся часть занятий, не предусматривающих письменных работ, будет посвящена продвижению по сюжету с сопутствующим решением возникающих задач.

В то время, как письменные работы, не являющиеся контрольными, могут быть просто вписаны в сюжет как отдельные этапы приключения, контрольные работы оптимально сделать некой конечной точкой приключения, будь то бой с боссом (в игровом сленге босс-монстрами называют особо сильных врагов, находящихся в конце уровня или сюжета) или иное крупное событие. И, как и подобает финалу, результат контрольной должен иметь отклик у детей. Я представляю текст контрольной работы в виде нескольких сюжетно взаимосвязанных задач, имеющих открытый финал. После проверки средний результат по классу оценивается и оглашается в виде «завершающей ноты»: хороший средний результат означает удачное завершение приключения, тогда как контрольная, написанная плохо, будет означать провал – возможно, даже эмоционально тяжёлый провал вроде локальной катастрофы или гибели некоторых связавшихся с группой NPC. Иначе говоря, результат контрольной работы служит рефлексивным моментом, стимулирующим учащихся усерднее работать во время следующего приключения.

Среди преимуществ предлагаемой методики можно выделить:

1. Повышенный интерес учащихся. В то время, как сам предмет физики, как минимум, на первых порах всё так же может не привлекать учеников, игровой способ подачи учебного материала несомненно найдёт отклик среди тех детей, кто ещё не скатился полностью в сторону асоциального поведения. Со временем же прогнозируемо сработает принцип действия научно-популярной литературы – и ученики, ранее не проявлявшие к физике интереса, могут в неё «втянуться».

2. Развитие абстрактного и образного мышления. Применение в преподавании аналогий с волшебным миром одновременно позволяет проще представить модель, заявленную в задаче, и требует после провести аналогию с реальным миром. Систематическое применение данных инструментов способствует закреплению способностей к этому.

3. Возможность развития творческого мышления у обеих сторон учебного процесса. Очевидно, что дети, слушая «сказку» и предлагая варианты развития сюжета, развивают своё воображение. Но также способность к творчеству выходит на новый уровень и у преподавателя, который должен «писать» историю в соавторстве с детьми – а это, хоть и, возможно, будучи недооценённым в современном мире, является отнюдь не лишним качеством.

4. Относительная практико-ориентированность заданий. Хоть задания и представлены в магическом ключе, они всё ещё представляют собой отражение реальных вещей и событий. Более того, магия, в задачах, в основном, используется там, где иной неабстрактный концепт применить нельзя, либо там, где она служит лишь причиной начала событий. Соответственно, все преимущества «немагических» практико-ориентированных заданий будут применимы и здесь [2].

5. Защита от списывания. Как ни банально, все задачи, предлагаемые в школе сейчас, уже давно были кем-то решены так, что решение оказалось доступным в сети Интернет. Как показывает практика, школьники безбожно пользуются этим, переписывая решения заданий и не пытаясь даже мало-мальски в них вникать. Они не могут объяснить, что за величина указана в формуле; нередко случаи переписывания в тетрадь символов, появившихся из-за слетевшей кодировки; учебники, взятые к доске, светятся – в общем, ситуация удручает. Новые и, в особенности, заданные неявно (см. пример) задачи вынудят детей к попыткам разобраться в задаче и, если уж списывать, то делать это, опираясь на аналогичные задачи, то есть, опять же говоря, разбираться.

Недостатки и ограничения методики.

1. Уязвимость к закостенелому мышлению. Новизна и кажущаяся несерьёзность метода могут привести, во-первых, к попустительскому отношению учеников, а во-вторых, к претензиям со стороны родителей или, как было лично у меня, администрации учебного заведения. И в то время как отношение детей можно скомпенсировать серьёзным выставлением отметок, переубедить взрослых в том, что «задачи тут самые настоящие» [1] – проблема довольно серьёзная, если вообще решаемая.

2. Трудности изложения скомпонованного в сюжет материала детям, не способным воспринимать сложный текст. Нарушения слуха или развития могут помешать пониманию сюжета и сути задач некоторыми детьми. Данная проблема решается выдачей наглядных карточек (либо обращением к учебнику) и предложением во время письменных работ «сухих» версий тех же задач (см. пример).

3. Предположительно незначительное снижение эффективности методики при вводе её в старших классах, ранее с ней не сталкивавшихся. Подростки возраста от девятого класса включительно, уже привыкшие к стандартизированному обучению и выработавшие устойчивое поведение в школьной среде, с большей вероятностью сочтут переход на «интересное» обучение признаком слабости или попустительства. В принципе с подростками работать в доброжелательном ключе сложнее, чем с детьми, ещё не вошедшими в пубертатный период.

4. Вреязатратность подхода. Стандартные партии в НРИ длятся не один час, и даже за это время по сюжету делается относительно немного. Очевидно, уместить сюжет в полтора-два десятка занятий, длящихся всего лишь по 45 минут, будет довольно трудно. Тем не менее, методика ещё будет дорабатываться и тестироваться мной так, чтобы приключения можно было совместить с расписанием. Одним из решений задачи может быть вынесение части истории на факультативные занятия (которые, прогнозируемо, будут иметь популярность), либо объединение в расписании двух уроков физики в один с целью сокращения времени, тратящегося на организационные моменты.

В качестве действующих лиц в примерах используются волшебник-полуэльф Текаш, варварша-полуорк Таши и плут-полиморф Нарес.

Пример задач (Контрольная работа № 1 «Расчёт количества теплоты. Горение. Плавление», 8 класс)

1. После долгих дней пути герои наконец добрались до дворца, где, по их информации, должен был храниться Амулет Теплопроводности. Дверь оказалась заперта и взлому не поддавалась – но на ней было четыре разных кольца с надписями и висела табличка с загадкой: «Четыре кольца – жизни три унесут. **Найдите плавления здесь теплоту!**»

$$\text{а) } c = \frac{Q}{m \cdot \Delta t} \quad \text{б) } Q = c \cdot m \cdot \Delta t \quad \text{в) } Q = \lambda \cdot m \quad \text{г) } q = \frac{Q}{m}$$

2. Следующая головоломка представляла собой пару подвесных мостов, факелы на длинных шестах – и, вновь же, надпись: «Нагрев цепи, ты без труда их опустишь. Но первой нагретой никто рад не будет. Хоть тычь наугад, а хоть не рискуй: **Что нагреется позже: сталь или чугун?**» **Ответьте на вопрос, используя таблицу.**

3. «И что за гений придумал на пути к трону ставить столько препятствий?! – не выдержала Таши, когда за второй загадкой оказалась и третья. – Я понимаю, в гробнице, но тут же дворец!» Тем не менее, загадка была, и её надо было решать. Над «клавишами» с цифрами сидела блестящая фигурка обезьяны, окружённая пятнами засохшей крови и держащая в лапах табличку: «Стоит в одиночестве золотой идол. Хоть в нём **полкило**, он не терпит обиды. Но пустынная ночь холодна, будто лёд: **сколько же теплоты статуя отдаёт?**» «Надо думать логически, – рассуждал Текаш. – Здесь сказано про ночь – а **температура ночью в пустыне падает от +38 до -4 градусов**. Тогда...»

4. После решения задачи герои наконец вошли в тронный зал, где их уже ждал хозяин: недобро, но широко улыбающийся ифрит (огненный джинн). Сражаться с ним было слишком опасно – и герои решили заключить сделку. «Амулет? – захохотал Фарух (так звали ифрита). – Да никаких проблем, добра навалом! Но развлеките меня ещё немного!» С этими словами он, щёлкнув пальцами, создал в центре зала печь, в которой лежала докрасна раскалённая подкова. «Вот вам подкова, **400 граммов чистой стали**. Нагрета, как видите, – вот-вот поплывет. А вот вы скажите мне, **сколько нужно долить в печку нефти, чтобы её только расплавить, а больше не греть?** Само собой, наружу тепло не выйдет, магия, как-никак.»

5. Увидев, что задача решена, Фарух резко переменялся в лице. «Дьявол бы вас побрал... Ладно! Вот вам ваш амулет – только сперва достаньте его!» – С этими словами ифрит зло расхохотался и вновь щёлкнул пальцами. Печка исчезла, но на её месте вырос пьедестал, окружённый пламенем. И на его вершине сквозь огонь виднелся медальон. «Можешь что-либо сделать?» – прошептали Нарес, обращаясь к Текашу. «Могу... – задумчиво ответил полуэльф. – Этот огонь немагический, **там что-то горит – и если поймём, что,** то я смогу превратить топливо во что-то негорючее.» Без лишних вопросов Нарес метнулись к огню и, нарастив на себя «панцирь», чтобы не так палило, бросили в него пару платиновых монет, шепнув в кулак с ними пару заклятий. Монеты расплавились – и полиморф с осознанием крикнули: «Текаш! **На две монеты ушло 10 грамм топлива!**» «Отлично! – защёлкали счёты в голове эльфа. – Так, если **сейчас +38 градусов, диаметр монеты 3 см, толщина 2,5 мм, а плотность платины 21 г/см³**, то получается...»

Пример простых для понимания версий тех же задач:

1. Выберите формулу теплоты плавления.

$$\text{а) } c = \frac{Q}{m \cdot \Delta t} \quad \text{б) } Q = c \cdot m \cdot \Delta t \quad \text{в) } Q = \lambda \cdot m \quad \text{г) } q = \frac{Q}{m}$$

2. Используя таблицу, определите, что нагреется позже: сталь или чугун. Массы и начальные-конечные температуры металлов одинаковы.

3. Сколько теплоты отдаст золотая фигурка массой $m = 300$ г., остывая с $t_1 = +38$ °C до $t_2 = -4$ °C?

4. Сколько нефти нужно сжечь, чтобы расплавить стальную подкову массой $m=400$ г., находящуюся при температуре плавления? Потерями энергии пренебречь.

5. На расплавку двух платиновых монет, находящихся при $t_1 = +38$ °C, ушло 10 грамм топлива. Диаметр монеты $d = 3$ см, толщина $h = 2,5$ мм, плотность платины $\rho = 21$ г/см³. Определите вид топлива.

Представленная выше контрольная, будучи представленной обучающимся, действительно вызвала интерес, пусть даже многие и решили перестраховаться, выбрав версию текста со стандартного вида задачами; интерес и повышение активности учеников вызывали также пробные мои попытки ввести методику в процесс обучения, отличный от письменных работ. В связи с этим я считаю целесообразным продолжать разработку методики с целью последующего её применения в педагогической практике уже в более крупном масштабе.

Список литературы

1. Остер, Г. Б. Задачник / Г. Б. Остер ; под ред. А. Б. Сапрыгиной. – М. : Росмэн, 1996.
2. Кисиленко, О. Л. Практико-ориентированные задания как средство формирования метапредметных результатов [Электронный ресурс] / О. Л. Кисиленко. – Усть-Илимск, 2019. – Режим доступа: <https://www.единыйурок.рф/index.php/novosti/item/1635-178> – Дата доступа: 13.12.2021.

Presented here is the methodology of teaching Physics in school using tabletop roleplaying games mechanics. Pros and cons of the technique are explained. The mid-term exam for 8th grade students on «Thermal phenomena» subject is developed based on the said methodology.

Шикеля Даниил Витальевич, студент 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, shikelya28122000@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, Республика Беларусь, kharazian.og@gmail.com.

УДК 621.382

М. С. ШУМСКАЯ

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Рассматриваются методы повышения эффективности использования солнечной энергии в автономных системах энергоснабжения. Были рассмотрены варианты использования солнечной энергии. Произведен предварительный анализ возможности использования невозобновляемых источников энергии (НВИЭ). Конкретизированы преимущества и недостатки солнечной энергетики.

Одной из наиболее характерных особенностей деятельности современного человечества является рост энергопотребления. В мире более 90 % всей потребляемой человеком энергии, приходится на долю органического топлива. Однако этот ресурс рано или поздно закончится. Говорит это о необходимости принятия определенных мер для существенных структурных изменений в ресурсной основе всего мирового

энергетического сектора. В связи с этим в мире становится актуальным использование возобновляемых источников энергии.

Особое внимание привлечено к солнечной энергии, которая является, по сути, абсолютно бесплатной. Солнечное же излучение доступно практически в любой точке Земли. Солнечная энергия также весьма универсальна – ее можно использовать как в виде тепла, так и преобразовывать в механическую и электрическую.

Описание структуры солнечной энергетики.

Технологии производства солнечных батарей шагнули далеко вперед, благодаря чему их использование стало возможным как в бытовых, так и в промышленных установках. Основное распространение такие системы получили в странах с высокой солнечной активностью – Китай, Индия, Индонезия, Япония, Италия.

Солнечная энергетика – один из наиболее перспективных видов альтернативной энергетики. Полное количество солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли за неделю, превышает энергию всех мировых запасов нефти, газа, угля и урана [1, 2].

В Республике Беларусь целесообразны 3 варианта использования солнечной энергии:

- пассивное использование солнечной энергии методом строительства домов «солнечной архитектуры». Расчёты показывают, что количества энергии, падающее на южную сторону крыши домов площадью 100 кв. м. на широте Минска, вполне хватает даже на отопление зимой. Размеры дешёвого гравийного теплового аккумулятора под домом вполне приемлемы. Однако в настоящее время полностью игнорируются даже принципы пассивного солнечного отопления. Единственное здание в Беларуси, построенное с использованием этого принципа – немецкий Международный образовательный центр;

- использование солнечной энергии для целей горячего водоснабжения и отопления с помощью солнечных коллекторов;

- использование солнечной энергии для производства электроэнергии с помощью фотоэлектрических установок.

Для всей территории республики поступление солнечной энергии составляет около 208×10^{12} кВт·ч в год или 256×10^9 т у. т. при планируемом потреблении в 2020 г. всех видов топливно-энергетических ресурсов $32,8 \times 10^6$ т у. т. Это в 7800 раз превышает потребность нашей республики в энергоресурсах и говорит о больших потенциальных возможностях гелиоэнергетики. На нашей планете за счет естественных процессов и производственно-хозяйственной деятельности человека происходит преобразование солнечной энергии в другие виды [3].

Сегодня в Беларуси зарегистрировано более 360 установок по использованию возобновляемой энергетики, суммарно это около 600 мегаватт, и почти четверть из них – энергия солнца.

В нашей стране больше всего объектов возобновляемой энергетики в Могилевской и Гродненской областях, но самые крупные – на Гомельщине и Витебщине. Например, мощности электростанции в Речице хватит, чтобы обеспечивать энергией до 30 тыс. квартир. А солнечный парк под Брагином способен включить всю вечернюю подсветку столицы.

На территорию Беларуси за год поступает солнечная энергия суммарной величиной около 3×10^{14} кВт·ч, что эквивалентно 40 млрд т у. т. и более чем на три порядка величины превышает нынешнее общее потребление энергоносителей в государстве.

Проведенный предварительный анализ возможности использования невозобновляемых источников энергии (НВИЭ) показал, что Республика Беларусь располагает существенной сырьевой базой, составляющей по оценкам ряда специалистов 12–20 млн т у. т. в год. Для сравнения: в 1994 году было израсходовано 37,2 млн т у. т. при собственном производстве 5,8 млн т у. т. Таким образом, общий потенциал собственных НВИЭ – примерно 30 % потребности страны [5].

Главный фактор, обуславливающий развитие фотовольтаики (использование энергии солнца) в Беларуси, – это наличие достаточной инсоляции (количества световой энергии, падающей на единицу поверхности). По количеству световой энергии, падающей на единицу поверхности (инсоляции), наша страна отстаёт от территорий, близких к экватору, однако находится примерно на одном уровне с такими странами, как Германия, Япония, Канада, где солнечная энергетика развивается очень активно. Потенциальная эффективность использования солнечных батарей на территории Беларуси только за счет благоприятных условий инсоляции:

- более чем на 10 % выше, чем в Польше, Нидерландах;

- более чем на 17 % выше, чем в Германии, Бельгии, Дании, Ирландии, Великобритании;

- еще выше относительно стран, расположенных севернее и северо-западнее Республики Беларусь.

По состоянию на 1 мая 2021 г в Беларуси насчитывалось 70 солнечных электрических станций, их суммарная мощность составила 160 МВт. Об этом сообщает пресс-служба Министерства энергетики.

Так, самая большая фотоэлектрическая станция, или солнечная электростанция, мощностью 55 МВт работает в Речицком районе. «За последние три дня в объединенную энергосистему Беларуси отпущено 1,1 млн кВт·ч электроэнергии, а с начала июня – 6,6 млн кВт·ч», – рассказали в министерстве.

По данным за январь–апрель 2021 г., солнечными электростанциями Беларуси произведено около 40 млн кВт·ч электроэнергии. В 2020 г. их общий объем выработки составил 175,2 млн кВт·ч.

Принятый 6 мая 2010 года проект Закона Республики Беларусь «О возобновляемых источниках энергии» был разработан в целях создания правовой основы для реализации государственной политики в сфере производства и использования возобновляемых источников энергии. Документ направлен, прежде всего, на повышение уровня энергетической безопасности, а также на снижение антропогенного воздействия на окружающую среду и климат, сохранение невозобновляемых источников энергии для будущих поколений, создание, совершенствование и применение эффективных технологий и установок по использованию возобновляемых источников энергии [4].

В условиях Республики Беларусь рассматриваются два способа использования солнечной энергии: это преобразование солнечной энергии в тепловую энергию и преобразование солнечной энергии непосредственно в электрическую при помощи PV-систем.

В настоящее время у нас отсутствует развитая отрасль производства солнечных элементов и установок на их основе. Однако уже существуют некоторые предприятия, которые наладили их производство. Например, ООО «Электрет» уже более 8 лет разрабатывает и внедряет солнечные водогрейные системы, предназначенные для горячего водоснабжения жилых домов, объектов соцкультбыта и промышленности. В 2009 году в Бресте было создано первое промышленное предприятие СООО «Солар-Груп» по выпуску высокотехнологичных полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Объем производства на данный момент достигает 1,3 млн пластин ФЭП в год. Постоянно улучшается качество производимой продукции.

Во исполнение целевой государственной программы, согласно которой к 2012 году доля местных видов топлива и альтернативных источников энергии в энергобалансе должна быть доведена до 25 %, руководством предприятия МО ОАО «Луч» было утверждено новое направление деятельности – проект «ЭкоЭнерджи». Целью проекта является освоение, установка, а также оптовая и розничная продажа оборудования, преобразующего энергию солнца и ветра в тепловую и электрическую энергию. В ближайшей перспективе – открытие собственного производства энергосберегающего оборудования на базе МО ОАО «Луч» [2].

Белорусские специалисты небезосновательно утверждают, что потенциал развития фотовольтаики в Беларуси есть. Межотраслевой рабочей группой разработан проект концепции государственной программы по созданию и развитию сектора солнечной фотоэлектрической энергетики Республики Беларусь. Полагается, что формирование сектора солнечной энергетики в республике следует начать с создания высокоэффективного массового производства «под ключ» для изготовления как самих солнечных элементов (с КПД около 15%), так и конечного изделия – модулей на базе какого-либо предприятия радиоэлектронного профиля (например, НПО «Интеграл», завод «Измеритель» и т. п.).

Перспективно также развитие тонкопленочной фотофольтаики, что означает отказ от дорогостоящих кремниевых пластин, на которых размещаются солнечные элементы, и переход к тонкопленочным преобразователям. Последние должны иметь более широкий спектр поглощения солнечного света, включая все области инфракрасного излучения и ультрафиолетового.

Еще одним вариантом является разработка tandemных или более сложных систем, например – солнечная батарея плюс солнечный коллектор, плюс дизель. Эти и другие задумки, многие из которых близки к реализации, позволят снизить материалоемкость и цену солнечных элементов до приемлемой и сделают фотовольтаику более конкурентной.

Научное и научно-техническое обеспечение и сопровождение программы должно быть направлено на достижение следующих целей. Во-первых, на повышение эффективности используемых фотоэлектрических систем и снижение себестоимости производимой ими электроэнергии. Во-вторых, на поиск новых, более эффективных и дешевых, материалов и методов изготовления СЭ, создание новых конструкций СЭ. В-третьих, на создание специализированного технологического и контрольно-измерительного оборудования по повышению производительности изготовления СЭ. И наконец, на проведение испытаний, измерений, аттестации и сертификации производимых СЭ [1].

Таким образом, в Республике Беларусь есть необходимые условия для развития солнечной энергетики. Мы располагаем крупными научно-исследовательскими центрами в области микро-, нано- и оптоэлектроники, соответствующим аналитическим и производственным оборудованием, рядом существенных научных результатов в областях материаловедения, химии, технологии кремния, соединений АЗВ5, А2В6, формирования просветляющих, люминесцентных, защитных покрытий и т. п., которые могут быть использованы при разработке солнечных элементов. Сравнительно большая материально-техническая база не загружена и пригодна для обеспечения крупносерийного производства солнечных элементов и гелиостанций.

А главный аргумент, это наличие высококвалифицированных кадров и опыт международного научного сотрудничества в конкретных областях разработок.

Список литературы

1. What is the digital substation and what makes it digital? [Electronic resource] // EEP – Electrical Engineering Portal. – Mode of access: <https://electrical-engineering-portal.com/digital-substation#:~:text=The%20Digital%20Substation%20is%20a,technology%20in%20the%20substation%20environment.> – Date of access: 22.02.2022.
2. СТО 56947007-29.240.10.248-2017. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы 35–750 кВ (НТП ПС) [Электронный ресурс]. – Взамен СТО 56947007-29.240.10.028-2009 ; введ. 25.08.2017. – М. : ПАО «ФСК ЕЭС», 2017. – 135 с. – Режим доступа: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.240.10.248-2017.pdf. – Дата доступа: 18.02.2022.
3. МЭК-61850 [Электронный ресурс] // Википедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%AD%D0%9A-61850%D0%A1%D1%81%D1%8B%D0%BB%D0%BA%D0%B8>. – Дата доступа: 21.02.2022.
4. Солнечная энергетика [Электронный ресурс] // Журнал «ИСУП». – Режим доступа: <https://isup.ru/articles/72/13855/>. – Дата доступа: 15.02.2022.
5. Goldschmidt, J. C. Efficiency enhancement of fluorescent concentrators with photonic structures and material combinations / J. C. Goldschmidt, M. Peters, F. Dimroth. – 2008.

The article discusses methods of increasing the efficiency of solar energy use in autonomous power supply systems. Options for using solar energy were considered. A preliminary analysis of the possibility of using non-renewable energy sources (NVE) has been made. The advantages and disadvantages of solar energy are specified.

Шумская Мария Сергеевна, студентка 4 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, savoschik0108@gmail.com.

Научный руководитель – *Кропачева Людмила Владимировна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и электроники физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

УДК 372.853

В. М. ЗАВАДСКАЯ

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗДЕЛА «ОПТИКА» ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ⁹

Представлен научно-методический анализ темы «Оптика» в средней школе и медицинском учреждении высшего образования, определены методические особенности преподавания, способствующие наиболее эффективному усвоению студентами необходимых знаний и навыков.

В истории физики оптика сыграла исключительно важную роль. Без телескопа и микроскопа не было бы современной астрономии и биологии; без линзы не было бы фотоаппарата, спектрографа, кино, телевидения, компьютера; без интерферометров не было бы тончайших методов измерения физических величин. Спектральный анализ позволил проникнуть в тайны строения атомов и молекул, а также небесных тел. Раздел «Оптика» вводится в школьный курс физики в два этапа.

1. Геометрическая оптика. Ученики 8 класса начинают изучать геометрическую оптику в разделе «Световые явления», на который отводится 15 часов. После изучения теоретических основ темы, выполнения лабораторной работы, просмотра демонстраций, опытов и компьютерных моделей, ученики должны уметь описывать и объяснять физические явления, основанные на прямолинейности распространения света, законе отражения света: образование тени, полутени, зеркальное и диффузное отражение света; преломление света. Кроме этого, должны владеть экспериментальными умениями: получать изображение в плоском зеркале, линзах, определять фокусное расстояние и оптическую силу тонкой собирающей линзы; практическими умениями: решать качественные и расчетные задачи на применение свойства прямолинейности распространения света и закона отражения света; строить изображения в плоском зеркале и тонких линзах; вычислять оптическую силу тонкой линзы [1].

2. Волновая оптика с элементами геометрической оптики. Раздел «Оптика» включает в себя геометрическую и волновую оптику, и его ученики продолжают изучать в 11 классе, на изучение темы отводится 17 часов. После изучения темы учащиеся должны *иметь представление*: об электромагнитной природе света; принципе Гюйгенса–Френеля; оптических приборах; вкладе белорусских ученых в развитие физической оптики; *знать/понимать*: смысл физических понятий и явлений: когерентность, интерференция, дифракция, показатель преломления; смысл физических законов и принципов: отражения и преломления света; *уметь описывать и объяснять* физические явления: отражение, преломление света, интерференция,

⁹По техническим причинам данная статья помещена в конец сборника.

дифракция; *владеть: экспериментальными умениями*: определять длину волны видимого света, показатель преломления вещества, фокусное расстояние тонкой собирающей линзы; *практическими умениями*: решать качественные, графические, расчетные задачи на определение длины световой волны, порядка дифракционных максимумов, построение хода световых лучей в сферических зеркалах, плоскопараллельных пластинах; характеристик изображения в зеркалах, тонких линзах с использованием законов прямолинейного распространения, отражения и преломления света, формул дифракционной решетки, тонкой линзы [2].

Учитывая вышесказанное, будущие студенты-медики должны приходить на занятия по медицинской и биологической физике с хорошей базой знаний по оптике как геометрической, так и волновой, поскольку анализ изучения темы в школьном курсе физики показал значимое количество выделяемых на изучение темы часов. Для медиков знания оптики прежде всего важны при исследовании биологических объектов: микроскопия, спектрометрия, рефрактометрия, поляриметрия, колориметрия. Кроме того, врачам следует знать физические основы использования теплового излучения для диагностики заболевания (термография), устройство аппаратуры светолечения и другие вопросы. К сожалению, при изучении оптики в университете студенты сталкиваются с рядом проблем.

Во-первых, отсутствием базы школьных знаний, которая просто необходима для дальнейшего изучения и применения оптики именно для медицины, поскольку в курсе медицинской и биологической физики оптика занимает также существенную часть изучаемого материала. Раздел «Оптические методы исследования и воздействие излучением оптического диапазона на биологические объекты. Элементы физики атомов и молекул» студенты лечебного и медико-диагностического факультета изучают на 1 курсе во втором семестре, и на изучение темы отводится 20 часов (10 занятий из 17).

Хорошая школьная база знаний основ геометрической и волновой оптики способствовала бы конкретизации учебного материала согласно профессиональной направленности, помогла бы сэкономить учебное время, произвести более глубокое изучение материала согласно выбранной специальности. Например, на занятии «Рефрактометрия. Определение концентрации растворов с помощью рефрактометра. Принципы волоконной оптики. Эндоскопия» при наличии высокого или достаточного уровня остаточных знаний школьного курса физики по геометрической оптике, можно уделить больше времени на применение ее именно в медицине и медицинских приборах, разобрать более подробно волоконную оптику и ее использование в медицинских приборах. Но для того, чтобы перейти к волоконной оптике студенты должны знать и понимать суть явления полного внутреннего отражения, законы отражения и преломления световых лучей. А из-за недостатка знаний много времени тратится на повторение школьного курса физики. При изучении темы «Оптическая система глаза. Биофизические основы зрения» опять нужен как минимум достаточный уровень остаточных знаний – четкое понятие оптической системы, вида линз, формулы тонкой линзы и построения в линзах, аберрации линз, поскольку глаз человека является своеобразным оптическим прибором, занимающим в оптике особое место. Студенты-медики должны понимать, чем отличается близорукость от дальнозоркости и с помощью какой линзы можно откорректировать эти дефекты зрения. Самое интересное, что студенты, которые носят очки или линзы, даже не понимают, что значит плюс или минус в их очках. А ведь часть из них станет в будущем офтальмологами. Для медиков глаз не только орган, способный к функциональным нарушениям и заболеваниям, но и источник информации о некоторых неглазных болезнях.

Во-вторых, изучение и восприятие учащимися основ оптики сопровождается рядом трудностей, обусловленных абстрактностью оптических понятий, недостаточной экспериментальной поддержкой процесса обучения оптике.

Таким образом, все это приводит к тому, что у будущих врачей не сформированы на должном уровне основные знания по оптике и экспериментальные умения, которые необходимы для дальнейшей работы. Они не имеют необходимых знаний о таких оптических явлениях, как полное внутреннее отражение света, близорукость и дальнозоркость, не понимают, почему глаз является оптической системой, поэтому и считают, что физика медикам не нужна. Для решения проблемы пробела в школьном курсе физики или отсутствия остаточных знаний, необходимо помочь студентам научиться работать с материалами самостоятельно, заниматься самообразованием.

Для решения проблемы восприятия студентами основ оптики, необходимо совершенствовать экспериментальную поддержку обучения оптике путем использования как новых информационных технологий, так и реального эксперимента.

Список литературы

1. Учебная программа по учебному предмету «Физика» для XI класса учреждений общего среднего образования с русским языком обучения и воспитания (базовый уровень) [Электронный ресурс] : Постановление М-ва образования Респ. Беларусь, 27.07.2018, № 76 // Национальный образовательный портал. – Режим доступа: <https://adu.by/ru/homepage/obrazovatelnyj-protsess-2021-2022-uchebnyj-god/obshchee-srednee-obrazovanie-2021-2022/304-uchebnye-predmety-v-xi-klassy-2020-2021/3819-fizika.html>.

2. Учебная программа по учебному предмету «Физика» для XI класса учреждений общего среднего образования с русским языком обучения и воспитания (базовый уровень) [Электронный ресурс] : Постановление М-ва образования Респ.

Беларусь, 21.06.2021, № 131 // Национальный образовательный портал. – Режим доступа: <https://adu.by/images/2021/08/up-fizika-11kl-baz-rus.pdf>.

The article presents a scientific and methodological analysis of the study of the topic «Optics» in a secondary school and a medical university, defines the methodological features of teaching that contribute to the most effective assimilation of the necessary students knowledge.

Завадская Виктория Михайловна, аспирант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, vika.m.zavadskaya@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, Республика Беларусь, kharazian.og@gmail.com.

УДК 523.681, 533.9.082.5

Л. С. РУТКОВСКАЯ, Н. Н. КРАСНОПЕРОВ, М. Н. КОВАЛЕНКО

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ
ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ НАНОПЛЁНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ
ИЗ ОКСИДОВ МЕДИ, ЛЕГИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОМ,
ПРИ ЛАЗЕРНОМ РАСПЫЛЕНИИ МЕДИ И ЖЕЛЕЗА
В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА¹⁰**

Изучены возможности получения газочувствительных нанопленочных резисторов из оксидов меди, легированных железом, с достаточно хорошими механическими и чувствительными характеристиками методом абляции сдвоенными лазерными импульсами гибридной мишени, состоящей из последовательно склеенных пластинок меди, цинка и железа на подложку из фольгированного стеклотекстолита в атмосфере воздуха. Проведены исследования влияния междимпульсного интервала, энергии импульсов и их количества на процессы при целенаправленном формировании компонентного и зарядового состава лазерного факела, направляемого на подложку.

Улучшение функциональных характеристик химических газовых сенсоров может быть достигнуто за счет использования в качестве газочувствительных материалов оксидов и оксидных композитов, для которых характерно изменение валентного состояния атомов металла при взаимодействии с молекулами детектируемого газа. Для создания датчиков контроля состава атмосферного воздуха большой интерес представляют такие материалы, как оксиды металлов, в частности оксиды меди CuO и Cu_2O (с шириной запрещенной зоны 1.2 эВ и 2.1 эВ, соответственно) [1]. Преимуществами оксидов меди являются их низкая стоимость и химическая стойкость. Пленки оксидов меди зарекомендовали себя в качестве чувствительного слоя газовых сенсоров для датчиков аммиака NH_3 , оксида азота NO_2 и сероводорода H_2S [1]. Для последнего газа этот материал также используется в сочетании с оксидом олова [1]. Работа газочувствительных датчиков на оксидах металлов основана на изменении сопротивления образца под воздействием детектируемого газа, адсорбирующегося на поверхности полупроводника. Для существенного изменения сопротивления необходима развитая поверхность чувствительного слоя, т. е. высокая удельная площадь поверхности образца. Для процесса адсорбции детектируемых молекул важную роль играет состояние поверхности – количество и характер поверхностных адсорбционных центров.

Основным фактором, влияющим на качество материала, является довольно низкая проводимость материалов на основе оксидов меди. Для того чтобы повысить проводимость, число зарядовых носителей может быть увеличено путем допирования исходного материала примесями. В зависимости от валентности допантов или вакантных позиций, в зонную структуру вводят примесные (акцепторные или донорные) уровни, приводящие к увеличению концентрации зарядовых носителей в ППО соединениях. В случае, когда трехвалентный катион замещен двухвалентным катионом, в валентной зоне возникает одно вакантное состояние, которое действует как дырка, и дырочная проводимость увеличивается.

В литературе сообщалось о ряде методов синтеза материалов для разработки газовых датчиков с использованием полупроводниковых наноструктур $p\text{-CuO}$, легированных цинком, оловом, железом и т. д., таких как сольватермическое, термическое испарение, гидротермический и микроволновый гидротермальный, ультразвуковой распылительный пиролиз и электроосаждения [2].

Разрабатываемый в данной работе альтернативный подход основан на использовании высокоинтенсивных сдвоенных лазерных импульсов для распыления (абляции) гибридной мишени из состоящей из последовательно склеенных пластинок из меди, цинка и железа непосредственно в воздухе. Возникающий в этом случае относительно небольшой (порядка несколько мм) плазменный факел характеризуется высокой

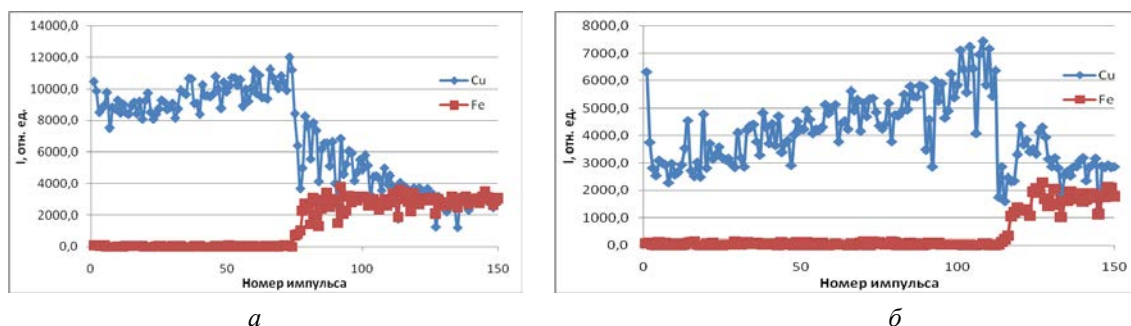
¹⁰По техническим причинам данная статья помещена в конец сборника.

температурой, давлением, большой степенью ионизации элементов, поэтому он вполне способен обеспечить интенсивный поток частиц желаемой (высокой) энергии на близко расположенную подложку. При использовании схем и методов двухимпульсного лазерного воздействия при различных углах падения на мишень и плазму возможно одновременное проведение высокочувствительного спектрального анализа, контроля концентрации возбужденных и заряженных частиц и управления составом плазмы, направляемой на подложку.

Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1 (изготовитель СП «ЛОТИС ТИИ»). Лазер может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Временной сдвиг между сдвоенными импульсами может меняться от 0 до 100 мкс с шагом 1 мкс. Размер сфокусированного пятна примерно 50 мкм, при фокусном расстоянии объектива 104 мм.

Исследована динамика процессов образования атомов и ионов Cu при воздействии серий последовательных сдвоенных лазерных импульсов на гибридную мишень, состоящую из последовательно склеенных пластинок из меди, цинка и железа при энергии импульсов 53 и интервала между импульсами 10 мкс.

Результаты исследований по зависимости интенсивности линии атомов Cu (522,0 нм) и Fe (438,35 нм) от количества импульсов для различных углов воздействия лазерных импульсов на мишень приведены на рис. 1. Толщина медной пластинки 0,23 мм. Изменяя количество лазерных импульсов в серии, возможно целенаправленно менять состав прекурсоров для изготовления тех или иных нанопленок.



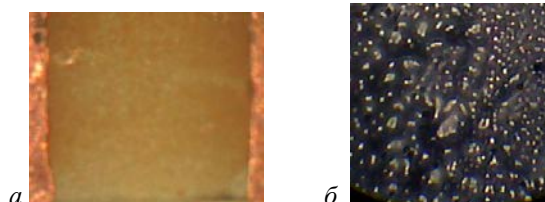
а – угол 90° ; б – угол 70°

Рисунок 1 – Зависимость интенсивности линий от количества импульсов

Как видно из полученных данных, при увеличении угла интенсивность линии Cu (522,0 нм) падает, а скорость пробивки медной пластинки уменьшается.

Используя полученные выше результаты, мы провели исследования процессов напыления нанопленок. Напыление на поверхность фольгированного стеклотекстолита с вытравленными полосками, наночастиц оксидов меди и железа проводилось при воздействии серии из 150 сдвоенных лазерных импульсов на мишень, установленную под углом 70 градусов к падающему излучению, и подложке на расстоянии 3 мм. Энергия импульсов излучения 53 мДж, интервал между импульсами 10 мкс.

Изображения поверхности мишени с напыленными пленками, полученные с помощью микроскопа Webbers (увеличение в 50 раз), приведены на рис. 2а. Размер кадра 2 мм. Изображения поверхности стекла с нанесенными пленками 3 сериями по 150 лазерных импульсов, увеличенные с помощью микроскопа Биолом в 375 раз, приведены на рис. 2б.



а – 3×150 импульсов; б – напыление на стекле, увеличение $\times 375$

Рисунок 2 – Изображение поверхности мишени после напыления оксидов меди сериями сдвоенных лазерных импульсов

Предварительные проведенные эксперименты показали, что использование только 150 импульсов не обеспечивает хорошего качества пленки. Необходимо использовать порядка 3 напылений по 150 импульсов с небольшим перекрытием пятен на мишени. На рис. 2б черная пленка – оксид меди CuO. Средний размер

шариков составляет примерно 1–2 мкм. Островки CuO состоят из кристаллитов размером 20–30 нм. Светлые участки поверхности можно отнести к оксидам железа.

Начальное сопротивление пленки более 200 МОм, при комнатной температуре. Пленка хорошо реагирует на пары NH₃.

Таким образом, выполненные спектроскопические исследования характеристик приповерхностной лазерной плазмы, образуемой при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на гибридную мишень, состоящую из последовательно склеенных пластинок из меди и железа, позволили определить оптимальное количество и параметры лазерных импульсов (энергию, интервал между импульсами), позволяющими напылять газочувствительные нанопленочные резисторы из легированных железом оксидов меди, с достаточно хорошими механическими и чувствительными характеристиками, методом абляции сдвоенными лазерными импульсами на подложку из фольгированного стеклотекстолита в атмосфере воздуха.

Список литературы

1. Морфология, оптические и адсорбционные свойства слоев оксидов меди, осажденных из растворов комплексных соединений / Л. Б. Матюшкин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51, вып. 5. – С. 615–619.
2. Обвинцева, Л. А. Полупроводниковые металлооксидные сенсоры для определения химически активных газовых примесей в воздушной среде / Л. А. Обвинцева // Рос. хим. журн. – 2008. – Т. LII. – С. 110–118.

The possibilities of obtaining gas-sensitive nanofilm resistors from copper oxides doped with iron, with sufficiently good mechanical and sensitive characteristics, by ablation with double laser pulses of a hybrid target consisting of sequentially glued plates of copper, zinc and iron on a substrate of foiled fiberglass in an air atmosphere have been studied. The influence of the pulse interval, pulse energy and their number on the processes with the purposeful formation of the component and charge composition of the laser torch directed to the substrate has been studied.

Рутковская Любовь Сергеевна, магистрант кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, iuba.rutkovskaya@gmail.com.

Красноперов Никита Николаевич, студент 3 курса физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь.

Коваленко Максим Николаевич, заведующий лабораторией физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, kovalenkom@bsu.by.

Научный руководитель – *Коваленко Максим Николаевич*, заведующий лабораторией физического факультета Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь, kovalenkom@bsu.by.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. ИЗУЧЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Mazheika S., Maltanova H., Ovodok E., Poznyak S. Piezoresistive properties of epoxy composite materials doped with carbon nanotubes	3
Акулич В. А., Лапцевич Н. А., Патапович М. П. Процесс напыления тонких плёнок химических элементов на твёрдую поверхность при воздействии сдвоенных лазерных импульсов	5
Анучин С. Н., Смергина А. А. Спектральные свойства комплекса включения феналемина 160 с β -циклодекстрином	7
Белов И. П. Спектрально-люминесцентные свойства бензтиазолового красителя	10
Белов М. М. Влияние облучения ионами гелия на структурно-фазовое состояние многокомпонентного твёрдого раствора на основе V-Nb-Ta-Ti	12
Богдевич Д. И. Влияние ультрафиолетового излучения на тонкую структуру алкидных лакокрасочных покрытий	15
Веремей И. С. Структурно-фазовые изменения многослойных плёнок ZrN/a-ZrCu, облучённых ионами гелия	17
Гревцов Н. Л. Буферные слои пористого кремния для гетероэпитаксии нитрида галлия	20
Деменчук Н. О. Структурно-фазовые превращения в меди, обработанной плазменными потоками, при высокотемпературном отжиге	23
Довгалиук А. С. Структурно-фазовое состояние и кинетика окисления вольфрама, легированного медью, при воздействии высокоэнергетического плазменного потока	25
Живолковская А. Д., Григорьева Д. В., Горудко И. В. Новый синтетический антимикробный пептид медицинской пиявки <i>Hirudo medicinalis</i> индуцирует изменения трансмембранного потенциала нейтрофилов	28
Журавлёва Я. Ю. Электротранспортные свойства двойных перовскитов Nd (Ba,Ca)(Fe,Co,Cu) ₂ O _{5+δ}	30
Завадский М. Д. Дидактические возможности использования интерактивной презентации в процессе решения физических задач	32
Зерница Д. А. Формирование структуры и особенности протекания распада в фольгах системы «олово–цинк», полученных методом высокоскоростной кристаллизации из расплава	35
Карпач П. В., Журавская К. В. Спектры ИК-поглощения и структурные превращения фотохромного диарилэтена в плёнках	37
Комяк К. Г. Поляризационные свойства дифракционных жидкокристаллических структур	40
Красноперов Н. Н. Взаимодействие индотрикарбоцианиновых красителей с белками сыворотки крови человека	43
Лабода Н. В., Тимошенко А. Г. Спектральные свойства производного родамина Б в присутствии ионов железа	46
Лискович А. А. Роль температуры Ni-Cr мишени на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы	48
Лоташинский А. С. Изучение процессов комплексообразования молекулы Тиофлавина Т с ДНК	51
Малец М. А., Соколовский В. С., Патапович М. П. Послойный анализ наноплёнок олова, напылённых сдвоенными лазерными импульсами на поверхность оцинкованного железа	54
Мартынович С. А. Миллисекундный электрический взрыв тонких проводников из меди и графита в воде	56
Нуретдинов С. А. Современные методы получения наночастиц для модификации композиционных материалов	58
Пантелеева Е. П. Электрически управляемые планарные жидкокристаллические элементы с системой переключаемых волноводов	61
Петух А. Б. Структура и фазовый состав поверхностного слоя сплава ВТ6, легированного атомами меди под действием компрессионных плазменных потоков	64
Плигин Е. И. Ферстеровский перенос энергии между Тиофлавином Т и его производной при добавлении амилоидных фибрилл	66
Пригодич В. В., Якимчук Д. В., Демьянов С. Е., Хубежов С. А., Силаев И. В. Получение диоксида титана с заданной морфологией с использованием метода терморезистивного окисления	68
Прокопенко Т. А., Зажогин А. П., Нечипуренко Н. И. Морфологическая структура, распределение кальция в дегидратирующих каплях плазмы у пациентов с цереброваскулярными заболеваниями	71
Пухтеев А. О., Харитончик Р. А., Орехова Н. А. Разработка методики определения метеоритов типа Брагин методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектromетрии	73
Пухтеев А. О., Харитончик Р. А., Орехова Н. А. Исследования химического состава гранитов методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектromетрии	75

Рагожкин Н. С. Влияние длительности облучения ионизирующим излучением на коэффициент трения эластомеров общего назначения	78
Роговая И. С. Многокомпонентное легирование поверхностного слоя титана воздействием компрессионных плазменных потоков	79
Руденик Н. Н. Влияние содержания кремния на эрозию поверхности силуминового сплава при воздействии компрессионных плазменных потоков	81
Саидов А. С., Раззоков А. Ш., Сапаров Д. В., Усмонов Ш. Н., Кошчанова Д. Э. Получение твёрдых растворов $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ и $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ из жидкой фазы	84
Самарина М. А. Синтез и кристаллическая структура плёнок оксидов олова с включениями Ni, Co и Fe	86
Смоляков А. А. Спектроскопическое и электрохимическое исследование дикатион-радикалов индотрикарбодиаминового красителя	88
Степанюк Н. А. Метод оценки радиационной стойкости высокоэнтропийных сплавов	90
Столяр И. А. Структурно-фазовые превращения в быстрозатвердевших фольгах сплава Al–Mg–Zr при отжиге	92
Тетеруков Е. В. Структурные свойства плёнок InSb, полученных методом взрывного термического испарения на подложке GaAs (100)	95
Толкачёв С. А. Структурно-фазовое состояние и механические свойства системы (Ti,Cu)N/эвтектический силумин, подвергнутой воздействию компрессионных плазменных потоков	97
Точеный В. А., Шевчик Е. В. Оптические характеристики тонкоплёночных покрытий из политетрафторэтилена	100
Утепова Д. С., Купчишин А. И. Влияние ультрафиолетового излучения на свойства полиметилметакрилата	102
Харитончик Р. А., Пухтеев А. О., Орехова Н. А. Анализ химического состава диоритов методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии	104
Холод В. М. Структурно-фазовое состояние карбида кремния, облучённого низкоэнергетическими ионами криптона	106
Чайковская А. А. Квантовые точки AIS и влияние pH на их спектральные свойства в водных растворах	109
Чернявская А. В., Дорошко И. А. Твёрдые частицы в сверхзвуковом потоке	111
Шершень В. С., Старухин А. С., Павич Т. А., Романенко А. А., Кальвинковская Ю. А., Бушук С. Б. Водорастворимые комплексы порфиринов с циклосахаридами	115
Шилько В. М. Активация алюминия для получения водорода на основе сплава алюминий – висмут	118

Секция 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФИЗИКЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Атамуратова З. А. Идентификация деградации, обусловленной электрическим стрессом, в МОП транзисторах по поведению боковой ёмкости	121
Аширов А., Бобоев Ф., Аскарова Ш., Каримов Х., Жаббарова Я., Кутлиев У. Малоугловое рассеяние ионов Ne^+ с поверхности тонкой плёнки $\text{SiO}_2(001)\langle 110 \rangle$	124
Вашина В. В. Разработка программного обеспечения для обработки данных биологических объектов, полученных методом биоимпедансометрии	127
Волорова Н. А., Анисимов В. Я., Протасов А. П., Стаселько И. Д., Позняков Т. Д. Архитектура блока обработки изображений (ISP) на базе процессора M1	128
Гревцов Н. Л. Моделирование характеристик эмиттеров электростатических микродвигателей для наноспутников	131
Губаревич И. К. Расчёт концентрации электронов в пароплазменном облаке, образующемся при лазерном воздействии на материалы	134
Длубаковская А. В. Компьютерная диагностика поясничного отдела позвоночника	137
Жукевич М. А. Структура и программная реализация обучающих программ по физике	139
Жумабаев Б. Влияние типа рекомбинации на параметры кремниевых концентраторных солнечных элементов	141
Каримов М. К., Кутлиев У. О., Отабаев М. У., Отабаева К. У., Давлетова П. Энергетическое распределение рассеянных ионов при бомбардировке дефектной поверхности InP(001)	143
Карпович Э. А. Расчёт температуры на поверхности полиметилметакрилата, подвергающегося действию лазерного импульса	146
Лукашевич С. В., Воронко А. С. Нейросеть на языке программирования Python	148
Морозик Е. С. Ученик как термодинамическая система	150
Ошурко Д. А., Павлова Н. А. Методы Монте-Карло для моделирования канонического ансамбля	153

Прудников Н. А., Крук Н. Н. Использование эквивалентной электрической схемы для анализа кольцевых токов в молекуле порфина	156
Сазанов А. В. Молекулярно-динамические исследования процесса кристаллизации и роста в сильно переохлаждённых газовых гидратах	159
Сапаров Х. Моделирование эффекта саморазогрева в МОП транзисторе с различными геометрическими размерами на основе двумерного дихалькогенида молибдена	161
Стречко А. О. Радиационное набухание многокомпонентных сплавов и его количественное описание с помощью алгоритмов компьютерного зрения по изображениям просвечивающей электронной микроскопии	164
Фархутдинов А. Р. Исследование однокомпонентной системы Леннарда-Джонса при низких скоростях охлаждения методами молекулярной динамики и регрессионного анализа	165
Хайруллина Р. Р. Локальные структурные особенности равновесного и переохлаждённого расплава никеля	166
Халиллоев М. Моделирование амплитуды случайного телеграфного шума в беспереходных FinFET транзисторах с различной формой канала.....	169
Чернявская А. В. Значимые факторы эффективной теплопроводности бинарных композитов	171
Юнусов М. Б., Хуснутдинов Р. М. Электронные свойства газовых гидратов: результаты моделирования из первых принципов	174
Ярошевич Я. С., Хохлёнок В. А., Рапчинский В. А., Мирон Н. И., Гремчук В. А. Амбиграммы – оптические иллюзии	177

Секция 3. ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Ayad Merawiy Abdullah. Biometric system with code-offset construction	179
Аплевич Д. В. Разработка структуры гибридной системы теплоснабжения на основе солнечного гелиоколлектора и электрического котла	180
Аплевич Д. В. Методика расчёта гибридных систем теплоснабжения	182
Белаец А. Д. Мини-клавиатура на основе микроконтроллера	185
Бобнис А. Ч. Цифровые подстанции и умные энергосети	187
Бойко А. А., Автух К. В. Однофазные асинхронные двигатели	190
Бойко А. А., Автух К. В. Режимы работы асинхронной машины	193
Бородулин Т. А. Аналоговый блок акустических эффектов	196
Бочко М. А. Модернизация экспериментальной вакуумной системы для демонстрации физических явлений и процессов	198
Галимов Е. О. Ксеноновые лампы, используемые в автомобилях	200
Галимов Е. О. Гидроэнергетика в Беларуси	203
Гремчук В. А., Мальцев О. А. Автотрансформатор. Устройство, принцип действия	206
Гремчук В. А., Ярошевич Я. С., Рапчинский В. А., Мирон Н. И., Бойко А. А. Постановка демонстрационного эксперимента в школе на тему оптических иллюзий	208
Дарипапа В. С., Дежиц П. Т. Метрологическая оценка термометров сопротивления	210
Дежиц П. Т., Дарипапа В. С. Метрологическая оценка средств измерения плотности	212
Дубровник М. А. Гибридная система солнечного теплоснабжения	214
Жинко Н. А. Оборудование котельной административно-жилого комплекса	216
Журавская К. В. Типовые технологические процессы в теплоэнергетике на примере Гродненской теплоэлектроцентрали-2	218
Козловский В. В., Брезин А. Ю., Скрундь В. А. Пульсоксиметр на основе датчика MAX30102	219
Ламан К. С. Метод бесконтактной диагностики радиоэлектронной аппаратуры	221
Макей П. Р. Программное обеспечение лабораторного DDS-генератора	222
Мальцев О. А., Гремчук В. А. Устройство трёхфазных трансформаторов	224
Марущак Ю. И., Ясинская Н. Н., Петюль И. А., Ленько К. А. Влияние площади контакта материалов на коэффициент тангенциального сопротивления тканей	227
Мешкевич Е. А. Фотоэнергетика и экологические проблемы	230
Пузырёв М. В., Ступакевич В. Ю., Шульган Н. И. Физические процессы в лазерно-плазменном источнике при осаждении алмазоподобной углеродной плёнки	233
Савва К. К., Макей П. Р. Прецизионный DDS-генератор синусоидального сигнала для лабораторного практикума	236
Сакович Е. О. Анализ ЭКГ в MATLAB	237
Тихон О. И., Бондаренко А. С. Исследование температуры полупроводниковых пластин в реакционно-рярядной камере СВЧ плазмотрона резонаторного типа	239

**Секция 4. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧЕНИЯ
ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

Гайдукевич А. В. Решение физических задач методом размерностей	242
Глебович В. И. Методические основы формирования компетенций по работе с графиками в процессе обучения физике	243
Готовчиц Н. М. Использование презентаций для изучения электричества и оптики в курсе физики средней школы	246
Кирко А. С. Использование комплексных графических задач по физике как средство диагностики и контроля знаний	247
Лоташинская В. А. Энергетический обмен человека на основе антропометрических и биоимпедансных данных	249
Омельченко З. А. Основные методы получения белого свечения в светодиодах.....	250
Шикеля Д. В. Методика обучения физике через сюжетную линию героев настольной ролевой игры	252
Шумская М. С. Солнечная энергетика в Республике Беларусь	255
Завадская В. М. Научно-методический анализ раздела «Оптика» для медицинских специальностей	258
Рутковская Л. С., Красноперов Н. Н., Коваленко М. Н. Исследование процессов получения газочувствительных наноплёночных резисторов из оксидов меди, легированных железом, при лазерном распылении меди и железа в атмосфере воздуха	260