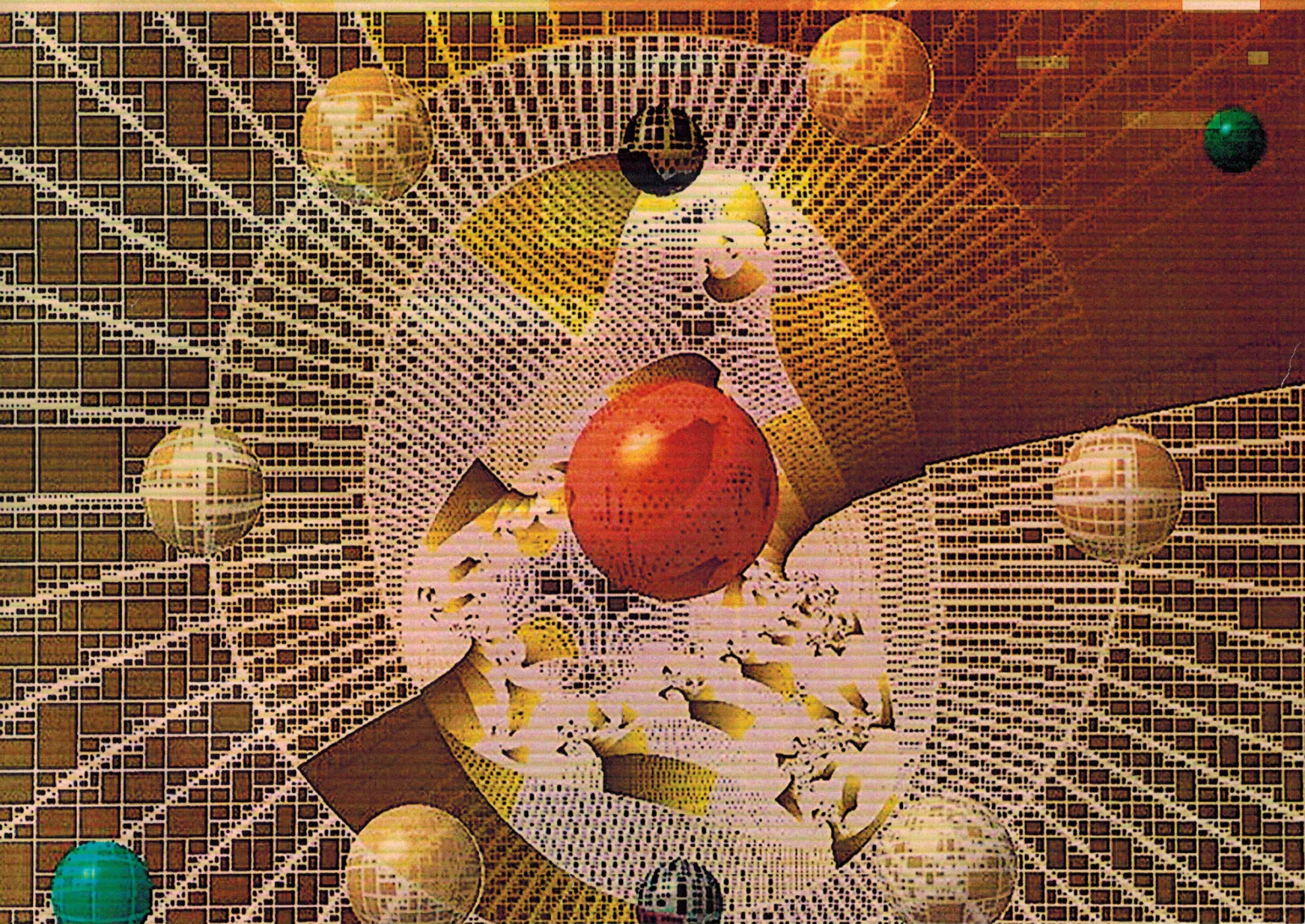


ФИЗИКА:

**фундаментальные
и прикладные
исследования,
образование**



ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет»

**ФИЗИКА: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБРАЗОВАНИЕ**

*XXI региональная научная конференция,
25 – 28 сентября 2023 г.*

Благовещенск
2023

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Плутенко А.Д., доктор техн. наук, профессор, ректор, АмГУ

Филимонов А.В., доктор физ.-мат. наук, советник ректора, директор НОЦ «ФНК», СПбПУ

Стукова Е.В., доктор физ.-мат. наук, профессор, и.о. зав. кафедрой физики, АмГУ

Барышников С.В., доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры физического и математического образования, БГПУ

Милинский А.Ю., доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры физического и математического образования, БГПУ

Римлянд В.И., доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой физики, ТОГУ

Пячин С.А., доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой «Физика и теоретическая механика», ДВГУПС

Мазур И.А., канд. физ.-мат. наук, руководитель научно-исследовательской лаборатории МКП, ТОГУ

Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование: Материалы XXI региональной научной конференции. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2023.

В сборнике представлены материалы XXI региональной научной конференции «Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование», обобщающие результаты работы преподавателей и аспирантов вузов, сотрудников академических институтов по фундаментальным проблемам физики и физического образования. Материалы сборника предназначены для инженеров, научных сотрудников, докторантов, аспирантов и студентов старших курсов, занимающихся научной работой.

ISBN 978-5-93493-419-5

DOI: 10.22250/9785934934195

Секция 1

Теоретическая физика и вычислительная математика

УДК 537.9, 004.94

КВАНТОВЫЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ MoS₂

С.С. Булах¹, А.Н. Чибисов^{1,2}

¹Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

²Вычислительный центр ДВО РАН (г. Хабаровск)

2018100518@pnu.edu.ru

Рассмотрена возможность моделирование квантово-механической системы на основе структуры MoS₂. Составлены тестовые структуры MoS₂ и плоская структура на основе MoS₂. Рассчитана электронная плотность транслированной структуры. Полученные результаты можно применить для развития нанoeлектроники и производства квантовых транзисторов.

QUANTUM COMPUTER BASED ON THE MoS₂ STRUCTURE

S.S. Bulakh¹, A.N. Chibisov^{1,2}

¹Pacific National University (Khabarovsk)

²Computing Center, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences (Khabarovsk)

2018100518@pnu.edu.ru

In this paper, the authors considered the possibility of modeling a quantum mechanical system based on the MoS₂ structure. Compiled test structures of MoS₂ and a planar structure based on MoS₂. The electron density of the translated structure was calculated. The results obtained can be further applied to the development of nanoelectronics and the production of quantum transistors.

DOI:10.22250/9785934934195_3

В настоящее время высокий интерес проявляют к исследованиям свойств двумерных материалов, поскольку их можно использовать для создания квантовых вычислителей на основе кубитов [1].

Сульфид молибдена пригоден в качестве кубита благодаря способности изменять свою электронную структуру при воздействии давления, что позволит контролировать его электронное состояние. Метод использования дефектов в структуре сульфида молибдена предполагает создавать в структуре вакансии серы или молибдена. Преимущество данного метода в том, что дефекты могут быть локализованы в малом объеме, позволяя создавать кубиты с высокой точностью. Однако требуется точно контролировать создание дефектов [2; 3].

В данной работе представлены результаты квантово-механических расчетов атомной и электронной структуры для 2D-интерфейса на основе MoS₂.

Расчеты проводились с использованием пакета программ Quantum Espresso, в основе которого лежат теория функционала плотности и метод псевдопотенциала [4; 5].

Тестовые расчеты для элементарной структуры проводились с однородной сеткой k-точек, построенной по схеме Монкхоста–Пэка. Расчеты осуществлялись с использованием сетки k-точек $6 \times 6 \times 1$. Также в расчетах учитывалось спин-орбитальное неколлинеарное взаимодействие.

Для исследования 2D-интерфейса атомной и электронной структуры использовали структуры на основе молекулы дисульфида молибдена. На рис. 1 представлена элементарная ячейка дисульфида молибдена, состоящая из двух атомов серы и одного атома молибдена.

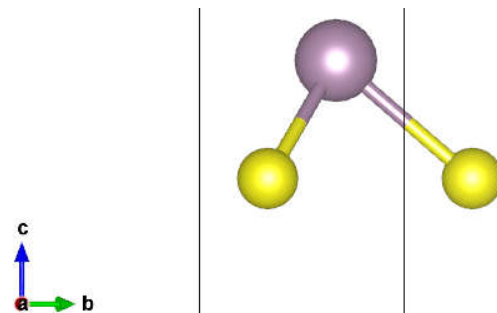


Рис. 1. Модель элементарной ячейки MoS_2 .

Далее элементарная ячейка транслировалась по осям X и Y с увеличением параметров a и b в 4 раза. В результате получилась суперячейка из 48 атомов (16-молибден, 32-серы). На рис. 2 видно, что слой молибдена находится между слоями серы.

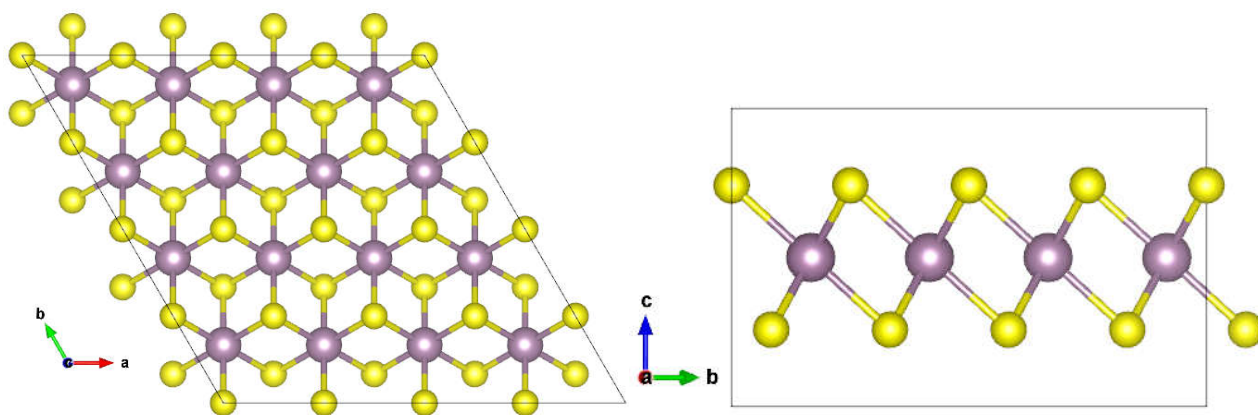


Рис. 2. Суперячейка MoS_2 .

Затем из центра модели изъяли один атом серы, создав свободную вакансию внутри структуры. На рис. 3 представлен новый вид модели.

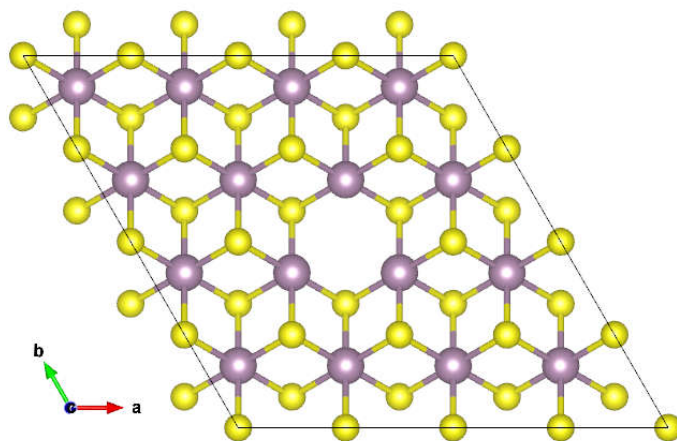


Рис. 3. Модель MoS_2 с вакансией серы.

Далее рассчитали распределение электронной плотности в системе с вакансией. На рис. 4 хорошо видна плотность распределения электронов по структуре.

В работе проведены квантово-механические расчеты атомной и электронной структуры 2D-интерфейса на основе дисульфида молибдена. Для расчетов использована теория функционала плотности с учетом неколлинеарной намагниченности в приближении спин-орбитального взаимодействия. В ходе работы был протестирован псевдопотенциал для исследуемых материалов, рассчитано распределение электронной плотности.

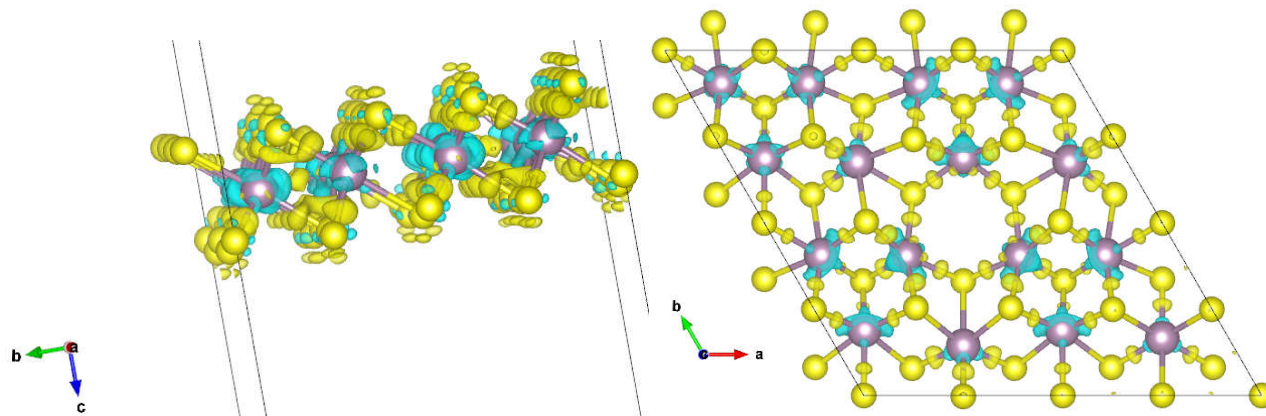


Рис. 4. Распределение электронной плотности.

В дальнейшем планируется провести исследование с изменением намагниченности системы и найти ее полный потенциал.

-
1. Awschalom D. D., Hanson R., Wrachtrup J. & Zhou B. B. Quantum technologies with optically interfaced solid-state spins // Nat. Photonics. – 2018. – 12 – P. 516–527.
 2. Ma H., Sheng N., Govoni M. & Galli G. First-principles studies of strongly correlated states in defect spin qubits in diamond // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2020. – 22 – P. 25522–25527.
 3. J. Pawłowski D., Zebrowski and S. Bednarek Valley qubit in a gated MoS₂ monolayer quantum dot // Phys. . – 2018. – Rev. –B 97. – P. 155412.
 4. Quantum ESPRESSO user manual. <https://www.quantum-espresso.org/resources/users-manual>
 5. S. Baroni and P. Giannozzi. Towards a unified description of electronic and phononic properties of solids // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2017. – Vol. 29. –№. 46.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ СРЕДСТВАМИ ПАКЕТА COMSOL MULTIPHYSICS

Д.Л. Ворона, И.В. Верхотурова

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

rusia@mail.ru

Разработанная модель процесса теплопередачи с помощью интерфейсов COMSOL Multiphysics, представленная в данной работе, позволяет получить температурный профиль экранно-вакуумной теплоизоляции. По температурному профилю определена температура первого экрана, необходимая для вычисления коэффициента удельного термического сопротивления и результирующего теплового потока через экранно-вакуумную теплоизоляцию. Показано, что полученные результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными.

MODELING THE HEAT TRANSFER PROCESS IN SHIELD-VACUUM THERMAL INSULATION USING THE COMSOL MULTIPHYSICS PACKAGE

D.L. Vorona, I.V. Verkhoturova

Amur State University (Blagoveshchensk)

rusia@mail.ru

The developed model of the heat transfer process using the COMSOL Multiphysics interfaces, presented in this paper, makes it possible to obtain the temperature profile of the screen-vacuum thermal insulation. From the temperature profile, the temperature of the first screen is determined, which is necessary to calculate the coefficient of specific thermal resistance and the resulting heat flux through the screen-vacuum thermal insulation. It is shown that the obtained simulation results are consistent with the experimental data.

DOI:10.22250/9785934934195_6

Экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ) – эффективное средство пассивного терморегулирования космического аппарата. Конструкция ЭВТИ состоит из внешнего и внутреннего облицовочных слоев, между которыми расположен мат ЭВТИ, состоящий из n -го количества экранов, разделенных низкотеплопроводным материалом [1].

Материалы, используемые для изготовления ЭВТИ, достаточно разнообразны, для них должны быть известны определенные терморadiационные характеристики, необходимые для расчета параметров, определяющих эффективность работы тепловой изоляции. Очень важно знать при расчете параметров эффективности ЭВТИ и предварительной оценке ее работоспособности значение температуры первого экрана мата ЭВТИ. Кроме того, оценка значения этой температуры при разработке новой конструкции ЭВТИ необходима, чтобы оценить влияние «парникового эффекта», возникающего из-за воздушного зазора между облицовочным слоем и первым экраном. Наличие зазора приводит к повышению рабочей температуры первого экрана (от 110 °С до 115 °С), при длительной эксплуатации ЭВТИ в таких условиях происходит разрушение этого и последующих экранов. Однако не всегда возможно прямое измерение значения этой температуры. В этом случае использование средств компьютерного моделирования позволяет определить температуру первого экрана, что дает возможность

предварительно оценить эффективность новых конструкций ЭВТИ без проведения экспериментальных измерений [2 – 4].

В нашей работе представлена модель процесса теплопередачи в ЭВТИ при наличии внешнего теплового источника, разработанная с помощью средств COMSOL MultiPhysics. Материалы для модели ЭВТИ выбраны из встроенной библиотеки материалов COMSOL, аналогичные тем, что описаны в работе [2], для последующего сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными этой работы. При моделировании учитывалось, что на облицовочный слой ЭВТИ воздействует внешний тепловой источник, представленный прямым солнечным тепловым потоком с плотностью 1400 Вт/м^2 . При моделировании считалось, что космический аппарат находится на «солнечной» стороне орбиты и это дает известное значение температуры облицовочного слоя. Предполагалось, что процесс теплопередачи в ЭВТИ осуществляется механизмами излучения и теплопроводности.

Для разработки модели выбран тип моделируемого пространства 3D. Моделирование процесса теплопередачи в программе COMSOL Myltipysics проводилось с использованием интерфейсов Heat Transfer in Solids и Surface-to-Surface Radiation, связанных мультифизической связкой Heat Transfer with Surface to Surface Radiation. Исследование теплопередачи осуществлялось за временной промежуток, равный пяти часам. Значение временного промежутка моделирования связано с процессом вакуумирования ЭВТИ в космическом пространстве.

Процесс теплопередачи исследовался на нескольких моделях. Модель 1 – ЭВТИ, при отсутствии воздушных зазоров между экранами, состоящая из: облицовочного слоя; тонких металлизированных слоев, расположенных над поверхностью каждого слоя экрана ЭВТИ; десяти экранов мата ЭВТИ; тонкого прокладочного материала, который расположен между каждым экраном мата ЭВТИ. Модель 2 – построение аналогично модели 1, но присутствует воздушный зазор между облицовочным и первым экраном. Модель 3 – построена аналогично модели 2, но между всеми экранами ЭВТИ есть воздушные зазоры.

На рис. 1 представлен полученный моделированием температурный профиль модели 1 (отсутствие воздушных зазоров между экранами).

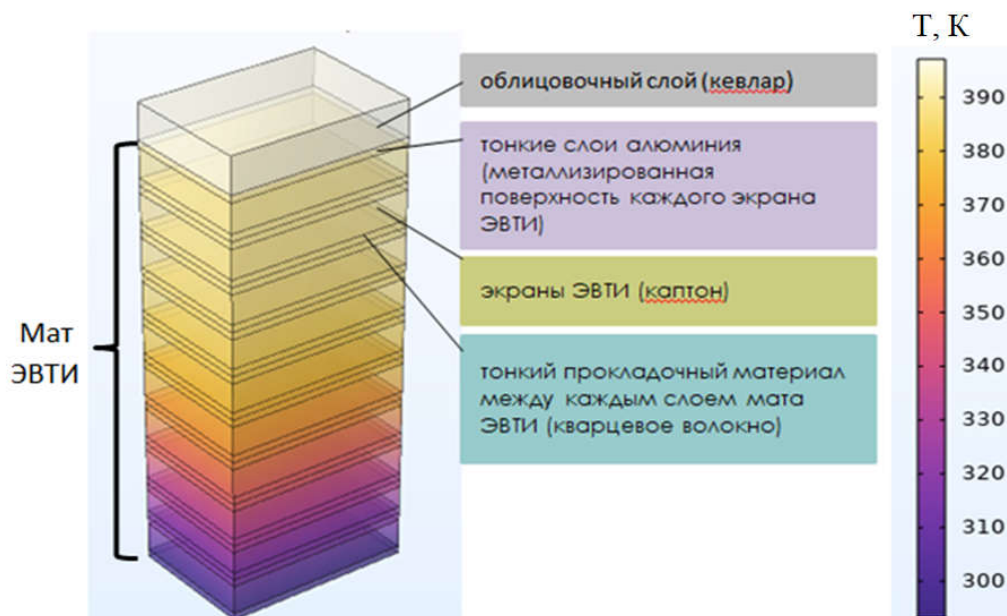


Рис. 1. Температурный профиль ЭВТИ. Модель 1.

Температурный профиль показывает распределение температуры от облицовочного слоя, внешняя поверхность которого подвергается воздействию солнечного теплового потока, до последнего экрана мата ЭВТИ, температура которого должна соответствовать температуре защищаемой поверхн-

ости (20 ± 5) °С. По полученным температурам первого и последнего экранов произвели вычисление параметров, определяющих эффективность ЭВТИ (таблица).

Рабочие параметры ЭВТИ

Рабочие параметры ЭВТИ	Значения параметров, полученные для модели 1	Экспериментальные данные
Температура первого экрана мата ЭВТИ T , °С	108	106 [2]
Результирующий тепловой поток через ЭВТИ $q_{рез}$, Вт/м ²	2,3	1,17 [2]
Удельное термическое сопротивление $R_{уд}^э$, (м ² ·К)/Вт	38,3	от 30 до 250 [1]

Видно, что полученные результаты моделирования близки к экспериментальным данным работ [1; 2].

Для устранения перегрева экраны ЭВТИ перфорируют, что приводит к образованию микронеровностей, в которых могут оставаться газонаполненные участки. Например, такой воздушный зазор остается между облицовочным слоем и первым экраном. Поэтому был рассмотрен процесс теплообмена в модели ЭВТИ при наличии воздушного зазора только между облицовочным слоем и первым экраном – модель 2 (рис. 2). Между остальными экранами в данной модели воздушные слои отсутствовали.

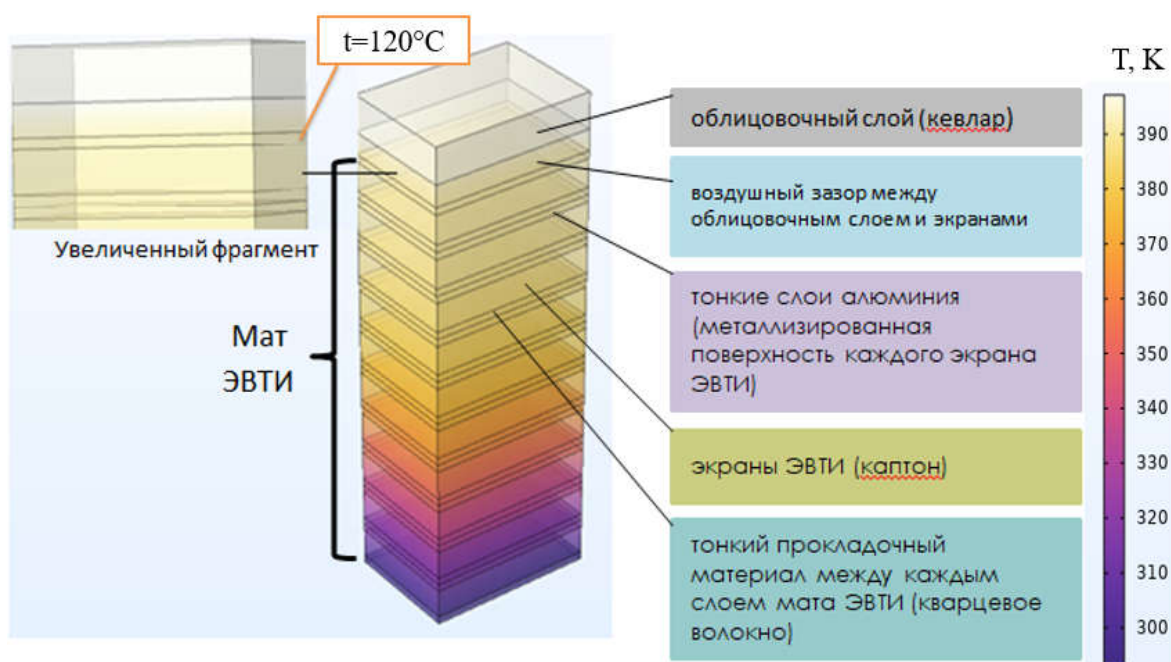


Рис. 2. Температурный профиль ЭВТИ. Модель 2.

По результатам моделирования температура первого экрана равна 120 °С. Таким образом, наличие воздушного зазора приводит к возникновению «парникового» эффекта. Что вызывает превышение температуры первого экрана над допустимым значением интервала рабочих температур и при длительной эксплуатации ЭВТИ вызовет разрушение экранов.

На рис. 3 представлен полученный моделированием температурный профиль модели 3, при наличии воздушных зазоров между экранами. Данная модель позволяет определить, до какого экрана будет происходить перегрев до момента полного вакуумирования ЭВТИ. По результатам моделирования видно, что наличие воздушных зазоров между экранами приводит к перегреву первого экрана на 35 °С выше верхней границы диапазона его рабочих температур. Этот перегрев при данном подборе материалов и конструкции ЭВТИ распространяется вплоть до шестого экрана.

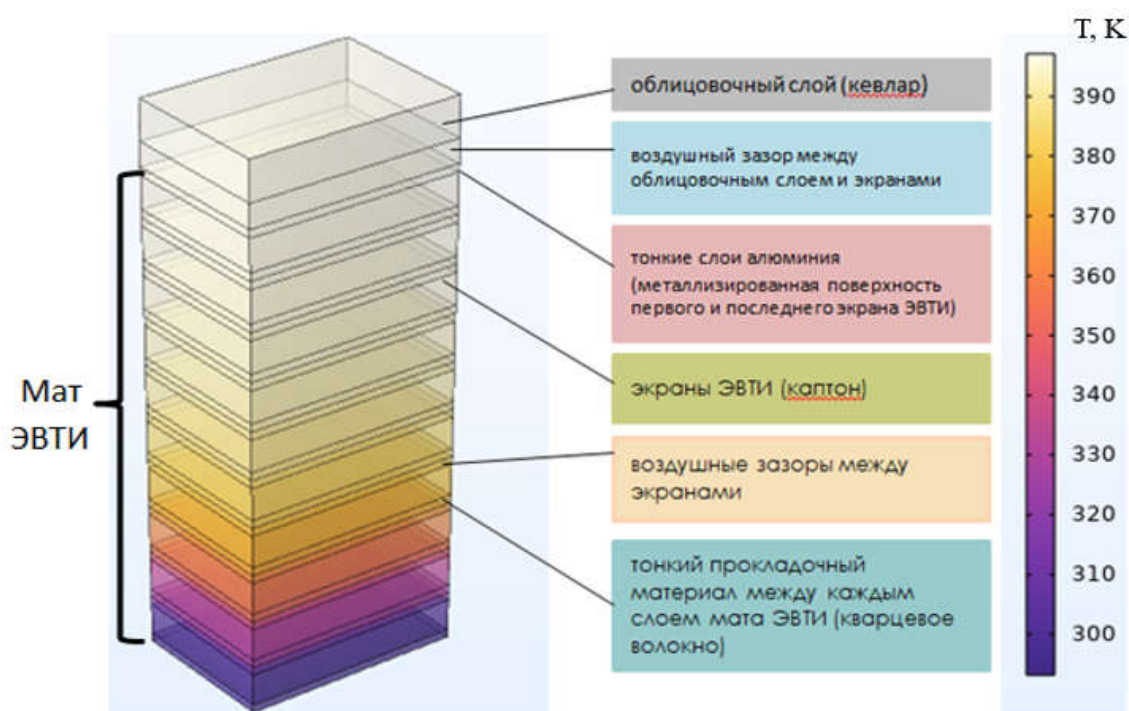


Рис. 3. Температурный профиль ЭВТИ. Модель 3.

Разработанная модель процесса теплопередачи с помощью интерфейсов COMSOL Multiphysics позволяет получить температурный профиль экранно-вакуумной теплоизоляции. По температурному профилю исследуемых моделей определена температура первого экрана ЭВТИ, необходимая для вычисления коэффициента удельного термического сопротивления и результирующего теплового потока через ЭВТИ. Показано, что полученные результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными. Таким образом, средства пакета COMSOL Multiphysics позволяют подобрать подходящие материалы для конструкции ЭВТИ, смоделировать одновременный процесс теплообмена несколькими видами и дать предварительную оценку эффективности конструкции ЭВТИ без прямого измерения теплофизических характеристик.

1. Атамасов В.Д. и [др.] Система обеспечения теплового режима космического аппарата [Электронный ресурс]: учеб. пособ. – СПб: Балт. гос. тех. ун-т, 2017. – 104 с. – Режим доступа: <https://reader.lanbook.com/book/121867#3>.

2. Пат. 2397926 Российской Федерации МПК В64G 1/58, 2006.01. Экранно-вакуумная теплоизоляция космического аппарата с внешним комбинированным покрытием [Электронный ресурс] / В.Ф. Аристов; ООО «Научно-исследовательский институт космических и авиационных материалов» – № 2008125256/11; Заявл. 24.06.2008; опубл. 27.08.2010, бюл. № 24. – Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2397926C2/ru>.

3. Танасиенко Ф.И. Математическое моделирование жидкостных систем терморегулирования перспективных космических аппаратов [Электронный ресурс]: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.14 / Ф.И. Танасиенко; Сиб. гос. ун-т. науки и технологии им. академ. М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2019. – 157 с. Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/matematiceskoe-modelirovanie-zhidkostnykh-sistem-termoregulirovaniya-perspektivnykh-kosmich>.

4. Крайнова И. В. Разработка и идентификация математических моделей теплопереноса в экранно-вакуумной теплоизоляции космических аппаратов [Электронный ресурс]: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.14 / И.В. Крайнова; МАИ. – М., 2015. – 90 с. – Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-i-identifikatsiya-matematicheskikh-modelei-teploperenosa-v-ekrano-vakuumnoi-teplo>.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ HORSE

Е.В. Демьяненко, А.И. Мазур*Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)**k.v.demyan@gmail.com*

В работе реализован альтернативный метод решения уравнений HORSE. Метод апробирован на модельной задаче с потенциалом Вудса-Саксона. Исследована сходимость метода, показано, что сходимость достигается при меньшем количестве уравнений по сравнению с HORSE.

ALTERNATIVE METHOD FOR SOLVING HORSE EQUATIONS

E.V. Demyanenko, A.I. Mazur*Pacific National University (Khabarovsk)**k.v.demyan@gmail.com*

The paper implements an alternative method for solving HORSE equations. The method has been tested on the model problem with Woods-Saxon potential. The convergence of the method is investigated, it is shown that convergence is achieved with fewer equations compared to HORSE.

DOI:10.22250/9785934934195_10

Введение

Одним из эффективных методов исследования влияния непрерывного спектра является J-матричный подход. Первоначально он разработан для задач атомной физики [1; 2] и показал себя достаточно точным в расчетах рассеяния электронов атомами [3] и фотоионизации [4]. Независимо этот подход развивался и для задач ядерной физики [5 – 8]. Наиболее полно данный формализм с использованием осцилляторного базиса, известный как HORSE (Harmonic Oscillator Representation of Scattering Equations), представлен в работе [9]. HORSE позволяет решить задачу в осцилляторном представлении теории рассеяния и имеет точное решение при матрице гамильтониана конечного размера. Но задачу можно решить по-другому. В работе реализован альтернативный подходу HORSE метод, основанный на решении алгебраической системы уравнений HORSE при каждом значении энергии. Оказалось, что для достижения сходимости результатов в этом случае достаточно решить меньшее по сравнению с HORSE количество уравнений.

Метод HORSE и решение уравнений в альтернативном методе

Рассмотрим основные уравнения HORSE на примере одноканального рассеяния частицы массой m на потенциале $V(r)$ в парциальной волне с орбитальным моментом l . Радиальная функция $u_l(E, r)$ состояния рассеяния разлагается по полному набору осцилляторных функций $R_{nl}(r)$ [9]:

$$u_l(E, r) = \sum_{n=0}^{\infty} a_{nl}(E) R_{nl}(r). \quad (1)$$

Волновые функции $a_{nl}(E)$ в пространстве осцилляторных функций являются решением бесконечной системы уравнений

$$\sum_{n'=0}^{\infty} (H_{nn'}^l - \delta_{nn'} E) a_{n'l}(E) = 0, \quad n = 0, 1, \dots, \infty. \quad (2)$$

Элементы матрицы гамильтониана $H_{nn'}^l$ представляют собой сумму элементов матрицы кинетической энергии $T_{nn'}^l$ и матрицы потенциальной энергии $V_{nn'}^l$,

$$H_{nn'}^l = T_{nn'}^l + V_{nn'}^l. \quad (3)$$

Матрица кинетической энергии является трехдиагональной. Ее элементы

$$T_{n,n-1}^l = T_{n-1,n}^l = -\frac{1}{2}\sqrt{n\left(n+l+\frac{1}{2}\right)}; \quad T_{nn}^l = \frac{1}{2}\left(2n+l+\frac{3}{2}\right) \quad (4)$$

линейно растут по мере увеличения n . Элементы матрицы потенциальной энергии $V_{nn'}^l$ для большинства короткодействующих потенциалов убывают с ростом n, n' . Бесконечную матрицу потенциала аппроксимируют матрицей конечного размера. В результате осцилляторное пространство разделяется на два подпространства – внешнее и внутреннее.

Во внутреннем подпространстве система уравнений принимает вид:

$$\sum_{n'=0}^N (H_{nn'}^l - \delta_{nn'} E) a_{n'l}(E) = -\delta_{nN} T_{N,N+1}^l a_{Nl}^{as}, \quad n \leq N. \quad (5)$$

Во внешней области:

$$T_{n,n-1} a_{n-1,l}^{as} + (T_{n,n} - E) a_{n,l}^{as} + T_{n,n+1} a_{n+1,l}^{as} = 0, \quad n > N. \quad (6)$$

Система уравнений (5), (6) с матрицей потенциала конечного размера допускает точное решение. Задача сводится к аппроксимации локального потенциала нелокальным взаимодействием, представленным матрицей конечного размера в осцилляторном базисе. Во внешней области ($n > N$), отвечающей свободному движению частицы, уравнение (6) имеет решение в виде суперпозиции регулярного $S_{nl}(E)$ и нерегулярного $C_{nl}(E)$ осцилляторных решений:

$$a_{nl}^{as}(E) = \cos\delta(E) S_{nl}(E) + \sin\delta(E) C_{nl}(E). \quad (7)$$

Здесь $\delta(E)$ – фазовый сдвиг; $S_{nl}(E)$, $C_{nl}(E)$ – регулярное и нерегулярное осцилляторные решения, аналитические выражения для которых известны [9].

Функции внутренней области ($n \leq N$) могут быть найдены как

$$a_{nl}(E) = G_{nN} T_{N,N+1}^l a_{N+1,l}^{as}(E), \quad (8)$$

где элементы матрицы

$$G_{nN} = -\sum_{\lambda=0}^N \frac{\langle n|\lambda\rangle\langle\lambda|n\rangle}{E_\lambda - E} \quad (9)$$

выражаются через собственные значения E_λ и собственные векторы $\langle n|\lambda\rangle$ матрицы гамильтониана внутренней области, т. е. являются решением задачи на собственные значения. Функция $a_{N,l}$ на границе N одновременно удовлетворяет уравнениям внешней (6) и внутренней (5) области. Из этого следует условие сшивки в осцилляторном пространстве:

$$a_{N,l} = a_{N,l}^{as}. \quad (10)$$

Из соотношения (10) нетрудно получить формулу для расчета сдвига фаз:

$$\tan\delta(E) = -\frac{S_{Nl}(E) - G_{NN} T_{N,N+1}^l S_{N+1,l}(E)}{C_{Nl}(E) - G_{NN} T_{N,N+1}^l C_{N+1,l}(E)}. \quad (11)$$

Аналогичные выражения можно получить для S -матрицы и других характеристик рассеяния. Параметрами HORSE являются размер матрицы обрезанного гамильтониана N и осцилляторная энергия $\hbar\Omega$. Поэтому при решении конкретной задачи необходимо исследовать сходимость относительно увеличения модельного пространства N и определять интервал $\hbar\Omega$, в котором результаты устойчивы. В HORSE достаточно провести лишь однократную диагонализацию матрицы гамильтониана, остальные расчеты характеристик рассеяния в зависимости от энергии проводятся по простым формулам, что не требует больших вычислительных ресурсов. Но есть и альтернативный способ расчета волновых функций и фазы рассеяния, основанный на решении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Система уравнений, идентичная рассмотренным выше (5), (6), с условием сшивки (10) может быть представлена в следующем матричном виде:

$$[\widetilde{H} - E][\widetilde{a}] = [\widetilde{b}], \quad (12)$$

где

$$[\widetilde{H} - E] = \begin{bmatrix} (H_{00} - E) & H_{01} & \cdots & H_{0N-1} & H_{0N} C_N \\ H_{10} & (H_{11} - E) & & H_{1N-1} & H_{1N} C_N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ H_{N-10} & H_{N-11} & \cdots & (H_{N-1N-1} - E) & H_{N-1N} C_N \\ H_{N0} & H_{N1} & & H_{NN-1} & (H_{NN} - E) C_N + T_{NN+1} C_{N+1} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$[\widetilde{a}] = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_{N-1} \\ \text{tg}\delta \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$[\widetilde{b}] = - \begin{bmatrix} H_{0N}S_N \\ H_{1N}S_N \\ \dots \\ H_{N-1N}S_N \\ (H_{NN} - E)S_N + T_{NN+1}S_{N+1} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Неизвестными являются функции внутренней области $a_0, a_1, \dots, a_{N-1}$ (для экономии места мы опустили индекс l) и тангенс фазы рассеяния $\text{tg } \delta$. Решая данную систему при каждом значении энергии, получим интересующие нас величины. Пока что всё идентично методу HORSE, поэтому и полученные результаты, естественно, будут совпадать. Будем считать, что сходимость HORSE достигнута при $n = M$. Соответствующая система (12) также содержит $n = M$ уравнений.

На рис. 1 матрице $[\widetilde{H} - E]$ соответствует черный квадрат размером $M \times M$. Трехдиагональная матрица кинетической энергии во внешней области $n > M$ на рисунке представлена в виде красных

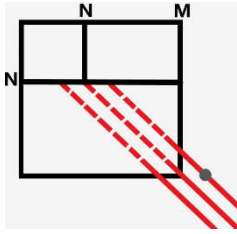


Рис. 1. Схематическая иллюстрация альтернативного метода

прямыми. Точкой отмечен матричный элемент кинетической энергии, отвечающий за условие сшивки HORSE (10). Сократим количество уравнений до $n = N$, при этом оставим количество столбцов неизменным (равным M). В результате число неизвестных M превышает количество уравнений N . Для того, чтобы привести в соответствие число уравнений и неизвестных, поступим следующим образом. В области $n > M$ регулярные $S_{n,l}(E)$ и нерегулярные $C_{n,l}(E)$ осцилляторные решения известны. В работах [12; 13] для нахождения $S_{n,l}(E)$ и $C_{n,l}(E)$ в области $N \leq n \leq M$ предложено использовать модифицированное TPC (на рисунке оно обозначено пунктиром), в котором на

диагонали добавлены матричные элементы $U_{n,n}$:

$$T_{n,n-1}a_{n-1,l}^{as} + (T_{n,n} + U_{n,n} - E)a_{n,l}^{as} + T_{n,n+1}a_{n+1,l}^{as} = 0, M \geq n \geq N \quad (16)$$

Тогда матричный вид системы будет следующим:

$$[\widetilde{H} - E][\widetilde{a}] = [\widetilde{b}], \quad (17)$$

где

$$[\widetilde{H} - E] = \begin{bmatrix} H_{0N}C_N + & H_{0N+1}C_{N+1} + & \dots + & H_{0M}C_M \\ H_{1N}C_N + & H_{1N+1}C_{N+1} + & \dots + & H_{1M}C_M \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{N-1N}C_N + & H_{N-1N+1}C_{N+1} + & \dots + & H_{N-1M}C_M \\ (H_{NN} - E)C_N + & H_{NN+1}C_{N+1} + & \dots + & T_{NM}C_M \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$[\widetilde{b}] = - \begin{bmatrix} H_{0N}S_N & H_{0N+1}S_{N+1} & \dots & H_{0M}S_M \\ H_{1N}S_N & H_{1N+1}S_{N+1} & \dots & H_{1M}S_M \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{N-1N}S_N & H_{N-1N+1}S_{N+1} & \dots & H_{N-1M}S_M \\ (H_{NN} - E)S_N & H_{NN+1}S_{N+1} & \dots & T_{NM}S_M \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Решая эту систему, при каждом значении энергии получим интересующие нас величины.

Модельная задача

Альтернативный метод был апробирован на простой задаче рассеяния частицы массой $m = 750$ МэВ в поле модельного потенциала Вудса-Саксона-Банга [10]. На графике 2 слева представлены фазы рассеяния в зависимости от энергии частицы с уменьшенными матрицами гамильтониана размером $N \times 20$, где $N = 1, 3, 4, 5, 10$ и 20 . Начиная с $N = 5$ (кривая 5×20), сдвиги фаз совпадают с контрольными результатами в HORSE с матрицей 20×20 (пунктирная кривая). На рисунке справа представлены фазы рассеяния для матриц гамильтониана с фиксированным размером $N = 5$ и разным

количеством столбцов $N = 5, 10, 15$. Точные результаты (HORSE, матрица 20×20) показаны пунктирной кривой. Как видно, начиная с $N = 10$, результаты сходятся.

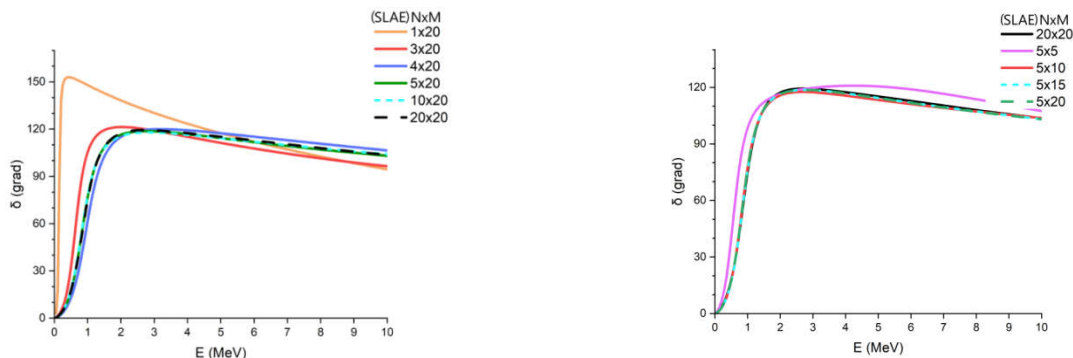


Рис. 2. Сравнение фазы рассеяния, рассчитанной новым методом, с результатом HORSE (20×20).

Важно, что в области резонанса совпадение кривых полное: соответствующие кривые практически неразличимы. Из рисунков видно, что сходимость результатов достигается уже с размерами матрицы гамильтониана 5×10 . Таким образом, сходимость достигнута при меньшем по сравнению с HORSE количестве уравнений. Напомним, что в HORSE сходимость наблюдается, начиная с матриц размером 10×10 . Минус данного альтернативного метода в том, что приходится решать всю систему уравнений, каждый раз для каждого значения энергии.

Заключение

Реализован альтернативный метод решения уравнений HORSE. На примере модельной задачи исследована сходимость метода относительно числа уравнений. Показано, что сходимость метода достигается при меньшем количестве уравнений, чем в системе уравнений метода HORSE. Новый метод требует меньше вычислительных ресурсов по сравнению с HORSE, что важно с точки зрения многоканальных задач. Для предложенного метода разработан комплекс программ на языке Fortran.

1. Heller E., Yamani H. L2 approach to quantum scattering: Theory // Phys. Rev. A – 1974. – Vol. 9. – P. 1201.
2. Yamani H., Fishman L. J-Matrix Method: Extensions to Arbitrary Angular Momentum and to Coulomb Scattering // J. Math. Phys. – 1975. – Vol. 16. – P. 410.
3. Broad J., Reinhardt W. One- and two-electron photoejection from H⁻: A multichannel Jmatrix calculation // Phys. Rev. A – 1976. – Vol. 14. – P. 2159.
4. Broad J., Reinhardt W. J-matrix method: multichannel scattering and photoionization // J. Phys. B – 1976. – Vol. 9. – P. 1491.
5. Филиппов Г., Охрименко И. Использование осцилляторного базиса для решения задач непрерывного спектра // Яд. Физ. – 1980. – Т. 32. – С. 932.
6. Филиппов Г., Охрименко И. Учет правильного асимптотического поведения в разложениях на осцилляторном базисе // Яд. физ. – 1981. – Т. 33. – С. 928.
7. Смирнов Ю., Нечаев Ю. Элементы теории рассеяния в представлении гармонического осциллятора // Kinam. V – 1982. – Т.4. – С. 445.
8. Нечаев Ю., Смирнов Ю. Решение задачи рассеяния в осцилляторном представлении // Яд. физ. – 1982. – Т.35. – С. 1385.
9. Bang J. et al. P-Matrix and J-Matrix Approaches: Coulomb Asymptotics in the Harmonic Oscillator Representation of Scattering Theory // Ann. Phys. (NY) – 2000. – Vol. 280. – P. 299.
10. Bang J., Gignoux C. A realistic three-body model of ⁶Li with local interactions // Nucl. Phys. A – 1979. – Vol. 313. – P. 119.
11. NIST Digital Library of Mathematical Functions. — URL: <http://dlmf.nist.gov>.
12. Shirokov A. et al. Realistic nuclear Hamiltonian: Ab exitu approach // Phys. Let. B – 2007. – Vol. 644. – P. 33.
13. Shirokov A. et al. Nucleon-nucleon interaction in the J-matrix inverse scattering approach and few-nucleon systems // Phys. Rev. C – 2004. – Vol. 70. – P. 24.

ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ И ШИРИНЫ РЕЗОНАНСА ТРИНЕЙТРОНА МЕТОДОМ SS HORSE

М.К. Ефименко¹, И.А. Мазур²

¹*Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)*

²*Center for Exotic Nuclear Studies, Institute for Basic Science (Daejeon, Republic of Korea)*

2019105727@pnu.edu.ru

Произведена оценка значений энергии и ширины резонанса тринейтрона на основе расчетов ab initio Модели оболочек без инертного кора с реалистическими моделями нуклон-нуклонного взаимодействия. Для решения использовался метод SS HORSE и параметризация S-матрицы с использованием её свойств симметрии.

ESTIMATION OF THE ENERGY AND RESONANCE WIDTH OF A TRINUTRON BY THE SS HORSE METHOD

M.K. Efimenko¹, I.A. Mazur²

¹*Pacific National University (Khabarovsk)*

²*Center for Exotic Nuclear Studies, Institute for Basic Science (Daejeon, Republic of Korea)*

2019105727@pnu.edu.ru

The values of trinutron resonance energy and width are estimated based on ab initio No-Core Shell Model calculations with realistic models of nucleon-nucleon interaction. The SS HORSE method was employed, utilizing S-matrix parametrizations based on it's symmetry properties.

DOI:10.22250/9785934934195_14

Мультинейтронные системы являются важным объектом исследований, потому что позволяют изучать взаимодействие только между нейтронами. Интерес к подобным исследованиям подогревается и недавним обнаружением тетранейтрона [1].

Эта работа посвящена исследованию возможности существования резонансного состояния в системе трех нейтронов. Несмотря на то, что наличие резонанса тринейтрона не подтверждено экспериментально, есть ряд теоретических исследований, указывающих на такую возможность [2; 3].

Метод SS HORSE в применении к трёхчастичной задаче

При исследовании многочастичных систем удобно использовать координаты Якоби, отделяющие центр масс. После этого координаты Якоби в выбранном методе преобразуются в гиперрадиус и гиперуглы, и тогда волновую функцию можно представить в виде произведения гиперрадиальной и гиперугловой частей.

При этом в случае трех частиц гиперрадиальную часть можно разложить по собственным функциям шестимерного гармонического осциллятора с частотой $\hbar\omega$. Получается система уравнений на собственные значения и собственные функции, их удобно решать в матричном виде.

Полученная система связанных уравнений формально эквивалентна системе, описывающей многоканальное рассеяние в системе с гиперсферическими каналами $V = \{K, \gamma\}$, где K – шестимерный орбитальный момент (гипермомент), являющиеся также параметром, аналогичным прицельному для двухчастичной задачи рассеяния [4], а γ – набор остальных квантовых чисел. При этом если матрица

потенциальной энергии не является диагональной по индексам, различающим каналы рассеяния. Однако в случае так называемого истинно демократического рассеяния – такого, что ни одна из пар частиц системы не образует связанных состояний, можно учитывать только одну гиперсферическую гармонику, в нашем случае с $K = 1$, а остальные считать подавленными. Тогда гиперрадиальная часть уравнения Шрёдингера для трехчастичной задачи полностью эквивалентна радиальной части этого уравнения Шрёдингера с полуцелым угловым моментом L :

$$L = K + \frac{3}{2}.$$

В таком случае также вводится понятие фазы рассеяния – как сдвига фаз сходящейся волны и расходящейся волны в гиперпространстве. В случае описанных выше приближений ее можно вычислить методом SS HORSE:

$$tg\delta_l(E_\lambda) = -\frac{S_{N+1,l}(E_\lambda)}{C_{N+1,l}(E_\lambda)} \quad (1)$$

и S-матрицы, связанной с фазой рассеяния следующим образом:

$$S = e^{2i\delta}, \quad (2)$$

где N – внутренний параметр метода HORSE, соответствующий размеру матрицы гамильтониана; E_λ – собственные значения энергии; S_{nl} и C_{nl} – осцилляторные регулярное и нерегулярное решения, аналитический вид которых известен [5].

Вариация параметров метода N и $\hbar\omega$, позволяет получить значения фазы рассеяния в некотором интервале энергий.

Полюса S-матрицы в VI квадранте комплексной плоскости энергии указывают на наличие резонанса и несут информацию о его энергии и ширине.

Результаты расчетов

Исходными данными являются значения нижайших состояний собственной энергии, рассчитанных при различных N и $\hbar\omega$ для тринейтрона в случае реалистических NN взаимодействий Daejeon16 [6], JISP16 [7], и регуляризированное взаимодействие Idaho N3LO [8].

Рассчитанные по ним фазы рассеяния были подвергнуты предварительной обработке: при дальнейших расчётах будут учитываться только значения с $N=8, 9, 10$ как наиболее точные из возможных, и при таких $\hbar\omega$, чтобы $E_\lambda < 8 \text{ МэВ}$, так как поведение фазы при больших значениях энергии не несет необходимой информации и ухудшает аппроксимацию.

Для расчета полюсов S-матрицы необходима непрерывная зависимость $S(E)$, в том числе и в комплексной плоскости. Её можно получить при помощи функции X , которая в связана с фазой рассеяния:

$$tg\delta = \frac{\pi k^{2K+4}}{2k^{2K+4} \ln k + X}, \quad k = \frac{\sqrt{2E\mu}}{q_0} \quad (3)$$

и с S-матрицей

$$S = \frac{X + 2k^{2K+4} \ln k + i\pi k^{2K+4}}{X + 2k^{2K+4} \ln k - i\pi k^{2K+4}}, \quad (4)$$

где μ – масса системы; $q_0 = 1$ – характерный масштаб расстояний.

При этом функция X хорошо поддается Паде-аппроксимации

$$X = \frac{a_0 + a_1 E + a_2 E^2 + a_3 E^3}{1 + a_4 E}, \quad (5)$$

параметры которой представлены в таблице для каждого из исследуемых взаимодействий и значений N . Аппроксимируя фазу рассеяния при помощи выражений (3) и (5), мы можем узнать вид функции X и использовать ее для определения полюсов S-матрицы.

Следует отметить, что поиск параметров a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 (табл. 1) производился через минимизацию несреднеквадратичного отклонения с весами, однако конечная ошибка, приведенная в

таблице, не учитывает вес:

$$Err = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{\max}} \sum_{j=1}^{\hbar\omega_{\max}} (E_{\lambda} - E_{\nu})^2 \left(\frac{n_i}{n_{\max}}\right)^2 \left(\frac{\hbar\omega_{\max} - \hbar\omega_j}{\hbar\omega_{\max}}\right)^2}. \quad (6)$$

Таблица 1)

Параметры аппроксимации

Потенциал	n	a ₀ , 10 ⁻⁴	a ₁ , МэВ ⁻¹ 10 ⁻⁴	a ₂ , МэВ ⁻² 10 ⁻⁴	a ₃ , МэВ ⁻³ 10 ⁻⁴	a ₄ , МэВ ⁻¹ 10 ⁻²	Err, МэВ
Daejeon 16	8	1,7194	1,1190	2,2690	4,1131	6,0522	0,0027
	9	2,1963	-0,9947	3,0244	4,0537	6,1970	0,0022
	10	1,9216	-1,8016	3,4503	3,9676	6,0568	0,0017
	8,9,10	2,1833	-1,4233	3,4032	3,9417	5,8965	0,0126
JISP 16	8	0,9339	-0,5053	3,2648	3,9983	6,2624	0,0012
	9	1,0894	-1,5007	3,7512	3,8967	6,0892	0,0008
	10	1,3716	-2,4720	4,1061	3,8552	6,1243	0,0025
	8,9,10	1,5172	-2,4226	4,2336	3,8026	5,9134	0,0085
N3LO np SRG 2.0	8	1,6450	-2,3918	4,8118	3,3483	4,0432	0,0030
	9	1,3294	-2,2138	4,4268	3,4983	4,5270	0,0026
	10	1,1997	-2,3980	4,4009	3,5419	4,7390	0,0046
	8,9,10	14,265	-2,6490	4,7925	3,3825	4,1988	0,0086

Здесь E_{ν} – точка пересечения универсальной функции [9] и аппроксимированной фазы рассеяния:

$$U(E_{\nu}) = \delta(E_{\nu}), \quad U = -\arctg\left(\frac{S_{N+1,l}}{C_{N+1,l}}\right). \quad (7)$$

Энергия E_r и ширина Γ возбужденного состояния определяются через положение полюса S-матрицы, т.е. из условия равенства нулю знаменателя (4):

$$F = X(E_p) + 2k(E_p)^{2K+4} \ln k(E_p) - i\pi k(E_p)^{2K+4} = 0, \quad E_p = E_r - \frac{i}{2}\Gamma. \quad (8)$$

При этом положение полюсов S-матрицы можно найти через вспомогательный интеграл

$$Y = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{dF}{F} dE, \quad (9)$$

$Y = 1$, если некий замкнутый контур C содержит плюс, и $Y = 0$, если нет, а точное положение E_p можно определить как:

$$E_p = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{dF}{F} E dE. \quad (10)$$

Результаты этих расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2)

Энергия и ширина резонанса

потенциал	n	E_r , МэВ	Γ , МэВ	Err, МэВ
Daejeon 16	8	0,6126	1,3593	0,0027
	9	0,5795	1,0869	0,0022
	10	0,5234	0,9120	0,0017
	8,9,10	0,5599	1,0424	0,0126
JISP 16	8	0,3947	0,9728	0,0012
	9	0,3969	0,7846	0,0008

	10	0,4278	0,6718	0,0025
	8,9,10	0,4429	0,7455	0,0085
N3LO np SRG 2.0	8	0,4460	0,8516	0,0030
	9	0,4172	0,7514	0,0026
	10	0,3998	0,6515	0,0046
	8,9,10	0,4203	0,7126	0,0086

Были апробированы новые формулы аппроксимации фазы рассеяния. С их помощью определены положение и ширина резонанса для каждого из рассмотренных взаимодействий и параметров n , а также их совокупности.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта №0818-2020-0005, с использованием ресурсов Центра коллективного пользования “Центр данных ДВО РАН”.

-
1. Duer M. et al. Observation of a correlated free four-neutron system. // Nature 606.7915 (2022). – P. 678 – 682
 2. Li J. G. et al. Ab initio no-core Gamow shell-model calculations of multineutron systems. // Phys. Rev. –2019. – C 100. – P. 054313.
 3. S. Gandolfi et al. Is a Trineutron Resonance Lower in Energy than a Tetraneutron Resonance? // Phys. Rev. . – 2017. –Lett. 118. – P. 232501
 4. Зайцев С. А., Смирнов Ю. Ф. и Широков А. М. Истинно многочастичное рассеяния в осцилляторном представлении // ТМФ. – 1998. – Т. 117. – № 2, – С. 227-248.
 5. Мазур И. А. Исследование резонансных ядерных процессов в микроскопических подходах с использованием осцилляторного базиса. – 2017.
 6. Shirokov A. M. et al. N₃LO NN interaction adjusted to light nuclei in ab exitu approach. // Physics Letters . – 2016. –B 761. – P. 87 – 91.
 7. Shirokov A. M. et al. Prediction for a Four-Neutron Resonance. // Phys. Rev. – 2016. – Lett. 117. – P. 182502.
 8. Entem D.R. Accurate charge dependent nucleon nucleon potential at fourth order of chiral perturbation theory // Physical Review . –2003. – 68. – P 041001.
 9. Shirokovet A. M. al. Shell model states in the continuum // Physical Review. – 2016. – C 94. – P. 064320.
 10. . Shirokov A. M, Shin I. J., Kim Y., Sosonkina M., Maris P. and Vary J. P. N₃LO NN interaction adjusted to light nuclei in ab exitu approach // Phys. Let. B. – 2016. – V. 761. – P. 87-91.
 11. Shirokov A. M. Nucleon-nucleon interaction in the J-matrix inverse scattering approach and few-nucleon systems / A. M. Shirokov, A. I. Mazur, S. A. Zaitsev, J. P. Vary, and T. A. Weber // Phys. Rev. C. – 2009. – V. 70. – P. 044005.
 12. Зайцев С. А. Трехдиагональная параметризация взаимодействия в дискретном подходе к проблеме рассеяния // ТМФ. – 1998. Т. – 115, № 2. – С. 263–274.
 13. Tilley D. R. Energy levels of light nuclei A=5, A=6, A=7 // Nucl. Phys. A. – 2002. – V. 708. – P. 163–362.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА ГЕНЕРАЦИЮ МАГНИТНЫХ ВОЛН ПРИ ДВИЖЕНИИ ДОМЕННОЙ ГРАНИЦЫ В ОРТОФЕРРИТЕ ИТТРИЯ

Е.А. Жуков, С.Р. Панасюк

Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

000158@pnu.edu.ru

Исследована возможность усиления и генерации магнитных волн при движении доменной границы в ортоферритах с учетом поглощения магнитных волн. Получено явное решение для амплитуды магнитной волны под действием заданных акустических волн без учета обратного влияния.

STUDY OF THE INFLUENCE OF ACOUSTIC WAVES ON THE GENERATION OF MAGNETIC WAVES DURING DOMAIN WALL MOTION IN YTTRIUM ORTOFERRITE

E.A. Zhukov, S.R. Panasyuk

Pacific state university (Khabarovsk)

000158@pnu.edu.ru

The possibility of amplification and generation of magnetic waves during the motion of a domain wall in orthoferrites is studied taking into account the absorption of magnetic waves. An explicit solution is obtained for the amplitude of a magnetic wave under the action of given acoustic waves without taking into account the reverse effect.

DOI:10.22250/9785934934195_18

В работах [1-6] было отмечено, что движение доменных границ (ДГ) в слабых ферромагнетиках при определенных скоростях сопровождается генерацией акустических и магнитных волн. Особенно, возникающие при движении ДГ в слабых ферромагнетиках, еще недостаточно изучены.

В данной работе изучено взаимодействие ДГ с магнитными волнами в ортоферрите иттрия с учетом поглощения. Получено решение для амплитуды магнитной волны при влиянии на нее акустических волн.

Следуя [1; 2], рассмотрим магнитную систему ортоферрита иттрия в двухподрешеточном приближении. Здесь ДГ расположена в плоскости xz и движется вдоль x [6]. Антиферромагнитный вектор совершает разворот в плоскости, перпендикулярной ДГ, при этом угол V относительно ДГ изменяется от $+\pi/2$ до $-\pi/2$.

Полные динамические уравнения для волн акустических смещений продольной и поперечной (относительно оси x) $u_l(x, t)$ и $u_t(x, t)$ и магнитной переменной $V(x, t)$ приводятся в [5]. При условии, что на магнитную волну воздействуют акустические волны без обратного влияния, динамические уравнения примут вид:

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) V + \frac{b_3}{2A} \sin 2V = -\frac{\delta_l}{A} \frac{\partial u_l}{\partial x} \sin 2V + \frac{\delta_t}{A} \frac{\partial u_t}{\partial x} \cos 2V + \frac{\alpha M}{Ag} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{mH}{A} \sin V, \quad (1)$$

$$u_l(x, t) = (e^{is_l k_a t - ik_a x} + e^{-is_l k_a t + ik_a x}), \quad (2)$$

$$u_t(x, t) = (e^{is_t k_a t - ik_a x} + e^{-is_t k_a t + ik_a x}). \quad (3)$$

Здесь t – время; A – постоянная обменной энергии; b_3 – константа анизотропии; ρ – плотность; $\delta_{l,t}$ – магнитоакустические константы; $s_{l,t}$ – скорость объемных продольных и поперечных звуковых волн. От оси y переменные не зависят.

Динамические уравнения изучены в работах [4, 5] без учета поглощения.

В данной работе изучим систему (1) – (3) с учетом поглощения магнитных волн, в отсутствии магнитного поля:

$$\alpha M \neq 0; H = 0. \quad (4)$$

Параметры в (1)-(3) подчиняются законам дисперсии [1] для компонент магнитоакустических напряжений (ДГ):

$$\omega_s = \sqrt{\frac{b_3 c^2}{A} + c^2 k_s^2}; \omega = kv; \omega = \omega_s + \omega_a; \omega_a = s_{l,t} k_a; k = k_s + k_a; 0 \leq v \leq c. \quad (5)$$

Определим $V(x, t)$ из уравнения (1) при условии (2) – (4).

Представим искомую функцию в виде

$$V = V_0 + V_1, \quad V_1 \ll V_0, \quad (6)$$

где V_0 решение уравнения [1]:

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) V_0(x, t) + \frac{b_3}{2A} \sin 2V_0(x, t) = 0, \quad (7)$$

$$V_0(x, t) = -2 \arctg \left(e^{\frac{x-vt}{D_3}} \right), \quad D_3 = \sqrt{\frac{A}{b_3} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)}, \quad (8)$$

где v – скорость ДГ; D_3 – параметр ширины ДГ. Движение ДГ может быть возвращением в равновесное положение после отключения магнитного поля.

Из (8) определяются параметры ДГ [1]:

$$\sin 2V_0 = 2 \frac{sh \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}{ch^2 \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}; \cos 2V_0 = 1 - \frac{2}{ch^2 \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}. \quad (9)$$

Учитывая (6), определим $\sin 2V$, $\cos 2V$ и разложим функции $\sin 2V_1$, $\cos 2V_1$ в ряд Тейлора. Ограничимся первым приближением. Тогда, с учетом (2), (3), (6), приведем уравнение (1) для функции $V_1(x, t)$ к линейному, его решение ищем в виде:

$$V_1 = V_{1(0)} + V_{1(1)}, \quad (10)$$

где $V_{1(0)}$ – решение уравнения

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\alpha M}{gA} \frac{\partial}{\partial t} \right) V_{1(0)} = \frac{\alpha M v}{gA D_3} \frac{1}{ch \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}. \quad (11)$$

Уравнение (11) определяет магнитную волну без влияния на нее акустических волн. Эта задача решена в [5], где найдено общее решение уравнения (11).

Тогда $V_{1(1)}$ есть решение, когда на магнитную волну оказывают влияние акустические волны.

С учетом (5), уравнение для $V_{1(1)}$ запишем в виде:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\alpha M}{gA} \frac{\partial}{\partial t} \right) V_{1(1)} = e^{-ik(x-vt)} e^{-i\omega_s t + ik_s x} \times \left[\frac{\delta_l}{A} ik_a \frac{sh \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}{ch^2 \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)} - \frac{\delta_t}{A} ik_a \left(1 - \frac{2}{ch^2 \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)} \right) \right] + \\ + \left[-\frac{\delta_l}{A} ik_a \frac{sh \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}{ch^2 \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)} + \frac{\delta_t}{A} ik_a \left(1 - \frac{2}{ch^2 \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)} \right) \right] \times e^{ik(x-vt)} e^{i\omega_s t - ik_s x}. \end{aligned} \quad (12)$$

Решение (12) ищем в виде медленно-меняющихся амплитуд:

$$V_{1(1)}(x, t) = A_2(x - vt) e^{i\omega_s t - ik_s x} + A_2^*(x - vt) e^{-i\omega_s t + ik_s x}. \quad (13)$$

Для определения амплитуд $A_2(x - vt)$, $A_2^*(x - vt)$ найдем производные функции (13) и подставим в уравнение (12).

Приравняем в полученном уравнении выражения при равных экспонентах, получим систему двух уравнений. Так как $A_2(x - vt)$ и $A_2^*(x - vt)$ – комплексно-сопряженные функции, то остановимся на одном уравнении – например, для $A_2(x - vt)$ и обозначим в нем $\xi = x - vt$. Получим неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами для искомой функции $A_2(\xi)$. Решение этого уравнения ищем методом Лагранжа, получим

$$A_2(\xi) = i \frac{\delta_l k_a}{A(r_1 - r_2)} \frac{D_3}{ch\left(\frac{\xi}{D_3}\right)} (e^{r_1 \xi} - e^{r_2 \xi}) - i \frac{2\delta_t k_a}{A(r_1 - r_2)} D_3 \operatorname{th}\left(\frac{\xi}{D_3}\right) (e^{r_1 \xi} - e^{r_2 \xi}), \quad (14)$$

В (14) $\xi = x - vt$. Величины r_1, r_2 определяются через константы уравнения (12):

$$\theta = \left(2k_s - \frac{2\omega_s v}{c^2}\right) \frac{c^2}{v^2 - c^2}; \quad \beta = \frac{\alpha M v}{gA} \frac{c^2}{(v^2 - c^2)}; \quad \gamma = \left(-\frac{\omega_s^2}{c^2} + k_s^2\right) \frac{c^2}{v^2 - c^2}; \quad \eta = -\frac{\beta \omega_s}{v};$$

$$r_1 = \frac{-(\beta + i\theta) + \sqrt{(\beta + i\theta)^2 - 4(\gamma + i\eta)}}{2}; \quad r_2 = \frac{-(\beta + i\theta) - \sqrt{(\beta + i\theta)^2 - 4(\gamma + i\eta)}}{2}.$$

Комплексно-сопряженная функция $A_2^*(\xi)$ легко определяется из (14).

Таким образом, получили решение для магнитной волны V_1 (10) при влиянии на нее акустических волн.

Расчеты по известным из опыта параметрам [1] показывают, что вклад акустических волн в амплитуду магнитной волны порядка $1,6\pi \cdot 10^{-6}$ рад. Так как взаимодействие происходит преимущественно в длинноволновой части спектра магнитных волн [3], то это явление может быть использовано для измерений параметров гиперзвуковых волн, вплоть до 10^{12} Гц, оптическими методами.

1. Dynamics of topological magnetic solitons. Experiment and theory / V. G. Bar'yakhtar, M. V. Chetkin, B. A. Ivanov, S. N. Gadetskii // Springer Tracts in Modern Physics. Berlin – 1994 – Vol. 129.

2. Звездин А. К., Мухин А. А. Магнитоупругие уединенные волны и сверхзвуковая динамика доменных границ // ЖЭТФ. – 1992. – Т. 102. – Вып. 2. – С. 577–599.

3. Жуков Е. А., Кузьменко А. П., Щербаков Ю. И. Торможение движущейся доменной границы в слабых ферромагнетиках // Физика твердого тела – 2008 – Т. 50 В. 6. – С. 1033–1036.

4. Жуков Е. А., Жукова В. И., Каминский А. В., Корчевский В. В., Римлянд В. И. Метод генерации, усиления и измерения параметров гиперзвуковых волн в магнитных кристаллах // Вестник Тихоокеанского государственного университета – 2012 – № 3 (26). – С. 17–27.

5. Жуков Е. А., Жукова В. И. Расчеты взаимодействия магнитных и продольных акустических волн с участием доменной границы в ортоферритах // Вестник Тихоокеанского государственного университета – 2021 – № 4 (63) – С. 55–64.

6. Жуков Е. А., Адамова М. Е., Жукова В. И., Кузьменко А. П. Механизмы генерации волн Лэмба доменной границей в пластине слабого ферромагнетика // Известия Юго-Западного государственного университета. Серии Техника и технологии – 2021 – Т. 11, № 4 – С. 123–136.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ РАССЕЯНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОТЕНЦИАЛА ИОНИЗАЦИИ ТРЕХЭЛЕКТРОННОЙ АТОМНОЙ СИСТЕМЫ

В.В. Насыров

Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

000612@pnu.edu.ru

В работе описан способ расчета потенциала ионизации легких атомов с помощью построения функции Йоста для эквивалентной задачи рассеяния.

APPLICATION OF THE SCATTERING THEORY METHODS FOR CALCULATION OF THE IONIZATION POTENTIAL OF THREE ELECTRON ATOMIC SYSTEM

V.V. Nasyrov

Pacific National University (Khabarovsk)

000612@pnu.edu.ru

The paper describes a method for calculating the ionization potential of light atoms by constructing the Jost function for the equivalent scattering problem.

DOI:10.22250/9785934934195_21

В данной работе применяется приближение «замороженного ядра», позволяющее выделить из атомных электронов «внешний» валентный электрон. Для учета корреляции атомных электронов вводится эффективный потенциал взаимодействия «внешнего» электрона и ионного остатка. Ранее такой подход был использован в [1] для расчета *s*-состояний атома гелия.

Запишем гамильтониан атома лития как атомной системы с тремя электронами для нерелятивистского случая (в работе используются атомные единицы)

$$\hat{H} = \sum_{i=1}^3 \left(-\frac{1}{2} \Delta_i - \frac{Z}{r_i} \right) + \sum_{i < j}^3 \frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} = \hat{H}_A + \hat{H}_{(e \rightarrow A)},$$

где $Z = 3$ – заряд ядра; $\vec{r}_i$ – радиус-вектор *i*-го электрона.

Гамильтониан (1) можно представить как сумму гамильтониана гелий подобного остова $\hat{H}_A$, состоящего из ядра и двух сильно связанных с ним электронов

$$\hat{H}_A = \sum_{i=1}^2 \left(-\frac{1}{2} \Delta_i - \frac{Z}{r_i} \right) + \frac{1}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|} \quad (1)$$

и гамильтониана $\hat{H}_{(e \rightarrow A)}$

$$\hat{H}_{(e \rightarrow A)} = -\frac{1}{2} \Delta_3 - \frac{Z}{r_3} + \sum_{i=1}^2 \frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_3|}, \quad (2)$$

который может быть интерпретирован как гамильтониан, описывающий процесс рассеяния третьего электрона, на сферически симметричном потенциале.

Определим волновую функцию как

$$\Psi = \mathcal{A}[\phi(1,2,3)\chi(1,2,3)],$$

где $\mathcal{A} = 1 - P_{213} - P_{321} - P_{132} + P_{231} + P_{312}$ – трехчастичный антисимметризатор; P_{ijk} – оператор перестановки (123) в (*ijk*); $\phi(1,2,3)$ – координатная функция атомной системы; χ – спиновая функция

$$\chi(1,2,3) = \alpha(1)\beta(2)\alpha(3) - \alpha(2)\beta(1)\alpha(3).$$

Пусть электроны остова находятся в $1s$ -состояниях энергией E_A , с симметричной относительно перестановки электронов волновой функцией $\varphi_{1s^2}(1,2)$, удовлетворяющей уравнению Шредингера с гамильтонианом (1)

$$\hat{H}_A \varphi_{1s^2}(1,2) = E_A \varphi_{1s^2}(1,2).$$

Используя приближение «замороженного ядра», представим волновую функцию $\phi(1,2,3)$ в виде произведения

$$\phi(1,2,3) \approx \varphi_{1s}^{Z_A}(1)\varphi_{1s}^{Z_A}(2)\xi(3), \quad (3)$$

где $Z_A = 19/8$ – эффективные заряды для атома Li ; $\varphi_{1s}^{Z_A}$ – водородоподобная волновая функция

$$\varphi_{1s}^{Z_A} = \sqrt{\frac{Z_A}{\pi}} \exp(-Z_A r).$$

Пусть гамильтониан (2) описывает систему в состоянии с энергией E_A^{sc} , тогда функция (3) удовлетворяет уравнению

$$\hat{H}_{(e \rightarrow A)} \phi(1,2,3) = E_A^{sc} \phi(1,2,3). \quad (4)$$

Умножая уравнение (4) на $(\varphi_{1s}^{Z_A})^*$ и интегрируя его по радиус-вектору $\vec{r}_1$, получим уравнение на функцию ξ_A

$$\left(-\frac{1}{2} \Delta_{r_3} - \frac{Z}{r_3} + 2 \int \frac{|\varphi_{1s}^{Z_A}(1)|^2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_3|} d^3 r_1 \right) \xi_A(3) = E_A^{sc} \xi_A(3). \quad (5)$$

Определим эффективный короткодействующий потенциал:

$$V^{sh}(r) = \alpha \left(-\frac{1}{r} + \int \frac{|\varphi_{1s}^{Z_A}(1)|^2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}|} d^3 \vec{r}_1 \right) = -\alpha \left(Z_A + \frac{1}{r} \right) \exp(-2Z_A r), \quad (6)$$

где $\alpha = Z - 1$.

В работе [1] мы показали, что уравнение (5) может быть сведено к дифференциальному уравнению, описывающему процесс упругого рассеяния электрона с импульсом k на сферически симметричном потенциале

$$\mathcal{H}_{kl}^{(+)}(r) \frac{d^2 f_l(k,r)}{dr^2} - \frac{d\mathcal{H}_{kl}^{(+)}(r)}{dr} \frac{df_l(k,r)}{dr} - 2\mathcal{H}_{kl}^{(+)}(r) V^{sh}(Z_A, r) f_l(k, r) = 0, \quad (7)$$

где $f_l(k, r)$ – амплитудные функции;

$$\mathcal{H}_{kl}^{(+)}(r) = 2\chi_{kl}^{(+2)}(r) V^{sh}(\alpha, Z_{ef}, r),$$

$$\chi_{kl}^{(\pm)}(r) = G_l(kr, \eta) \pm i F_l(kr, \eta),$$

$F_l(kr, \eta)$ – регулярная и $G_l(kr, \eta)$ – нерегулярная кулоновские функции; l – орбитальный угловой момент; $\eta = -\alpha/k$ – параметр Зоммерфельда. Граничные условия для уравнения (7):

$$f_l(k, 0) = \frac{1}{2}, \quad \left. \frac{df_l(k, r)}{dr} \right|_{r=0} = 0.$$

Асимптотические значения амплитудных функций $f_l(k, r)$ позволяют вычислить функции Йоста $F_l(k)$:

$$F_l(k) = \frac{\Gamma(l+1) \exp(\frac{\pi\eta}{2} - i\sigma_l)}{\sqrt{\Gamma(l+1+i\eta)\Gamma(l+1-i\eta)}} \lim_{r \rightarrow \infty} f_l(k, r), \quad (8)$$

где

$$\sigma_l = \frac{1}{2i} \ln \frac{\Gamma(l+1+i\eta)}{\Gamma(l+1-i\eta)}.$$

Уравнение (7) может быть решено при любых значениях импульса k , однако связанным состояниям соответствуют решения с чисто мнимыми значениями k_A (спектральные точки), при которых выполняется условие:

$$F(k_A) = 0. \quad (9)$$

Потенциал ионизации может быть определен из энергии связи системы $e + Li^+$:

$$I_{Li} = -E_A^{sc} = + \frac{|k_A|^2}{2}.$$

Поиск амплитудной функции $f_{l=0}(k, r)$ и соответствующего связанного состояния квантовой системы $e + Li^+$ происходит путем численного решения уравнения (7) в диапазоне значений импульса $k = 0.2i \div 1i$ а.е. для орбитального квантового числа $l = 0$. Расчеты выполнялись с переменным шагом до тех пор, пока не обнаруживалась спектральная точка с импульсом k_A , приводящая к выполнению условия (9) с необходимой точностью. Полученная из (8) зависимость функции Йоста $F_{l=0}(k)$ от импульса показана на рис. 1. В указанном диапазоне обнаружено три спектральные точки.

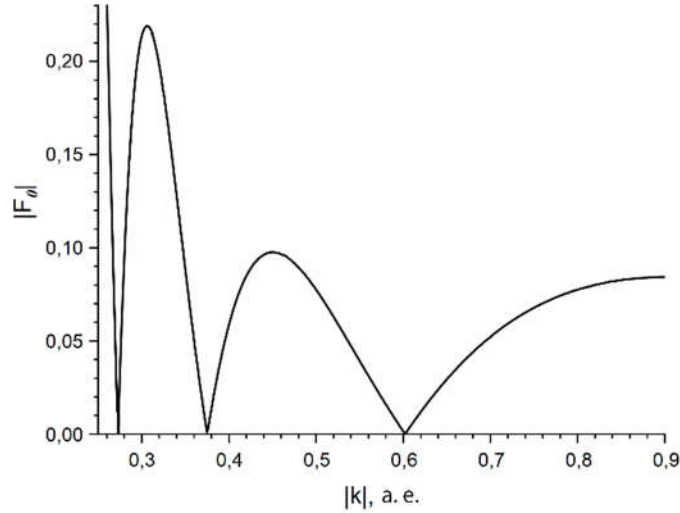
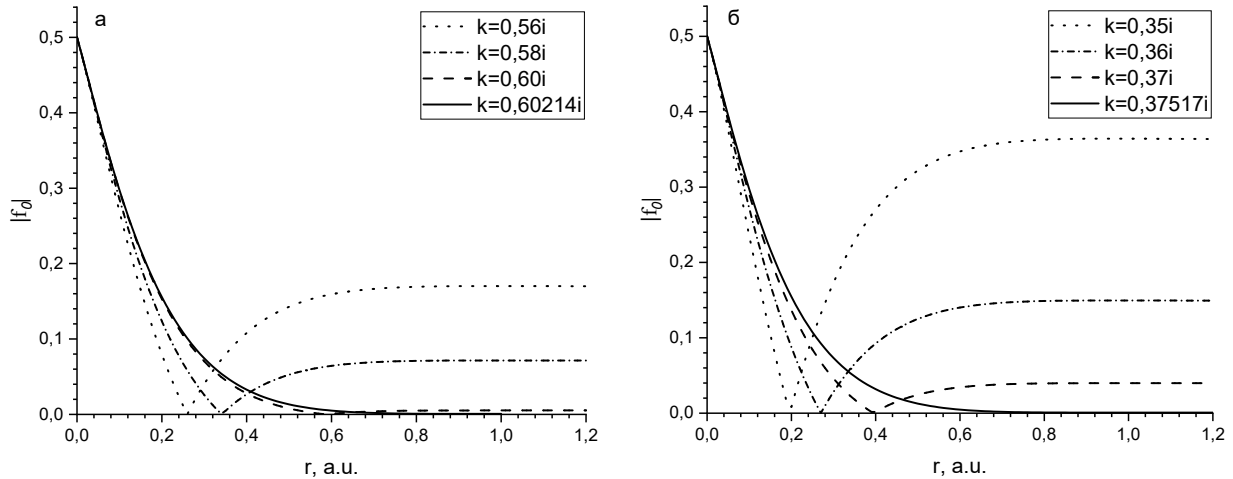


Рис. 1. Модуль функции Йоста $F_0(k)$ для рассеяния электрона на ионе Li^+ .

Проверка сходимости расчетов отслеживалась по поведению модулей амплитудных функций $f_{l=0}(k_A, r)$ в найденных спектральных точках (рис. 2). Отметим, что предлагаемый метод демонстрирует достаточно хорошее приближение к выполнению условия (9) уже при $r \approx 1$ а.е., что связано с быстрым спадом короткодействующего потенциала (12).



а) $k_A = 0.60214i$ а.е.; б) $k_A = 0.37517i$ а.е.

Рис. 2. Амплитудные функции $f_{l=0}(k, r)$ в окрестностях спектральных точек.

Основное состояние лития $2s\ ^2S_{1/2}$ включает один валентный электрон, занимающий $2s$ -орбиталь. Полезно отметить, что такие энергетические уровни в состояниях с $l = 0$ не испытывают расщепления на составляющие из-за спин-орбитального взаимодействия, поэтому описываемый в статье метод может быть использован для расчета потенциалов ионизации атома гелия для уровней $2s\ ^2S_{1/2}$, $3s\ ^2S_{1/2}$.

В таблице приведены вычисленные значения импульсов и потенциалов ионизации в сравнении экспериментальными значениями из работы [3], в которой выполнены высокоточные измерения возбужденных уровней лития с использованием двухступенчатого лазерного возбуждения в сочетании с термоэмиссионным диодным детектором. В частности, в [3] приводятся высокоточные измерения для двухфотонного перехода из основного в возбужденное состояние:

$$2s\ ^2S_{1/2} \xrightarrow{2\hbar\omega} 3s\ ^2S_{1/2}.$$

В таблице приведены данные из работы [2], в которой также применен подход, использующий расчет функций Йоста и получены близкие значения. Однако из-за того, что в [2] применяется рассеивающий потенциал с «кулоновским хвостом», сходимость амплитудной функции к функции Йоста начинается только при $r \approx 100$ а.е., тогда как наш подход позволяет получить сходимость при $r \approx 1$ а.е.

Потенциал ионизации атома лития

Данные	$2s\ ^2S_{1/2}$		$3s\ ^2S_{1/2}$	
	k_A , а.е.	I_{Li} , а.е.	k_A , а.е.	I_{Li} , а.е.
Эксперимент	–	0.1981	–	0.0742
Наш расчет	0.60214i	0.1813	0.37517i	0.0704
Alcala [2]	0.5917i	0.1751	–	–

Можно отметить, что для подхода, в котором всего один «подгоночный» параметр, получены результаты, дающее хорошее совпадение с экспериментом при относительно простом расчетном алгоритме.

-
1. Насыров В.В., Насырова М.Г., Крамарь Е.И. и др. Использование функции Йоста для расчета дискретного спектра атома гелия // Известия высших учебных заведений. – 2022. – Т. 65, – № 1. – С. 31.
 2. Alcala L., Hoyos F., Pitalua D. Using scattering theory to calculate the ground state energy of lithium atom // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1386. – P. 012121.
 3. Anwar-ul-Haq M. et al. On the first ionization potential of lithium // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. – 2005. – V. 38. – P. S77.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АТОМОВ ФОСФОРА С СИЛИЦЕНОМ

А.В. Прохоренко^{1,3}, А.А. Гниденко^{1,2}, А.Н. Чибисов^{1,3}, М.А. Чибисова^{1,3}¹*Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)*²*ХФИЦ ФГБУН Институт материаловедения ДВО РАН (г. Хабаровск)*³*Вычислительный центр ДВО РАН (г. Хабаровск)**aimpva@pnu.edu.ru*

С помощью квантово-механических расчетов, с учетом спин-орбитального неколлинеарного взаимодействия, исследовано поведение одного и двух атомов фосфора на поверхности силицена. Определены величины намагниченности и заряда на атомах фосфора при замещении и различных положениях адсорбции. Установлены наиболее выгодные положения, энергии связи и величины активационных барьеров для диффузии адсорбированного фосфора в отсутствие и при наличии первичного адсорбированного или замещающего атома фосфора. Полученные результаты будут полезны экспериментаторам и технологам при изготовлении оптимальных квантовых вычислителей.

INTERACTION PROCESSES ANALYSIS OF PHOSPHORUS ATOMS WITH SILICENE

A.V. Prokhorenko^{1,3}, A.A. Gnidenko^{1,2}, A.N. Chibisov^{1,3}, M.A. Chibisova^{1,3}¹*Pacific National University (Khabarovsk)*²*KhFRC Institute of Materials Science FEB RAS (Khabarovsk)*³*Computing Center FEB RAS (Khabarovsk)**aimpva@pnu.edu.ru*

In this work, using quantum mechanical calculations, taking into account the spin-orbit noncollinear interaction, the behavior of one and two phosphorus atoms on the surface of silicene is studied. The values of magnetization and charge on phosphorus atoms upon substitution and different positions of adsorption have been determined. The most favorable positions, binding energies and values of activation barriers for the diffusion of adsorbed phosphorus in the absence and in the presence of a primary adsorbed or substituting phosphorus atom have been established. The results obtained will be useful to experimenters and technologists in the manufacture of optimal quantum computers.

DOI:10.22250/9785934934195_25

Основной задачей современной нанoeлектроники является разработка квантовых вычислителей, позволяющих создавать квантовые компьютеры, способные решать текущие технологические задачи на принципиально ином уровне. Квантовые вычислители могут быть спроектированы на основе твердотельной фазы кремния с внедренными атомами фосфора. Данная схема была впервые описана Кейном [1]. В качестве квантового состояния выступает ядерный спин примесного фосфора, размещенного с атомарной точностью в структуре кремния [2 – 6]. Для изготовления точных вычислителей, обладающих малой погрешностью в квантовых операциях, длительным временем когерентности, малой потребляемой мощностью, необходимо детальное понимание оптимального расположения кубитов в структуре и изменения их магнитных свойств. Свойства таких комплексов кубитов будет также определяться количеством внедренных атомов [7]. Силицен можно рассматривать как основу для получения таких квантовых вычислителей благодаря тому, что он обладает более сильным спин-орбитальным взаимодействием [8], в отличие от графена, что позволит наблюдать спиновый эффект Холла

при не слишком низких температурах [9]. Кроме того, в нем возможна настройка таких уникальных свойств как механически регулируемая запрещенная зона [10] и металлическая фаза с долинообразной поляризацией [11]. Экспериментальные наблюдения и синтез силицена [12-16] показали перспективность его внедрения в современную наноэлектронику [17].

Квантово-механические расчеты проводились с использованием пакета программ Quantum Espresso [18], в основе которого лежат теория функционала плотности и метод псевдопотенциала. Расчеты выполнялись с учетом спин-орбитального неколлинеарного взаимодействия. Псевдопотенциалы для кремния и фосфора были выбраны из библиотеки программы Quantum Espresso [19]. Энергия обреза базиса плоских волн составила 476 эВ. Тестовые расчеты для элементарной ячейки силицена были проведены с однородной сеткой k-точек $36 \times 36 \times 1$, построенной по схеме Монкхорста–Пэка. Для увеличенной, 32- атомной ячейки силицена была использована сетка k-точек размерности $9 \times 9 \times 1$. Анализ величин зарядов атомов был выполнен с использованием метода разбиения Бейдера [20].

При проведении тестовых расчетов получены оптимизированные параметры для элементарной ячейки силицена (рис.1): расстояние между ближайшими атомами $\delta = 2,24 \text{ \AA}$, постоянная решетки $a = 3,84 \text{ \AA}$, высота неровностей $d = 0,44 \text{ \AA}$, угол между нормалью к плоскости силицена и кремниевой связью $\theta = 101,62^\circ$.

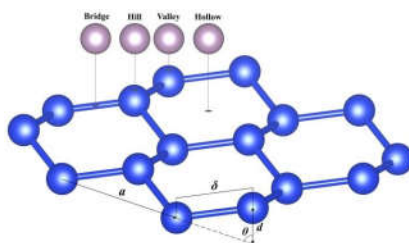


Рис. 1. Структура силицена и возможные места адсорбции атома фосфора.

В случае замещения один из атомов кремния в структуре силицена заменялся на фосфор. Энергия связи в данном случае рассчитывалась следующим образом:

$$E_B = E_{system} - [E_{silicene} (N_{Si} - 1)/N_{Si} + E_P], \quad (1)$$

где E_{system} – энергия всей системы; $E_{silicene}$ – энергия силицена; N_{Si} – количество атомов кремния; E_P – энергия изолированного атома фосфора.

Для исследования адсорбции были рассмотрены четыре возможных варианта расположения атома Р над поверхностью силицена (рис. 1): над атомом верхнего уровня (Hill), над атомом нижнего уровня (Valley), над связью между двумя атомами кремния (Bridge) и в центре гексагонального кольца (Hollow). Энергию связи для адсорбции можно рассчитать как:

$$E_B = E_{system} - (E_{silicene} + E_P). \quad (2)$$

Величины энергий связи для замещения и адсорбции, рассчитанные без начальной намагниченности, согласуются с результатами работы [21], однако включение в расчет неколлинеарного спин-орбитального взаимодействия приводит к увеличению значений. Согласно полученным результатам, наиболее выгодное положение для атома фосфора – на поверхности силицена – соответствует положению Hill (-3,84 эВ). При этом энергетический выигрыш по сравнению с замещением (-3,34 эВ) составляет порядка 0,5 эВ.

Полученные значения локального магнитного момента и ионного заряда на атоме фосфора и соседних атомах кремния позволили выявить: когда система находится в менее равновесном состоянии, величина намагниченности возрастает, а заряд уменьшается. Можно сделать вывод, что намагниченность на фосфоре, как и ионный заряд, определяется кремниевым окружением – количеством соседних атомов кремния, расстояниями до них. При этом величина заряда на атоме фосфора с величиной локальной намагниченности не коррелирует. Наибольшее значение намагниченности наблюдается при положении Bridge (0,211 мБор/ячейку).

Метод Nudged Elastic Band (NEB) использовался для исследования перемещения атома фосфора по поверхности силицена из положения Hill через гексагональное кольцо в следующую позицию Hill. Данный барьер соответствует переходу через положение, близкое к Hollow, и энергия активации перемещения атома фосфора по данному пути составила 1,32 эВ. Кроме этого, был выполнен NEB расчет по пути, соединяющим два ближайших положения Hill. В таком случае путь включает промежуточное положение Valley и активационный барьер снижается до 0,09 эВ.

Далее рассматривалась адсорбция атома фосфора на силициновую поверхность, уже содержащую один замещающий или адсорбированный атом фосфора. Для оценки энергетически более выгодных положений были рассчитаны энергии связи по формулам, аналогичным (1) и (2), но вместо энергии E_{silicene} использовались $E_{\text{silicene}+P(\text{sub})}$ – полная энергия системы «силицен + замещающий атом Р» или $E_{\text{silicene}+P(\text{ads})}$ – полная энергия системы «силицен + адсорбированный атом Р».

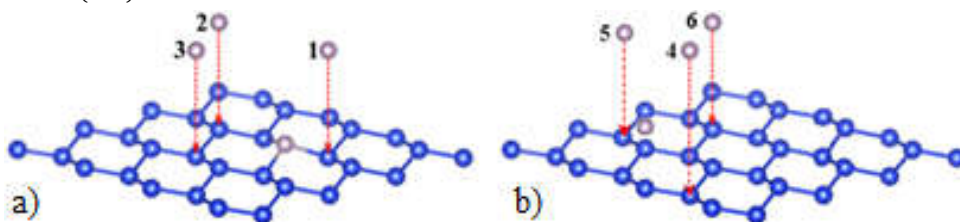


Рис. 2. Варианты расположения адсорбированного атома Р рядом с: а) замещающим атомом Р; б) адсорбированным атомом Р.

На рис. 2а показаны три исходные варианта расположения атома Р вблизи замещающего атома. В случае 1, который соответствует минимальному расстоянию между двумя атомами фосфора, адсорбированный атом Р смещается в сторону от замещающего атома Р, что приводит к уменьшению его энергии связи (-3,64 эВ). Во 2-м и 3-м случаях в области адсорбции второго атома фосфора происходят смещения в расположениях соседних атомов кремния; энергии связи при этом становятся ниже (-4,17 и -3,97 эВ).

На рис. 2б представлены возможные варианты расположения двух адсорбированных атомов Р. По величинам энергий связи можно выделить конфигурацию 5 как самую выгодную (-4,23 эВ). Расположение второго атома фосфора рядом с первым уменьшает его энергию связи в конфигурации 4 (-3,55 эВ), а в конфигурации 6 приводит к самопроизвольному смещению от уже имеющегося адсорбированного атома (-4,10 эВ).

Локальные магнитные моменты на атомах фосфора не выражены. Что касается количества заряда на атомах фосфора, то оно качественно соответствует рассмотренным случаям одиночного замещения или адсорбции атома фосфора на силицене. Однако можно отметить небольшое перетекание заряда.

Также использовался метод NEB для определения энергии активации диффузии второго адсорбированного атома фосфора. Для первого пути исходной выступила конфигурация 4, конечной – конфигурация 5, как энергетически наиболее выгодная. Второй путь был получен при NEB-расчете, включающем, помимо начального и конечного, промежуточное положение – димер P_2 , расположенный на линии, проходящей через центр гексагонального кольца и середины противоположных сторон.

По профилям энергии для первого и второго путей можно сделать вывод о приоритете второго варианта, при этом в большинстве промежуточных шагов сохраняется связь между атомами фосфора в димере P_2 , ее длина составляет 2,25 Å. Энергия активации диффузии в данном направлении составляет 0,47 эВ для первого пути и 0,25 эВ – для второго, а обратное направление движения имеет активационные барьеры 1,12 и 0,92 эВ. Эти величины сопоставимы с активационным барьером диффузии одиночного адсорбированного атома. Димеры P_2 как промежуточные метастабильные состояния фигурируют в одном из рассмотренных путей реакции, что указывает на возможность движения фосфора

по поверхности силицена в таком связанном состоянии, однако конечное равновесное положение будет соответствовать отдельным ионам фосфора, разделенным небольшим расстоянием.

Работа выполнялась в рамках тематики лаборатории моделирования квантовых процессов ТОГУ в соответствии с государственным заданием на выполнение НИР Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0818-2020-0005).

-
1. Kane B.E. A silicon-based nuclear spin quantum computer // Nature. – 1998. – V. 393. – P.133-137.
 2. Warschkow O., Curson N.J., Schofield S.R., et al. Reaction paths of phosphine dissociation on silicon (001) // Journal of Chemical Physics. – 2016. – V.144. – P.014705.
 3. O'Brien J.L., Schofield S.R., Simmons M.Y., et al. Towards the fabrication of phosphorus qubits for a silicon quantum computer // Physical Review B. – 2001. – V.64. – P.161401.
 4. Fuechsle M., Miwa J.A., Mahapatra S., et al. A single-atom transistor // Nature Nanotechnology. – 2012. – V.7. – P.242-246.
 5. Fuechsle M., Simmons M.Y. Using Scanning Tunneling Microscopy to Realize Atomic-Scale Silicon Devices // Single-Atom Nanoelectronics. – 2013. – P.28.
 6. Campbell Q., Baczewski A.D., Butera R.E., Misra S. Hole in one: Pathways to deterministic single-acceptor incorporation in Si(100)-2 × 1 // AVS Quantum Science. – 2022. – V.4. – P.016801.
 7. Fricke L., Hile S.J., Kranz L., Chung Y., et al. Coherent control of a donor-molecule electron spin qubit in silicon // Nature Communications. – 2021. – V.12. – P.3323.
 8. Liu C.C., Jiang H., Yao Y. Low-energy effective Hamiltonian involving spin-orbit coupling in silicene and two-dimensional germanium and tin // Physical Review B. – 2011. – V.84. – P.195430.
 9. Liu C.C., Feng W., Yao Y. Quantum Spin Hall Effect in Silicene and Two-Dimensional Germanium // Physical Review Letters. – 2011. – V.107. – P.076802.
 10. Topsakal M., Ciraci S. Elastic and plastic deformation of graphene, silicene, and boron nitride honeycomb nanoribbons under uniaxial tension: A first-principles density-functional theory study // Physical Review B. – 2010. – V.81. – P.024107.
 11. Ezawa W. Valley-Polarized Metals and Quantum Anomalous Hall Effect in Silicene // Physical Review Letters. – 2012. – V.109. – P.055502.
 12. Padova P.D., Quaresima C., et al. Evidence of graphene-like electronic signature in silicene nanoribbons // Physical Review Letters. – 2010. – V.96. – P.261905.
 13. Padova P.D., Leandri C., et al. Burning Match Oxidation Process of Silicon Nanowires Screened at the Atomic Scale // Nano Letters. – 2008. – V.8. – P.2299-2304.
 14. Vogt P., Padova P.D., et al. Silicene: Compelling Experimental Evidence for Graphenelike Two-Dimensional Silicon // Physical Review Letters. – 2012. – V.108. – P.155501.
 15. Lin C.-L., Arafune R., et al. Structure of silicene grown on Ag (111) // Applied Physics Express. – 2012. – V.5. – P.045802.
 16. Jamgotchian H., Colignon Y., et al. Growth of silicene layers on Ag(111): Unexpected effect of the substrate temperature // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2012. – V.24. – P.172001.
 17. Fleurence A., Friedlein R., et al. Experimental Evidence for Epitaxial Silicene on Diboride Thin Films // Physical Review Letters. – 2012. – V.108. – P.245501.
 18. Giannozzi P., Baroni S., et al. QUANTUM ESPRESSO: A Modular and Open-Source Software Project For Quantum Simulations Of Materials // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2009. – V.21. – P.395502.
 19. Dal Corso A. Pseudopotentials Periodic Table: From H to Pu // Computational Materials Science. – 2014. – V.95. – P.337-350.
 20. Tang W., Sanville E., Henkelman G. A grid-based Bader analysis algorithm without lattice bias // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2009. – V.21. – P.084204.
 21. Sivek J., Sahin H., Partoens B., Peeters F.M. Adsorption and absorption of boron, nitrogen, aluminum, and phosphorus on silicene: Stability and electronic and phonon properties // Physical Review B. – 2013. – V.87. – P.085444.

ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ВАРИАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А.О. Белозеров¹, А.И. Мазур¹, Р.Э. Шарыпов¹, А.М. Широков²

¹Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

²НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ (г. Москва)

С помощью машинного обучения разработан метод экстраполяции наблюдаемых в ядрах энергии основного состояния и среднеквадратичного радиуса на основе входных данных, полученных в модели оболочек без инертного кора. Основная идея состоит в том, чтобы построить ансамбль искусственных нейронных сетей с целью определения среднестатистического значения наблюдаемой характеристики для произвольных ядер и NN-взаимодействий. После получения предсказаний ансамбля следует их анализ и, как следствие – отбор подмножества нейронных сетей, предсказания которых удовлетворяют некоторым критериям. Предложенная топология нейронной сети позволяет получать устойчивые результаты и обеспечивает высокую сходимость предсказаний по мере включения в обучающую выборку данных из более высоких модельных пространств. Метод апробирован на вариационных расчетах ядра ${}^2\text{H}$.

EXTRAPOLATION OF VARIATIONAL CALCULATIONS WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

A.O. Belozеров¹, A.I. Mazur¹, R.E. Sharypov¹, A.M. Shirokov²,

¹Pacific National University (Khabarovsk)

²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (Moscow)

Using machine learning we develop a tool for extrapolating nuclear observables — the ground-state energy and the root-mean-square radius obtained within the No-core shell model. The idea is to build an ensemble of artificial neural networks to determine the average value of the observable for arbitrary nuclei and NN interactions. After retrieving the predictions of the ensemble, their analysis follows and the subset of ensemble is built, in which all neural networks satisfy certain criteria. A neural network topology is proposed that provides stable results and ensuring convergence of predictions as data from larger model spaces are included in the training set. The proposed approach was tested in variational calculations of the ${}^2\text{H}$ nucleus.

DOI:10.22250/9785934934195_29

Модель оболочек без инертного кора (МОБИК) [1] является одним из основных методов описания свойств атомных ядер. Такой подход называется *ab initio*, поскольку в качестве входной информации используется только реалистическое нуклон-нуклонное взаимодействие.

Результаты расчетов в оболочечных моделях, включая МОБИК, зависят от двух параметров – размера базисного пространства модели, определяемого максимальным числом осцилляторных квантов возбуждения N_{max} , и величины осцилляторной энергии $\hbar\Omega$.

Основная проблема МОБИК – резкое увеличение требуемых вычислительных ресурсов с увеличением N_{max} , что связано с экспоненциальным ростом числа базисных функций. Современные суперкомпьютеры позволяют проводить расчеты в МОБИК для легких ядер с массовым числом вплоть до $A = 20$, причем если для легчайших ядер s - и начала p -оболочки возможны расчеты с $N_{\text{max}} = 20$, то для ядер середины p -оболочки доступны расчеты с $N_{\text{max}} \leq 12 \div 14$. Для предсказания результатов,

соответствующих бесконечному базису, разработаны различные методы экстраполяции (см., например, [2]). Однако все они не имеют строгого обоснования, поэтому поиск новых методов экстраполяции остается актуальным.

На сегодняшний день методы машинного обучения прочно вошли в арсенал как теоретиков, так и экспериментаторов в области ядерной физики [3]. Они применяются и в области низких энергий, и при более высоких энергиях. В экспериментальной области машинное обучение используется в том числе для реконструкции событий, их анализа, фильтрации экспериментальных данных, а также для создания эмуляций.

В данной работе и исследуется метод экстраполяции результатов вариационных расчетов бесконечно больших модельных пространств, основанный на машинном обучении. Следуя [4], мы обучаем ансамбль искусственных нейронных сетей на результатах расчетов в МОБИК и экстраполируем предсказания на случай бесконечно больших модельных пространств, подавая на вход в каждую нейронную сеть достаточно большое значение N_{max} .

Алгоритм экстраполяции с помощью ансамбля нейронных сетей тестируется на модельной вариационной задаче – расчете энергии основного состояния и среднеквадратичного радиуса дейтрона с реалистическим нуклон-нуклонным потенциалом Nijmegen-II, точные значения которых известны: $E_{exact} = -2,224$ МэВ, $R_{exact} = 1,964$ фм. Выбор задачи обусловлен тем, что в ней наблюдается медленная сходимость. Кроме того, отчетливо проявляется так называемый четно-нечетный эффект относительно значений $N_{max}/2$ (рис. 1 и 2), что позволяет дополнительно тестировать корректность предсказаний и эффективность алгоритма.

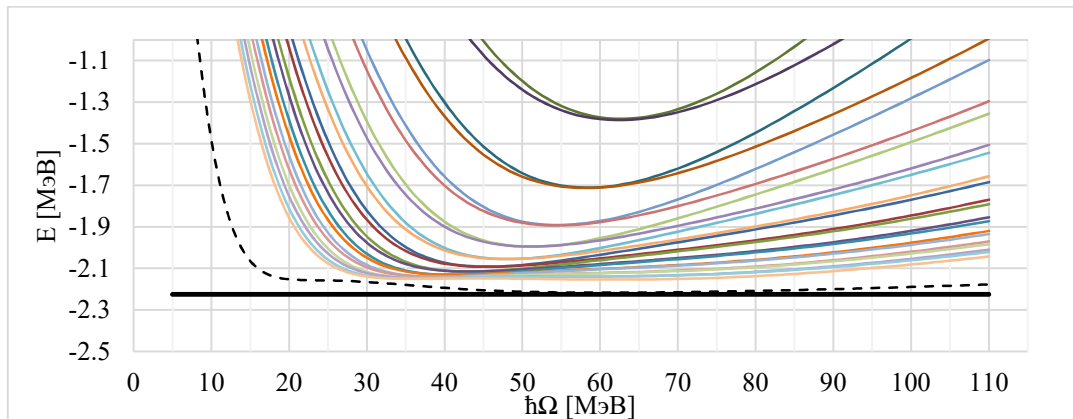


Рис. 1. Зависимость от $\hbar\Omega$ энергии основного состояния ядра ${}^2\text{H}$ в расчетах с NN-потенциалом Nijmegen-II при s $N_{max} = 18 \div 60$. Черной пунктирной линией на графике показаны результаты расчетов с $N_{max} = 100$. Шаг по $\hbar\Omega$ равен 1 МэВ, отдельные точки не показаны.

В качестве модели, с помощью которой аппроксимируются исходные данные, был выбрана искусственная нейронная сеть – многослойный перцептрон с тремя скрытыми слоями, в каждом из которых содержится 10 нейронов. На первом скрытом и на выходном слое используется линейная активирующая функция $f(x) = x$, на остальных – сигмоидальная $f(x) = 1/(1 + \exp(-x))$. На входы нейронной сети поступает пара значений $(N_{max}, \hbar\Omega)$, а на выходе получается значение энергии основного состояния E или среднеквадратичного радиуса R .

Алгоритм экстраполяции заключается в следующем. Проводится обучение ансамбля из 1024 нейронных сетей. Каждая нейронная сеть отличается от другой лишь начальными значениями весовых коэффициентов связей. Обучение производится методом градиентного спуска с помощью оптимизатора Adam [5]. Для обучения используется модуль TensorFlow [6] для Python.

В обучении используются не все исходные данные. Берутся данные модельных пространств с $6 \leq N_{max} \leq N_{max}^g$, где различные $N_{max}^g \leq 60$. Для обучения нейронных сетей, предсказывающих энерг-

ию, берутся данные, лежащие правее минимума $E(\hbar\Omega)$ при каждом N_{max} , вплоть до $\hbar\Omega = 110$ МэВ, а в задаче предсказания радиуса – данные из интервала $\hbar\Omega$ [25, 110] МэВ.

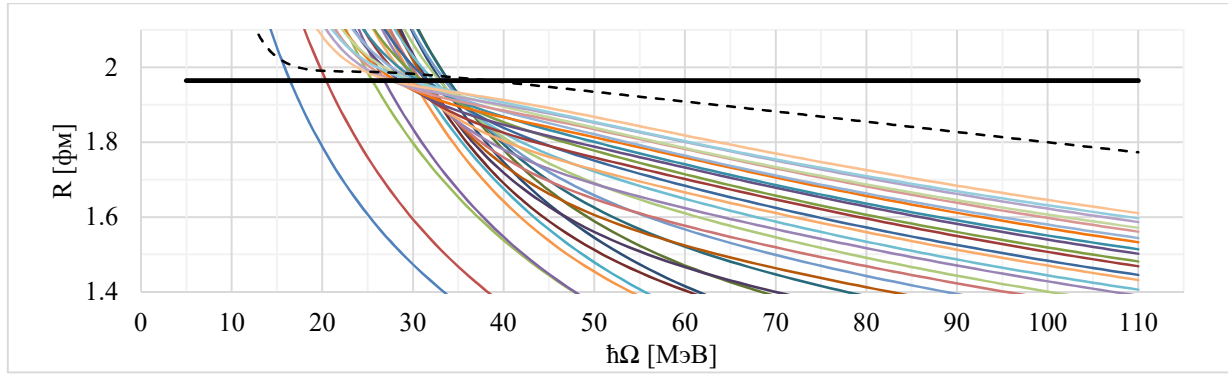


Рис. 2. Зависимость от $\hbar\Omega$ энергии среднеквадратичного радиуса ядра ^2H в расчетах с NN-потенциалом Nijmegen-II при $N_{max} = 2 \div 60$. Обозначения как на рис. 1.

Следующий этап – отбор нейронных сетей, дающих достоверные предсказания. Для этого вводим следующие критерии: независимость предсказаний от $\hbar\Omega$ при $N_{max} = 300$; малость функции ошибки на обучающей выборке. Кроме этого, нейронные сети, предсказывающие энергию, должны удовлетворять вариационному принципу. Далее формируется подмножество ансамбля нейронных сетей, распределение предсказаний которых оказывается близким к нормальному, и проводится дополнительный отбор по правилу 3σ . Последним этапом является вычисление по сформированному множеству среднеарифметического значения E_{avg} (R_{avg}) и среднеквадратичного отклонения ΔE (ΔR).

В табл. 1 и 2 представлены результаты экстраполяции энергии основного состояния и среднеквадратичного радиуса ядра ^2H . Обучение проводилось с использованием данных вплоть до заданного N_{max}^g . В таблицах указано количество нейронных сетей n_s , прошедших отбор, также приведены величины энергии, полученные с помощью экстраполяции B [2] с погрешностью — $E_{Ex.B}$ и $\Delta E_{Ex.B}$.

Таблица 1)

Экстраполированная энергия основного состояния

N_{max}^g	Все N_{max}			Только при четных $N_{max}/2$			$E_{Ex.B}$, МэВ	$\Delta E_{Ex.B}$, МэВ
	E_{avg} , МэВ	ΔE , МэВ	n_s	E_{avg} , МэВ	ΔE , МэВ	n_s		
20	-2,08	0,50	49	-2,32	0,24	130	-1,73	0,194
22	-4,98	2,54	106	—	—	—	—	—
24	-2,85	0,99	211	-2,16	0,15	46	-1,92	0,071
26	-2,82	1,00	203	—	—	—	—	—
28	-2,18	0,13	301	-2,20	0,12	417	-2,02	0,033
30	-2,24	0,11	170	—	—	—	—	—
32	-2,17	0,06	356	-2,16	0,05	601	-2,07	0,017
34	-2,22	0,08	177	—	—	—	—	—
36	-2,17	0,04	394	-2,18	0,04	830	-2,11	0,007
38	-2,18	0,04	158	—	—	—	—	—
40	-2,17	0,03	474	-2,20	0,04	899	-2,12	0,005
42	-2,17	0,03	324	—	—	—	—	—
44	-2,17	0,02	592	-2,21	0,05	885	-2,14	0,003
46	-2,17	0,01	563	—	—	—	—	—
48	-2,17	0,02	750	-2,20	0,04	850	-2,143	0,002
50	-2,16	0,01	747	—	—	—	—	—
52	-2,17	0,01	764	-2,21	0,04	821	-2,148	0,001

Экстраполированный среднеквадратичный радиус

N_{max}^g	Все N_{max}			Только при четных $N_{max}/2$		
	R_{avg} , фм	ΔR , фм	n_s	R_{avg} , фм	ΔR , фм	n_s
20	2,09	0,73	97	2,84	0,29	45
22	3,88	0,68	230	—	—	—
24	1,72	0,24	203	1,84	0,14	50
26	3,16	1,15	160	—	—	—
28	1,88	0,17	351	1,77	0,13	184
30	4,57	2,04	482	—	—	—
32	1,89	0,31	524	1,80	0,12	381
34	3,35	1,74	509	—	—	—
36	1,90	0,23	631	1,80	0,12	381
38	2,15	0,35	302	—	—	—
40	1,93	0,22	703	1,86	0,09	513
42	2,05	0,23	541	—	—	—
44	1,91	0,15	666	1,90	0,07	536
46	1,99	0,08	532	—	—	—
48	1,94	0,05	611	1,93	0,05	539
50	1,99	0,04	432	—	—	—
52	1,97	0,04	634	1,95	0,04	441

Из таблиц видно, что использование четных $N_{max}/2$ для обучения, во-первых, дает достоверные результаты при меньшем значении N_{max}^g ; во-вторых, сходимость гораздо более равномерна по сравнению с использованием всех N_{max} ; в-третьих, после отбора остается гораздо больше нейронных сетей. Следует отметить, что при использовании четных $N_{max}/2$ результаты экстраполяции энергии основного состояния при $N_{max}^g = 44 \div 52$ согласуются с точным значением, тогда как при использовании всех N_{max} согласованности не наблюдается, хотя между собой результаты экстраполяции с помощью нейронных сетей находятся в согласии.

В случае экстраполяции радиуса получаемые значения в хорошем согласии при использовании как всех N_{max} для обучения, так и только четных $N_{max}/2$, однако в последнем случае неопределенность результата меньше; при $N_{max}^g \geq 44$ результаты экстраполяции согласуются с точным значением.

Таким образом, рассматриваемый метод экстраполяции позволяет получать устойчивые результаты для двух различных наблюдаемых – энергии основного состояния и среднеквадратичного радиуса – при использовании одной и той же топологии нейронной сети. Следовательно, этот метод можно применить и к другим наблюдаемым – таким как квадрупольный момент, а также использовать для изучения более тяжелых ядер.

-
1. Barrett B.R., Navrátil P., Vary J. P. Ab initio no core shell model // Progress in Particle and Nuclear Physics – 2013. – V. 69(1). – P.131–181.
 2. Maris P., Vary J.P., Shirokov A.M. Ab initio no-core full configuration calculations of light nuclei // Phys. Rev. C – 2009. – V. 79. – 014308.
 3. Boehnlein A et al. Machine Learning in Nuclear Physics // arXiv:2112.02309v2 [nucl-th] – 2022.
 4. Negoita G.A., Vary J.P., Luecke G.R., Maris P., Shirokov A.M., Shin I.J., Kim Y., Ng E.G., Yang C., Lockner M., Prabhu G.M. Deep learning: Extrapolation tool for ab initio nuclear theory // Phys. Rev. C – 2019. – V. 99 – 054308.
 5. Kingma D. P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization. arXiv:1412.6980v9 [cs.LG] – 2017.
 6. Abadi M. et al. TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems // Software available from tensorflow.org – 2015.

Секция 2

Физика конденсированных сред

УДК 537.226

ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ (KNO₃)_{1-x}/(Al₂O₃)_x

С.В. Барышников

Благовещенский государственный педагогический университет (г. Благовещенск)
Svbar2003@list.ru

Исследованы температурные зависимости диэлектрической проницаемости и амплитуды третьей гармоники для композитов (KNO₃)_{1-x}/(Al₂O₃)_x. Обнаружено, что увеличение содержания Al₂O₃ приводит к расширению сегнетоэлектрической фазы и уменьшению коэффициента третьей гармоники.

LINEAR AND NONLINEAR DIELECTRIC PROPERTIES OF COMPOSITES (KNO₃)_{1-x}/(Al₂O₃)_x

S.V. Baryshnikov

Blagoveshchensk State Pedagogical University (Blagoveshchensk)
Svbar2003@list.ru

The temperature dependences of the permittivity and the amplitude of the third harmonic for (KNO₃)_{1-x}/(Al₂O₃)_x composites have been studied. It has been found that an increase in the Al₂O₃ content leads to an expansion of the ferroelectric phase and a decrease in the third harmonic coefficient.

DOI:10.22250/9785934934195_33

Введение

Нитрат калия широко известен как сегнетоэлектрик с прямоугольной петлей гистерезиса и является удобным материалом для создания энергонезависимой памяти (FRAM – Ferromagnetic Random Access non-volatile Memory) [1]. Однако, сегнетоэлектрическая фаза в нитрате калия возникает только при охлаждении в температурном интервале 124-100°C. Поиск условий, при которых сегнетоэлектрическая фаза нитрата калия остается стабильной вплоть до комнатной температуры и ниже, является актуальной задачей. В ряде работ сообщалось о попытках расширения области существования сегнетоэлектрической фазы путем создания композитов и твердых растворов на основе нитрата калия [2-5]. Для сегнетоэлектрических композитов (KNO₃)_(1-x)/(BaTiO₃)_x [2] и (KNO₃)_(1-x)/(KNbO₃)_x [3] наблюдается расширение области существования сегнетоэлектрической фазы нитрата калия. В [6] было обнаружено, что добавление доли CsNO₃ в KNO₃ приводит к сужению температурной области существования III сегнетоэлектрической фазы нитрата калия и уменьшению коэффициента нелинейности композита. В [7] исследованы температурные зависимости диэлектрической проницаемости, амплитуды третьей гармоники и сигнала ДТА для композита (KNO₃)_{1-x}/(RbNO₃)_x. Установлено, что увеличение содержа-

ния RbNO_3 приводит к возникновению дополнительных фазовых переходов и расширению температурного интервала существования сегнетоэлектрической фазы. В данной работе приводятся результаты исследования влияния Al_2O_3 на стабильность сегнетоэлектрических свойств нитрата калия в композитах $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_x$, полученных по различным технологиям.

Образцы и методика эксперимента

Нитрат калия при комнатной температуре имеет ромбическую структуру, которую часто обозначают как фазу II [8]. При нагреве образца около $T_1 = 128^\circ\text{C}$ происходит переход в фазу I, имеющую разупорядоченную тригональную кальцитоподобную структуру. При охлаждении фаза II не превращается непосредственно в фазу I, а вместо этого при $T_2 = 124^\circ\text{C}$ переходит в другую тригональную фазу III, которая является сегнетоэлектрической со спонтанной поляризацией вдоль оси c . Спонтанная поляризация составляет около $8\text{--}10\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$ при температуре 120°C [9]. Было обнаружено, что температурный диапазон существования сегнетоэлектрического состояния в KNO_3 зависит от тепловой предыстории и скорости охлаждения [10] и при предварительном прогреве образца до 200°C для первого цикла нагрев-охлаждение температура перехода в фазу II составляет порядка $T_3 = 100^\circ\text{C}$ ($T_2 - T_3 \approx 24\text{ K}$).

Для получения композитов $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_x$ использовались химически чистые KNO_3 и Al_2O_3 (где для композитов под x понимается объемная доля). Для образцов первого типа использовались порошки Al_2O_3 со средним размером частиц $1\text{ }\mu\text{м}$, которые тщательно перемешивались в соответствующих пропорциях с KNO_3 . Для образцов второго типа использовался порошок Al_2O_3 со средними размерами 100 нм и перемешивание осуществлялось в расплаве KNO_3 при температуре $360\text{--}370^\circ\text{C}$. После этого застывший расплав измельчался в агатовой ступке. Для исследования использовались образцы $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_x$ в виде таблеток с диаметром 10 мм и толщиной $1,5\text{ мм}$, полученные прессованием при давлении $8 \cdot 10^3\text{ кг}/\text{см}^2$ (где для композитов под x понимается объемная доля).

Для измерения комплексной диэлектрической проницаемости использовался цифровой измеритель иммитанса E7–25. Наличие сегнетоэлектрической фазы KNO_3 фиксировалось по генерации гармоник при подаче на образец электрического поля с частотой 2 kHz и напряженностью от 20 до $70\text{ В}/\text{мм}$. Более подробно методика исследования сегнетоэлектриков с использованием нелинейной диэлектрической спектроскопии описана в [11].

Экспериментальные результаты и обсуждение

Как показали исследования $\epsilon'(T)$ и $\gamma_{3\omega}(T)$, для чистого KNO_3 сегнетоэлектрическая фаза при охлаждении возникает при температуре 124°C и существует вплоть до 100°C . Для композитов $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_x$ с со средним размером частицами $\text{Al}_2\text{O}_3\text{ }1\text{ }\mu\text{м}$ зависимости максимальных значений $\epsilon'(x)$ и $\gamma_{3\omega}(x)$ (вблизи фазового перехода) показаны на рис.1.

Основные результаты исследования сводятся к следующему. Увеличение Al_2O_3 в составе композита $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_x$ приводит к увеличению температурного интервала существования сегнетоэлектрической фазы, но уменьшению коэффициента нелинейности, что свидетельствует об уменьшении спонтанной поляризации. Как было показано в [12; 13], основной механизм взаимодействия оксида алюминия с нитратами (KNO_3 , CsNO_3 , RbNO_3) сводится к образованию двойного электрического слоя на границе раздела частиц за счет разных энергий адсорбции отрицательных и положительных ионов. Величина возникшего потенциала при этом может составлять десятки милливольт. Если $\Delta\phi$ будет порядка 10 мВ , то на частицу размером $1\text{ }\mu\text{м}$ будут действовать поля порядка $10^3\text{ В}/\text{см}$. В этой связи при рассмотрении разложения Ландау-Гинсбурга мы должны учитывать действие электрического поля, которое будет стабилизировать сегнетоэлектрическую фазу.

На рис.2 приведены зависимости максимального значения коэффициента третьей гармоники от напряженности электрического поля для разных x .

Для композитов $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_x$ со средним размером частицами 100 нм зависимости макси-

мальных значений $\gamma_{3\omega}(x)$ и температур фазовых переходов от долевого содержания Al_2O_3 показаны на рис.3 и рис.4.

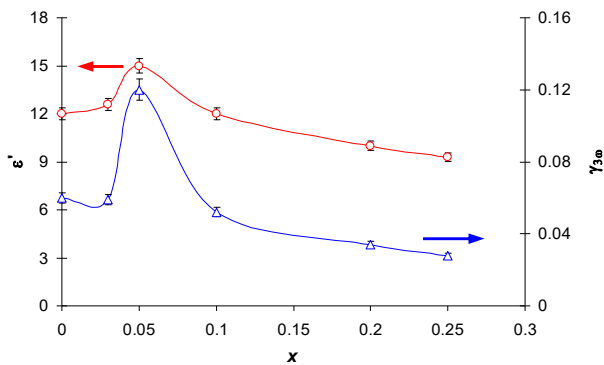


Рис. 1. Зависимость максимальных значений ϵ' и $\gamma_{3\omega}$ от x для композита $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_x$ с размером частиц Al_2O_3 1 мкм.

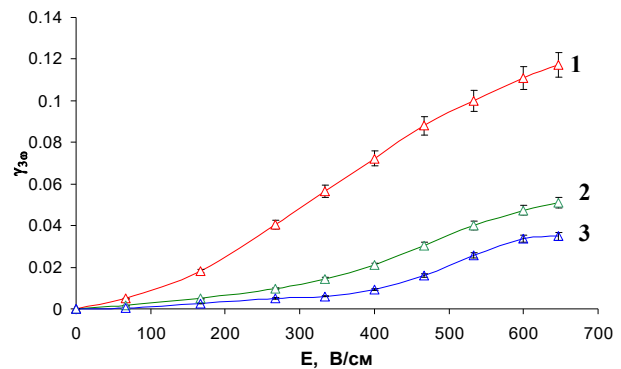


Рис. 2. Зависимость максимальных значений $\gamma_{3\omega}$ от напряженности электрического поля для композита $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_x$ с размером частиц Al_2O_3 1 мкм.

(1 – $x = 0,05$; 2 – $x = 0,1$; 3 – $x = 0,2$)

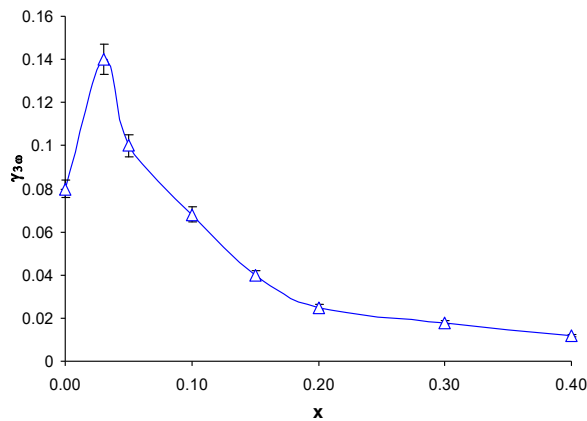


Рис. 3. Зависимость максимальных значений $\gamma_{3\omega}$ от x для композита $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_x$ с размером частиц Al_2O_3 100 нм.

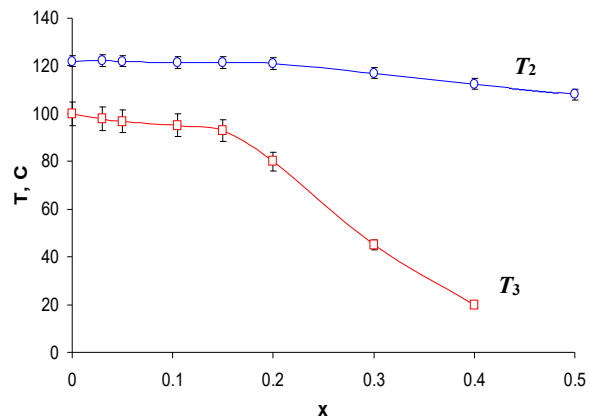


Рис. 4. Зависимость T_2 и T_3 от x для композита $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_x$ с размером частиц Al_2O_3 100 нм.

Разброс размера частиц в композите и изменения доли Al_2O_3 будет приводить к тому, что между температурами T_2 и T_3 будут существовать две фазы II и III, соотношение между которыми будет меняться, что и приводит к уменьшению эффективной спонтанной поляризации. Максимум на кривых $\gamma_{3\omega}(x)$ при $x \approx 3-5\%$, вероятно, обусловлен заполнением частицами Al_2O_3 пустот между частицами KNO_3 , о чем также свидетельствует увеличение максимума ϵ' при этих значениях x (см. рис.1). Основной отличительной чертой композитов второго типа, полученных с использованием плавления, является большая механическая прочность и большее значение эффективной диэлектрической проницаемости композита, которая увеличивается 1,5-1,8 раза.

Заключение

Таким образом, исследования температурных зависимостей диэлектрических свойств композитов $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_x$ показали, что увеличение содержания Al_2O_3 приводит к расширению сегне-

тоэлектрической фазы и уменьшению коэффициента третьей гармоники. Зависимость $\gamma_{3\omega}(x)$ имеет не-монотонный характер, достигая максимального значения при $x = 0,03$ для композита с частицами Al_2O_3 100 нм и $x = 0,05$ для композита с частицами Al_2O_3 1 мкм, что, вероятно, обусловлено различным заполнением пустот между частицами KNO_3 .

1. Scott J.F. *Ferroelectric Memories*. // Springer Series in Advanced Microelectronics. –2000. –V. 3, iss. 26. 248 p.
2. Stukova, E.V. Baryshnikov S.V. Stabilization of the ferroelectric phase in $(\text{KNO}_3)_{1-x} - (\text{BaTiO}_3)_x$ Composites. // *Inorganic materials: applied research*. – 2011. – V.2. – N5. – P.434-438.
3. Stukova, E.V. Baryshnikov S.V. Диэлектрические исследования сегнетоэлектрических композитов на основе $(\text{KNO}_3)_{1-x} - (\text{KNbO}_3)_x$. // *Перспективные материалы*. – 2011. – №13. – С.801-805.
4. Shimada S., Aoki T. Stabilization of the ferroelectric phase of KNO_3 by doping with Na^+ , determined by the acoustic emission method // *Chemistry Letters*. – 1996. – V. 25, iss. 5. – P. 393-394.
5. Милинский, А.Ю. Иванюк Ю.О., Барышников С.В. Стабилизация сегнетоэлектрической фазы KNO_3 в твердых растворах $(\text{KNO}_3)_{1-x}(\text{NaNO}_2)_x$. // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2012. – Т.14. – №4. – С. 141-147.
6. Барышников С. В., Милинский А. Ю., Стукова Е. В., Зеева А. А. Диэлектрические свойства сегнетоэлектрического композита нитрат калия – нитрат цезия. // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. – 2022. – 15 (1). – С.7-15.
7. Milinskiy A.Yu., Baryshnikov S.V., Zeeva A.A. Dielectric properties of ferroelectric composite $(\text{KNO}_3)_{(1-x)}/(\text{RbNO}_3)_x$ // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. – 2023. –16 (1.1) – С. 38-42.
8. Chen, A., Chernow A. Nature of ferroelectricity in KNO_3 // *Phys. Rev.* – 1967. – V.154. – №2. – P. 493 – 505.
9. Deshpande, V.V., Karkhanavala M.D., Rao U.R.K. Phase transitions in potassium nitrate // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 1974. – V.6. – P. 613-621.
10. Nimmo, J.K., Lucas B.W. The crystal structures of γ - and β - KNO_3 and the $\alpha \leftarrow \gamma \leftarrow \beta$ phase transformations. // *Acta Cryst.* – 1976. – V.B32. – P. 1968-1971.
11. Ikeda S. Nonlinear dielectric constant and ferroelectric-to-paraelectric phase transition in copolymers of vinylidene fluoride and trifluoroethylene / S. Ikeda, H. Kominami, K. Koyama, Y. Wada // *J. Appl. Phys.* – 1987. – V.62. – №8. – P. 3339 – 3342.
12. Двойной слой и адсорбция на твердых электродах IV, Материалы всесоюзного симпозиума. / под редакцией У.В.Пальма.– Тарту: 1975. – 365 с.
13. Атаев М.Б., Гафуров М.М., Эмиров Р.М., Рабаданов К.Ш., Амиров А.М. Исследование фазового состава и структуры нанокомпозитов $(1 - x)\text{KNO}_3 + x\text{Al}_2\text{O}_3$ методом рентгеновской дифракции. // *ФТТ*. – 2016. – т.58, в.1. – С.2336-2339.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ СУБМИКРОПОРОШКОВ ОКСИДА ЦИНКА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

И.В. Верхотурова, В.В. Нещименко, Ю.А. Гужель

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

rusia@mail.ru

В работе приведены результаты исследования влияния электромагнитного излучения Солнца при разном времени воздействия на оптические свойства субмикропорошков оксида цинка.

STUDY OF THE ABSORPTION SPECTRA OF ZINC OXIDE SUBMICROPOWDERS AFTER EXPOSURE TO ELECTROMAGNETIC RADIATION OF SOLAR

I.V. Verkhoturova, V.V. Neshchimenko, Y.A. Guzhel

Amur State University, Blagoveshchensk

rusia@mail.ru

This paper presents the results of studying the effect of solar electromagnetic radiation at different exposure times on the optical properties of ZnO submicropowders.

DOI:10.22250/9785934934195_37

Актуальной проблемой в области космического материаловедения является разработка способов повышения радиационной стойкости порошков оксида цинка, применяемых в качестве пигментов терморегулирующих покрытий. В порошках оксида цинка при длительном воздействии космического излучения образуется большое количество центров поглощения, которые приводят к появлению полос поглощения в УФ-, видимой и ближней ИК-областях спектра, обуславливая увеличение интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения [1; 2]. Понимание механизмов формирования радиационных центров поглощения в порошках оксида цинка в зависимости от размера частиц необходимо для разработки способов повышения радиационной стойкости порошков.

В данной работе приведены результаты исследования спектров диффузного отражения субмикропорошков оксида цинка (размер частиц от 100 до 300 нм) после воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) Солнца. Облучение порошков ZnO проводилось в имитаторе факторов космического пространства «Спектр-1» (Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники). Имитация солнечного излучения в диапазоне от 0,2 до 2,1 мкм осуществлялась ксеноновой дуговой лампой ДКСР-3000 В. Облучение проводилось при 1 эс в течение 2, 5, 10 и 15 часов. Регистрация спектров диффузного отражения порошков проводилась абсолютным методом (*in situ*) также в камере «Спектр-1». Представление спектров диффузного отражения оксида цинка и их дальнейшая обработка проводились в программном пакете OriginLab.

На рис. 1 представлены разностные спектры диффузного отражения (спектры наведенного поглощения) субмикропорошков ZnO после облучения ЭМИ при разном времени воздействия. В программе XPSPeak осуществлено разложение на индивидуальные полосы спектров наведенного поглощения субмикропорошков ZnO (рис. 2). При разложении использовались известные значения положений основных максимумов полос поглощения наведенных дефектов в оксиде цинка, представленных в работе [2].

В спектрах наведенного поглощения субмикропорошков оксида цинка (при данных условиях воздействия ЭМИ) при их сравнении со спектрами наведенного поглощения микро- и нанопорошков ZnO наблюдается следующее.

Величина наведенного поглощения субмикропорошков оксида цинка в УФ-, видимой и ближней ИК-областях спектра меньше, чем для микро- и нанопорошков оксида цинка (рис. 1). Это означает, что отражательная способность субмикропорошков выше, чем у микро- и нанопорошков в области длин волн от края основного поглощения до ближней ИК-области.

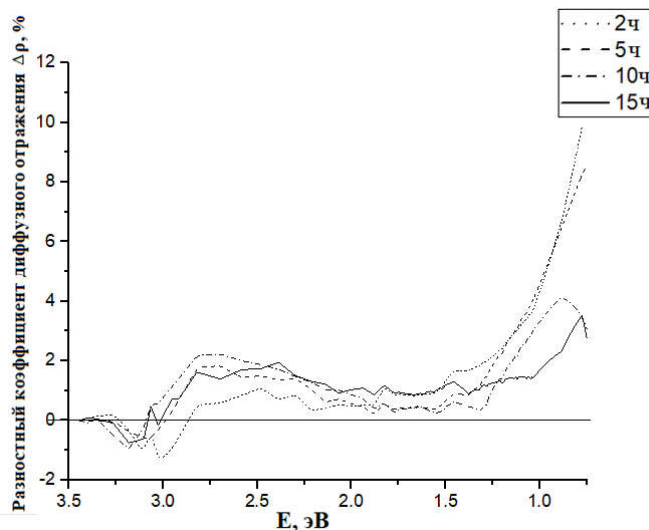


Рис. 1. Спектры наведенного поглощения субмикропорошков оксида цинка, при разном времени воздействия ЭМИ.

В спектрах субмикропорошков, в отличие от спектров микро- и нанопорошков, в области от 3,5 до 2,90 эВ наблюдаются полосы, имеющие отрицательную интенсивность (рис. 1). Результат разложения спектров наведенного поглощения субмикропорошков ZnO на индивидуальные полосы показал, что отрицательную интенсивность при минимальном времени воздействия имеют полосы дефектов катионной подрешетки (V_{Zn}^{2-} , V_{Zn}^{-} , Zn_i^{2+} , Zn_i^+) (рис. 2, А). С увеличением времени воздействия до 15 часов отрицательная интенсивность полос поглощения остается только у дефектов Zn_i^{2+} и Zn_i^+ (рис. 2, В и Г). При этом величина интенсивности этих полос с увеличением времени воздействия ЭМИ уменьшается.

В спектрах наведенного поглощения субмикропорошков ZnO, в отличие от спектров микро- и нанопорошков, полосы поглощения в диапазоне энергий от 1,28 до 0,75 эВ (характерные для акцепторно-донорных пар, кислородных вакансий и междоузельного кислорода [2]) имеют интенсивность, превосходящую интенсивность полос поглощения дефектов катионной подрешетки (рис. 2). С увеличением времени воздействия ЭМИ наблюдается понижение интенсивности полос поглощения в диапазоне энергий от 1,28 до 0,75 эВ на фоне увеличения интенсивности полос поглощения в диапазоне энергий от 3,0 до 1,28 эВ (рис. 2). При времени воздействия ЭМИ 15 часов видно, что величина наведенного поглощения в этом диапазоне энергий выравнивается (рис. 2, Г).

В отличие от спектров наведенного поглощения микро- и нанопорошков, где основной вклад в поглощение в видимой области спектра обусловлен дефектами именно катионной подрешетки, в спектрах наведенного поглощения субмикропорошков ZnO наблюдается не значительное отличие в интенсивности полос поглощения дефектов катионной и анионных подрешеток, а также акцепторно-донорных пар.

Исследование спектров наведенного поглощения субмикропорошков оксида цинка после воздействия на них ЭМИ Солнца показало, что отражательная способность субмикропорошков выше, чем у микро- и нанопорошков в области длин волн от края основного поглощения до ближней ИК-области.

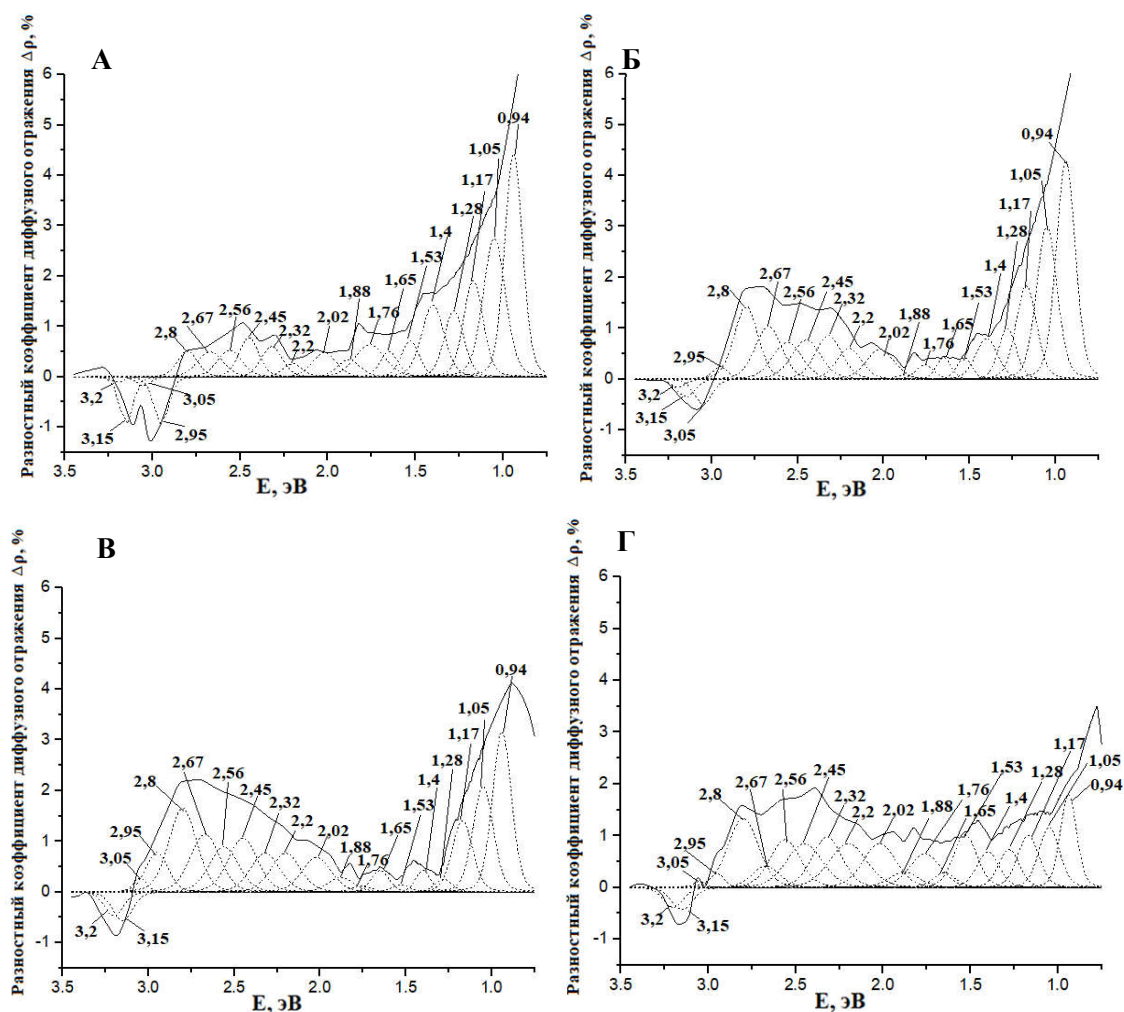


Рис. 2. Разложенные на индивидуальные полосы спектры наведенного поглощения субмикropорошков ZnO после различного по времени воздействия ЭМИ: 2 часа (А), 5 часов (Б), 10 часов (В), 15 часов (Г).

Полосы поглощения в диапазоне энергий от 1,28 до 0,75 эВ в спектрах наведенного поглощения субмикropорошков оксида цинка имеют интенсивность, превосходящую интенсивность полос поглощения дефектов катионной подрешетки (от 3,2 до 2,8 эВ), дающих основной вклад в наведенное поглощение микро- и нанопорошков. С увеличением времени воздействия ЭМИ наблюдается понижение интенсивности полос поглощения в диапазоне энергий от 1,28 до 0,75 эВ на фоне увеличения интенсивности полос поглощения в диапазоне энергий от 3,0 до 1,28 эВ. Для объяснения вышеописанных фактов необходимы дальнейшие исследования по воздействию электромагнитного излучения Солнца при разных значениях эсо, воздействию протонов и электронов.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Госзадание № 122082600014-6 (FZMU-2022-0007).

1. Семкин Н.Д. Испытания материалов и элементов электронного оборудования космических аппаратов: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. – 320 с.
2. Нецименко В.В. Структура, свойства и радиационная стойкость оксидных микро- и нанопорошков и отражающих покрытий, изготовленных на их основе: дис. д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 / В.В. Нецименко; ФГБОУ ВО ТУСУР. – Томск. – 2016. – 273 с.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА НА СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ МИКРО- И НАНОПОРОШКОВ ОКСИДА ЦИНКА

И.В. Верхотурова, В.В. Нещименко, Ю.А. Гужель

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

rusia@mail.ru

В данной работе приведены результаты исследования влияния электромагнитного излучения Солнца при разном времени воздействия на оптические свойства микро- и нанопорошков ZnO.

INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION OF SOLAR ON THE ABSORPTION SPECTRA OF ZINC OXIDE MICRO- AND NANOPOWDERS

I.V. Verkhoturova, V.V. Neshchimenko, Y.A. Guzhel

Amur State University, Blagoveshchensk

rusia@mail.ru

This paper presents the results of studying the effect of solar electromagnetic radiation at different exposure times on the optical properties of ZnO micro- and nanopowders.

DOI:10.22250/9785934934195_40

В космическом пространстве внешняя поверхность космического аппарата подвергается воздействию ионизирующего излучения, сложного по составу, энергии и процессу воздействия. При длительных сроках воздействия ионизирующих излучений в порошках оксида цинка, применяющихся в качестве пигментов терморегулирующих покрытий, происходит изменение их оптических свойств, вызванное образованием центров поглощения [1; 2]. Исследования с имитацией воздействия факторов космического пространства на изменение оптических свойств пигментов проводят при действии одного или двух факторов [1; 2]. Ранее в работах [2 – 4] было проведено исследование изменения оптических свойств микропорошков ZnO как при раздельном, так и комбинированном облучении разными по типу ионизирующими частицами. Установлено, что при раздельном облучении протонами и электронами одинаковой энергией наибольшее изменение величины интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения ($\Delta\alpha_s$) микропорошков ZnO наблюдается при облучении только протонами, а при комбинированном режиме облучения протонами и электронами одинаковой энергией присутствие потока электронов приводит к снижению величины $\Delta\alpha_s$, по сравнению с полученной при облучении только протонами.

В данной работе приведены результаты исследования влияния электромагнитного излучения (ЭМИ) Солнца на оптические свойства микро- и нанопорошков ZnO. Облучение ЭМИ порошков ZnO проводилось в имитаторе факторов космического пространства «Спектр-1» с оптической системой измерения спектров диффузного отражения в вакууме (Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники). Имитация солнечного излучения в диапазоне от 0,2 до 2,1 мкм в «Спектр-1» осуществлялась ксеноновой дуговой лампой ДКСР-3000 В. Облучение проводилось при 1 эсв в течение 2, 5, 10 и 15 часов. Регистрировались спектры диффузного отражения порошков ZnO до и после действия ЭМИ абсолютным методом (*in situ*) также в камере «Спектр-1». Представление спектров диффузного

отражения оксида цинка в виде функции $\rho_{\lambda}(\%) = f(\lambda)$ и их дальнейшая обработка проводилась в программном пакете OriginLab.

На рис. 1 представлены разностные спектры диффузного отражения (спектры наведенного поглощения) микро- и нанопорошков ZnO после облучения ЭМИ при разном времени воздействия.

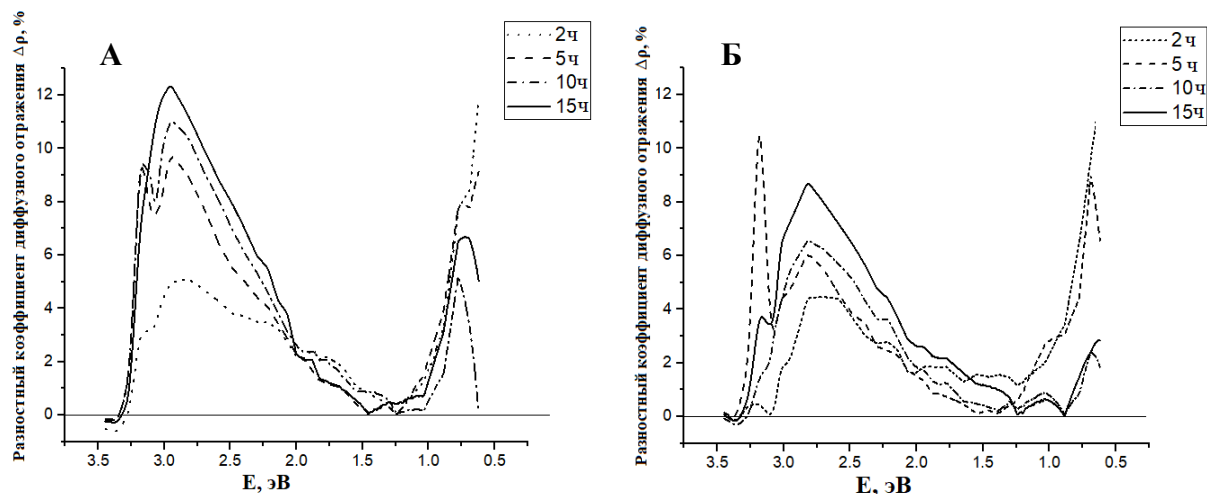


Рис. 1. Спектры наведенного поглощения микро- (А) и нанопорошков (Б) оксида цинка при разном времени воздействия ЭМИ.

В спектрах наведенного поглощения микро- и нанопорошков ZnO (размеры частиц 800-3000 нм и 20-50 нм соответственно) наблюдается возрастание интенсивности интегральной полосы поглощения в УФ- и видимой областях спектра, схожее с поглощением, которое наблюдалось в спектрах оксида цинка после облучения протонами и электронами энергией 100 кэВ, описанное в работах [2 – 4]. В спектрах нанопорошков уровень поглощения свободными электронами в ближней ИК-области спектра выше, чем в спектрах микропорошков. Спектры наведенного поглощения нанопорошков схожи со спектрами микропорошков, но имеют меньшую интенсивность (рис. 1).

В спектрах как микро-, так и нанопорошков ZnO, помимо основного максимума, на 2,95 эВ интегральной полосы поглощения (аналогично, спектрам ZnO, облученного протонами и электронами) наблюдается еще один пик (рис. 1). Для микропорошков данный пик (с максимумом на 3,15 эВ) не четко проявляется при минимальном времени облучения, но при увеличении времени воздействия до 10 часов его интенсивность возрастает, а при 15 часах облучения он исчезает и остается только пик с максимумом на 2,9 эВ. Для нанопорошков второй пик (с максимумом на 3,2 эВ) в интегральной полосе поглощения также нечетко проявляется при минимальном времени облучения, при увеличении времени воздействия его интенсивность возрастает, и более выраженным он становится при 15 часах облучения (рис. 1). Резкое повышение интенсивности этого пика при 5 часах облучения может быть обусловлено погрешностью измерения или обработки спектров. В спектрах наведенного поглощения как микро-, так и нанопорошков ZnO наблюдается поглощение в ближней ИК-области спектра, схожее с поглощением, наблюдаемым в спектрах после облучения электронами. Поглощение в данной области спектра, согласно данным работы [2], может быть обусловлено поглощением различных мод ОН-групп, молекулами кислорода и водорода, адсорбированными на поверхности, или катионными вакансиями, захватившими водород.

В программе XPSPeak проведено разложение на индивидуальные полосы спектров наведенного поглощения микро- и нанопорошков ZnO (рис. 2 и 3). При разложении использовали известные значения положений основных максимумов полос поглощения наведенных дефектов в оксиде цинка, представленных в работе [2]. На спектрах (рис. 2 и 3) указаны полосы поглощения центров, дающих основной вклад в образование интегральной полосы поглощения. Результат разложения показал, что после облу-

чения ЭМИ как микро-, так и нанопорошков ZnO основной вклад в поглощение дают центры, образующиеся в катионной подрешетке ZnO (вакансии цинка V_{Zn}^{2-} и V_{Zn}^- , междуузельные ионы цинка Zn_i^{2+} и Zn_i^+ и др.). Точно так же, как и после облучения протонами и электронами. Это может быть связано с тем, что именно эти дефекты катионной подрешетки преобладают среди собственных дефектов оксида цинка.

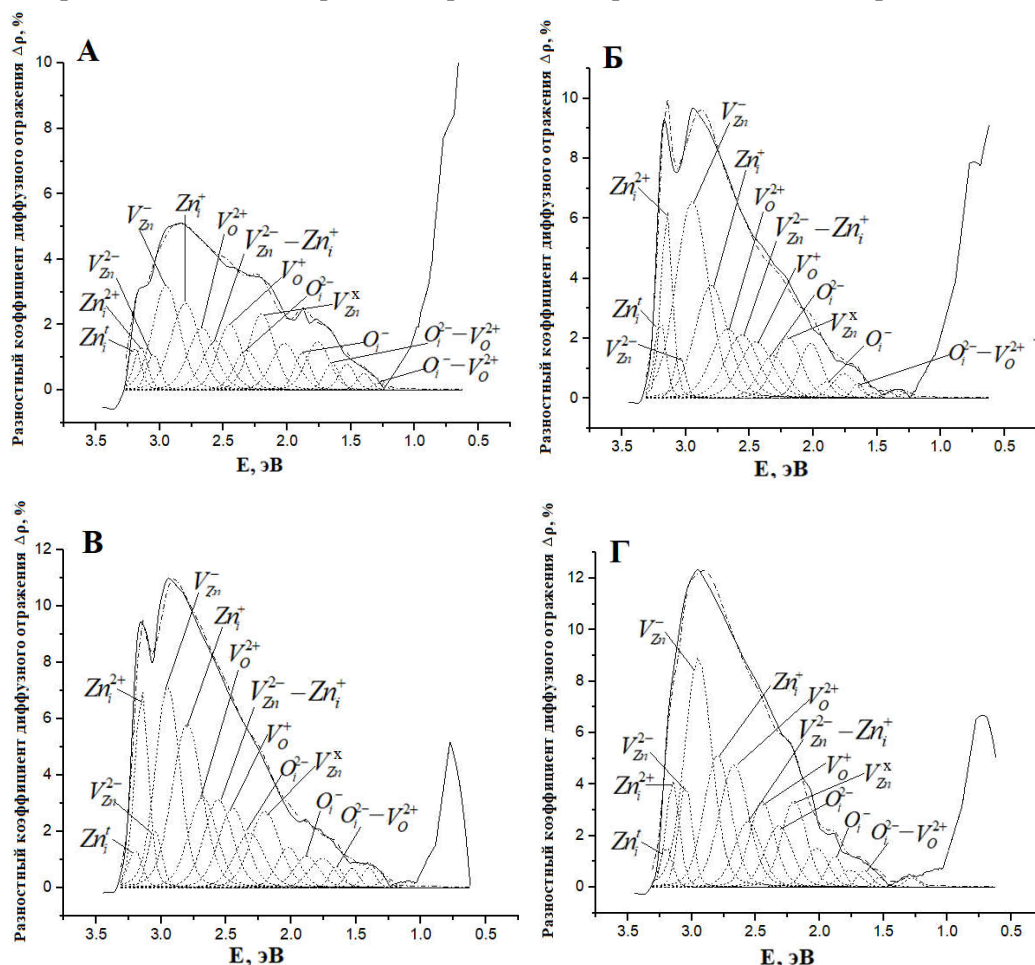
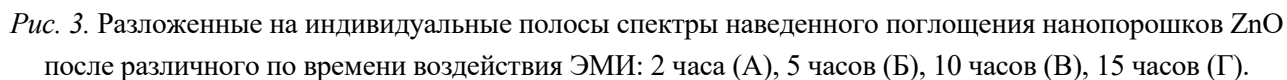


Рис. 2. Разложенные на индивидуальные полосы спектры наведенного поглощения микропорошков ZnO после различного по времени воздействия ЭМИ: 2 часа (А), 5 часов (Б), 10 часов (В), 15 часов (Г).

При этом изменение интенсивности полос поглощения отдельных дефектов катионной подрешетки с изменением времени воздействия ЭМИ отличаются у микро- и нанопорошков. Так, в спектрах наведенного поглощения микропорошков ZnO наблюдаемое распределение между интенсивностями полос поглощения дефектов катионной подрешетки (V_{Zn}^{2-} , V_{Zn}^- , Zn_i^{2+} , Zn_i^+) схоже с распределением, наблюдаемым в спектрах микропорошков после облучения электронами [2 – 4]. Изменение интенсивности полос поглощения этих дефектов со временем воздействия ЭМИ может быть описано схемами образования дефектов, аналогичными схемам, представленным в работах [2 – 4]. В спектрах наведенного поглощения нанопорошков наблюдаемое распределение между интенсивностями полос поглощения этих же дефектов отличается. Максимальную интенсивность имеет полоса Zn_i^+ , а не V_{Zn}^- , как для микропорошков. Для объяснения этого необходимы дальнейшие исследования. Также следует заметить, что полосы поглощения в диапазоне от 2,25 до 1,25 эВ, характерные для дефектов анионной подрешетки (O_i^{2-} , O_i^- , V_o^{2+} , V_o^+) и акцепторно-донорных пар ($V_{Zn}^{2-} - Zn_i^+$, $O_i^{2-} - V_o^{2+}$), как в спектрах микро-, так и нанопорошков ZnO имеют интенсивность свыше 1 %, в отличие от полос поглощения в этом же диапазоне в спектрах оксида цинка, облученного протонами и электронами.



Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Госзадание № 122082600014-6 (FZMU-2022-0007).

- 43

СТРУКТУРА, ТРАНСПОРТНЫЕ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАТОНКИХ И ТОНКИХ ПЛЕНОК МОНОСИЛИЦИДА ХРОМА НА Si(111)

**Н.Г. Галкин¹, Е.Ю. Субботин¹, К.Н. Галкин¹, О.В. Кропачев¹, С.А. Доценко¹, О.А. Горошко¹,
Е.В. Аргунов²**

¹ Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН (г. Владивосток)

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (г. Москва)

Для выращенных на подложке Si(111) и на поверхностной фазе (ПФ) Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -R30°-Cr методом твердофазной эпитаксии (ТФЭ) при температуре 350 °С ультратонких (УТ, 5-8 нм) и тонких (14 – 30 нм) пленках моносилцида хрома (CrSi) определена кристаллическая структура, напряжения в зернах и их ориентация относительно подложки. Температурные измерения проводимости ($T = 2-450$ K) показали, что УТ пленки характеризуются как плохие металлы с немонотонной температурной зависимостью проводимости. Пленки CrSi с толщинами 14 нм имеют металлический характер проводимости, примерно в 2-3 раза большей по сравнению с УТ-пленками. Термоэлектрические измерения показали, что УТ-пленки имеют коэффициент Зеебека до +200 мкВ/К при 100 K с преимущественным вкладом дырок до 400 K. Достаточно высокие проводимость и коэффициент Зеебека обеспечивают высокий фактор мощности (3,0-4,0 мВт/(м × K²)) при температуре 120-200 K для УТ-пленки CrSi, что доказывает их перспективность в качестве низкотемпературного термоэлектрика.

STRUCTURE, TRANSPORT AND THERMOELECTRIC PROPERTIES OF ULTRATHIN AND THIN FILMS OF CHROMIUM MONOSILICIDE ON Si(111)

**N.G. Galkin¹, E.Yu. Subbotin¹, K.N. Galkin¹, O.V. Kropachev¹, S.A. Dotsenko¹, O.A. Goroshko¹,
E.V. Argunov²**

¹ Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, (Vladivostok)

² National Research Technological University "MISIS", (Moscow)

For ultrathin (UT, 5-8 nm) and thin (14 – 30 nm) films of chromium monosilicide (CrSi) the crystal structure, stresses in grains and their orientation relative to the substrate were determined. Temperature measurements of conductivity ($T = 2-450$ K) showed that UT films are characterized as poor metals with a nonmonotonic temperature dependence of conductivity. CrSi films with a thickness of 14-30 nm have a metallic character of conductivity with approximately 2-3 times higher conductivity compared to UT films. Thermoelectric measurements have shown that UT films have a Seebeck coefficient up to +200 μ V/K at 100 K with a predominant contribution of holes up to 400 K. Sufficiently high conductivity and Seebeck coefficient provide a high power factor (3,0-4,0 mW/(m × K²)) at a temperature of 120–200 K for UT CrSi films, which proves their promise as a low-temperature thermoelectric.

DOI:10.22250/9785934934195_44

Моносилцид хрома (CrSi) является экологически чистым материалом с умеренным удельным сопротивлением, выраженными металлическими свойствами и высокой термической стабильностью [1; 2], что позволяет использовать его в виде толстых пленок в качестве резисторов в микроэлектронике. При этом сообщается, что объемный CrSi может быть как парамагнитным металлом [3; 4], так и проявлять слабый ферромагнитный характер [5]. Нарушение инверсионной симметрии намагниченности и положительного магнитосопротивления в объемном CrSi демонстрируют конкурирующие антиферромагнитные и ферромагнитные корреляции, что доказывает наличие в нем взаимодействия Дзялошинского – Морри и перспективность для термоэлектроники [6]. Тонкие пленки CrSi исследованы

только в двух работах. Формирование CrSi в виде тонких пленок (до 0,32 нм по хрому) на кремниевой подложке Si(111) показало [7], что оптимальным методом роста является твердофазная эпитаксия (ТФЭ) с температурой отжига не выше 350 °С, что позволяет сформировать гладкую эпитаксиальную пленку CrSi с картиной дифракции медленных электронов (ДМЭ) $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}/R30^\circ\text{-Cr}$, но транспортные свойства этой пленки исследованы не были. Более толстые пленки CrSi были сформированы многократным использованием метода ТФЭ с порцией хрома толщиной 0,3 нм и температурой отжига $T = 350^\circ\text{C}$ [8]. При этом было замечено ухудшение кристаллического качества пленок CrSi при росте общей толщины хрома от 0,3 до 2,4 нм. Транспортные *in situ*-холловские измерения показали, что с толщины хрома 0,9 нм пленка CrSi стала проявлять металлические свойства с дырками в качестве основных носителей со слоевой концентрацией около 10^{12} см^{-2} в диапазоне температур от 360 до 540 К. При толщине хрома 2,4 нм внешние измерения коэффициента Зеебека показали положительные величины, которые с ростом температуры слабо увеличивались от 5 до 20 мкВ/К.

Целью представленной работы было выяснение возможности роста сплошных и гладких пленок CrSi с толщиной до 30 нм и установление влияния параметров ростовой процедуры на их транспортные и термоэлектрические свойства. В связи с этим был исследован рост, кристаллическая структура и температурные зависимости проводимости, термо-эдс и фактора мощности для тонких пленок CrSi, выращенных методом ТФЭ на атомарно-чистой поверхности $\text{Si}(111)7\times7$ и поверхностной фазе $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}/R30^\circ\text{-Cr}$, но в отличие от работ [7; 8] при однократном осаждении слоя хрома и с однократным отжигом.

Рост пленок CrSi на кремниевой подложке проводили в сверхвысоковакуумной камере (СВВ-камера) установки VARIAN с базовым вакуумом $2\cdot 10^{-10}$ Тор, которая была оснащена анализатором электронной Ожэ-спектроскопии (ЭОС), сублимационным источником хрома, кварцевым датчиком толщины, трехкоординатным манипулятором и держателем на три образца. В качестве подложек использовали пластины монокристаллического кремния (Si(111), FZ1000). После загрузки образцов проводили их длительное (8 – 10 ч.) обезгаживание при $T = 650^\circ\text{C}$ с последующей высокотемпературной ($T = 1250^\circ\text{C}$) очисткой подложек кремния с контролем методом ЭОС. Пленки CrSi формировали методом твердофазной эпитаксии (ТФЭ) после осаждения Cr с толщиной (2, 5, 10 и 20 нм) при комнатной температуре с дальнейшим отжигом при $T = 350^\circ\text{C}$ с временами отжига 1, 2, 5 и 10 мин. соответственно. Скорость осаждения хрома калибровали по кварцевому датчику толщины, и во всех экспериментах она составляла 1,55 нм/мин. В качестве подложки использовали, либо атомарно-чистую поверхность кремния ($\text{Si}(111)7\times7$), либо – поверхностную фазу (ПФ) $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}/R30^\circ\text{-Cr}$, сформированную путем осаждения слоя хрома толщиной 0,3 нм при $T = 30^\circ\text{C}$ с отжигом при $T = 400^\circ\text{C}$ в течение 1 мин. После выгрузки из ростовых камер исследовалась морфология выращенных пленок методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47 в полуконтактном режиме.

Структуру выращенных пленок исследовали методом рентгеновской дифракции на дифрактометре RIGAKU SmartLab в диапазоне углов 2θ от 5° до 80° , с шагом $2\theta = 0,01^\circ$. Измерения удельного сопротивления выращенных пленок проводили методом Вау-дер-Пау [9] на установке Teslatron TP в диапазоне температур от 1,5 до 300 К. Высокотемпературные (110 – 450 К) измерения термо-эдс ($\alpha_x(T)$) и удельного сопротивления ($\alpha(T)$) осуществляли на выращенных пленках при линейном расположении четырех прижимных контактов (без предварительного осаждения контактных площадок) на измерительной системе фирмы ООО «Криотел» (ФИАН, Россия) с точностью $\pm 5\%$.

В проведенных ростовых экспериментах выращено шесть пленок с увеличивающейся толщиной осажденного хрома от ультратонких (УТ) (7 – 8 нм) до тонких (14 – 30 нм): три пленки на атомарно-чистой поверхности (образцы A, B и C) и три – на ПФ $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}/R30^\circ\text{-Cr}$ (образцы D, E и F, таблица). После выгрузки из ростовой СВВ-камеры проведено исследование морфологии поверхности пленок.

Наименьшей среднеквадратичной шероховатостью ($\sigma_{rms} = 0,27$ нм) обладает пленка в образце *A* (рис. 1а), выращенная на атомарно-чистой поверхности кремния при минимальной толщине слоя хрома (таблица). Пленка покрывает атомарные ступени кремниевой поверхности и является сплошной. При увеличении толщины осажденного хрома до 7,74 нм (образец *B*, таблица) шероховатость пленки возрастает в 2,6 раза за счет формирования на поверхности пленки островков высотой до 2 нм, размерами 50 – 100 нм и плотностью до $2 \cdot 10^7$ см⁻², но пленка остается сплошной (рис. 1б). Для пленки с максимальной толщиной слоя хрома (15,48 нм, таблица) шероховатость дополнительно возрастает до $\sigma_{rms}=0.9$ нм за счет увеличения высоты островков и их частичного срастания (рис. 1в).

Параметры образцов и подложек, методы роста и характеристики пленок

Образец	Тип подложки, удельное сопротивление в Ом×см	Поверхностная реконструкция подложки	Метод роста /температура отжига (°C)	Толщина слоя хрома, нм	Средне-квадрат. шероховатость, нм	Структура и интенсивность по данным РД
A	Si(111), FZ1000	Si(111)7×7	ТФЭ / 350	3,87	0,27	CrSi(210) Si(111), о. сл.
B	Si(111), FZ1000	Si(111)7×7	ТФЭ / 350	7,74	0,70	CrSi(210) Si(111), слабая
C	Si(111), FZ1000	Si(111)7×7	ТФЭ / 350	15,48	0,90	CrSi(210) Si(111), интенс. + НК CrSi(310), слабая
D	Si(111), FZ1000	Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ / R30°-Cr	ПФ: 0.3 нм Cr / 400 + пленка: ТФЭ / 350	3,82	0,40	CrSi(210) Si(111), о. сл.
E	Si(111), FZ1000	Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ / R30°-Cr	ПФ: 0.3 нм Cr / 400 + пленка: ТФЭ / 350	7,63	0,40	CrSi(210) Si(111), слабая
F	Si(111), FZ1000	Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ / R30°-Cr	ПФ: 0.3 нм Cr / 400 + пленка: ТФЭ / 350	15,26	1,10	CrSi(210) Si(111) интенс. + НК CrSi(310), слабая

Но большая часть поверхности пленки является гладкой. При росте пленки на предварительно сформированной ПФ Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ /R30°-Cr [8] при минимальной толщине слоя хрома на поверхности пленки видны некоторые провалы – углубления (рис. 1г), но пленка остается сплошной с малой шероховатостью ($\sigma_{rms} = 0,4$ нм). При увеличении толщины осажденного хрома до 7,63 нм на поверхности пленки формируется сеточная структура, состоящая из пересекающихся нанопроволок с размерами 10×100 нм² и высотой до 1 нм (рис. 1д), но пленка под ними выглядит сплошной и гладкой, с умеренной шероховатостью (таблица). При максимальной толщине хрома (15,26 нм, таблица), осажденной на ПФ хрома, формируется более разветвленная сеточная структура с высотами нанопроволок до 3 нм и возросшей среднеквадратичной шероховатостью ($\sigma_{rms} = 1,1$ мкм).

Рассмотрим структуру всех выращенных образцов (A – F). По данным спектров РД (рис. 2 (а, б)), помимо вкладов от подложки (пики Si(111), Si(222) Si(333)), присутствуют пики 44,74-44,75° и 64,67-64,7°, интенсивность которых возрастает с толщиной осажденного хрома, как при росте на чистой подложке, так и при росте на ПФ хрома. Обозначенные выше пики соответствуют плоскостям

CrSi(210) и CrSi(310). Интенсивность пика CrSi(210) – 100 %, тогда как CrSi(310) – всего лишь 1,7 %.

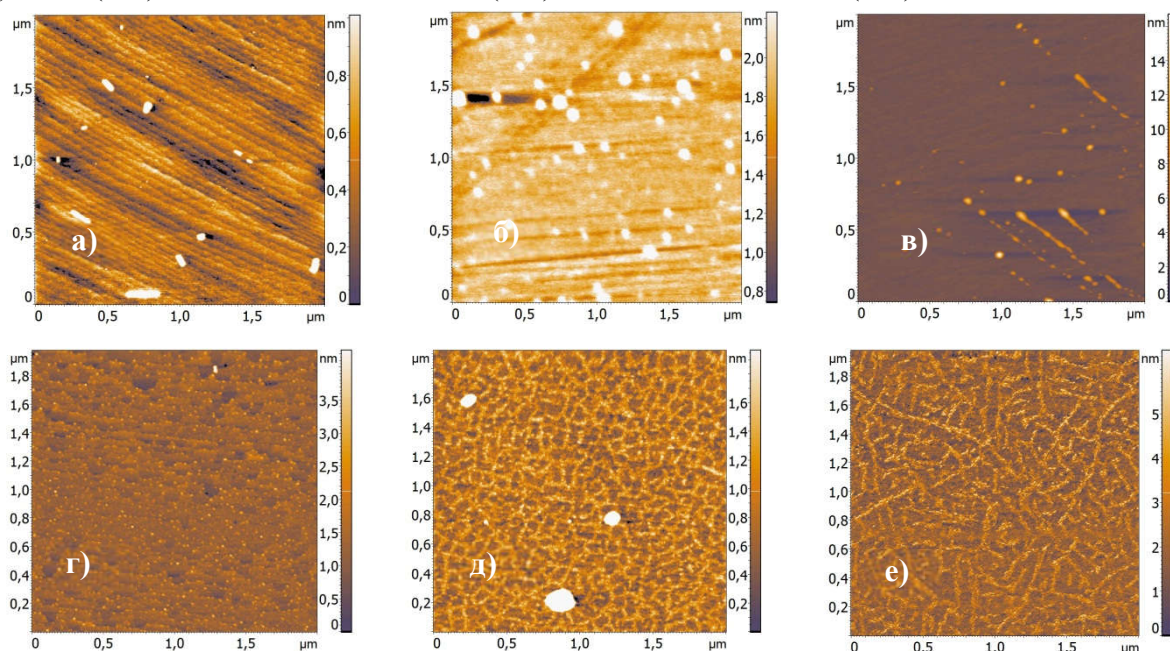


Рис. 1. АСМ-снимки поверхности выращенных пленок CrSi на подложке Si(111)7×7 (а, б, в) и на ПФ Si(111)√3×√3/R30°-Cr (г, д, е), с разными толщинами осажденного хрома: а) – 3,87 нм (образец А); б) – 7,74 нм (образец В); в) – 15,48 нм (образец С); (г) – 3,82 нм (образец D); д) – 7,63 нм (образец E); е) – 15,26 нм (образец F).

При этом пик CrSi(310) хорошо заметен на рис.2 (а) и рис. 2 (б) для толщин хрома 15,26 – 15,48 нм и не наблюдается у пленок с толщинами хрома от 7,7 нм и ниже. Так как угол между плоскостями CrSi(210) и CrSi(310) в CrSi составляет всего 8,1°, то вклад от плоскости CrSi(310) в РД-спектре с повышенной интенсивностью появился вследствие дифракции расходящихся рентгеновских лучей на непараллельных плоскостях нанокристаллов (НК) CrSi. Поэтому можно предположить, что на описанных выше образцах с разными толщинами пленок произошло формирование эпитаксиальной пленки CrSi, для НК которой выполняется соотношение: CrSi(210)||Si(111).

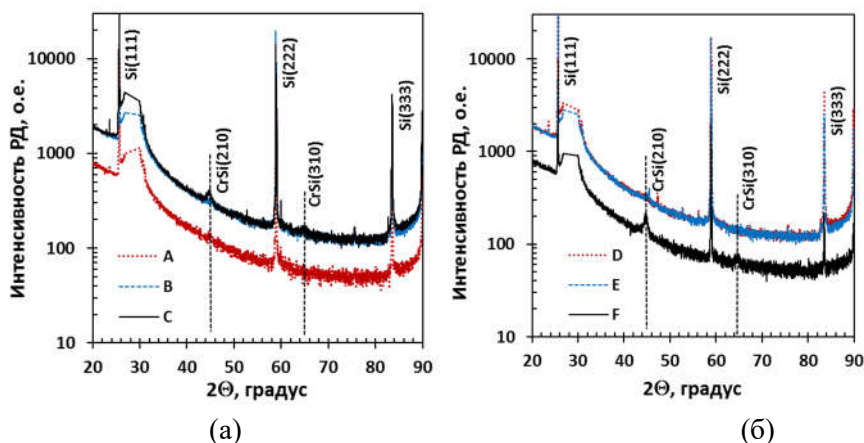


Рис. 2. Спектры рентгеновской дифракции от образцов (А – F) с пленками CrSi разной толщины, выращенных методом ТФЭ на поверхности Si(111)7×7 (а) и ПФ Si(111)√3×√3/R30°-Cr (б).

Положение пиков от плоскости CrSi(210) на рис.2 (а, б) отличается от значения 2Θ для объемного релаксированного CrSi (43,78°). По-видимому, это вызвано деформацией решетки CrSi, выращенной на поверхности Si(111). Вычисленные межплоскостные расстояния для CrSi(210) оказались в узком диапазоне 2,01045-2,02924 Å. Силицид CrSi имеет кубическую решетку (P2₁3, пространственная

группа 198 [7]), поэтому можно легко определить постоянную решетки. Постоянная решетки CrSi для образцов *A* – *F* получилась в диапазоне от 4,4955 до 4,5375 Å. Принимая во внимание значение постоянной решетки релаксированного CrSi (4,62 Å), определили, что решетка НК CrSi сжата на 1,78 – 2,69 %.

Удельное сопротивление УТ-пленок CrSi на подложке Si(111), выращенных без (образец *A*) и с ПФ Cr (образец *D*), исследованы методом Ван-дер-Пау [9] в диапазоне температур от 2 до 300 К, а для всех образцов (*A* – *F*) – методом с линейным расположением четырех зондов в диапазоне температур от 100 К до 450 К (рис. 3). Это позволило пронаблюдать для УТ-пленок перекрытие температурных зависимостей удельного сопротивления ($\rho(T)$) в диапазоне от 100 до 300 К.

Для УТ-пленок CrSi обнаружены немонотонные зависимости удельного сопротивления от температуры (рис. 3 (а, б)) с одним минимумом (100 – 150 К) и двумя максимумами (200 – 230 К и 50 К). Наблюдается качественное соответствие хода температурных зависимостей $\rho(T)$, снятых в двух температурных диапазонах, а различие в значениях удельного сопротивления объясняется менее точным определением удельного сопротивления для случая линейного расположения зондов без учета коэффициентов формы. Максимумы удельного сопротивления при 200 – 230 К (рис. 3) с последующим его снижением с уменьшением температуры могут быть объяснены формированием в сверхтонкой и упорядоченной пленке CrSi волны зарядовой плотности, что является квантовым эффектом [10], который ранее для моносилцида хрома в виде монокристаллов и объемных поликристаллов CrSi не наблюдался.

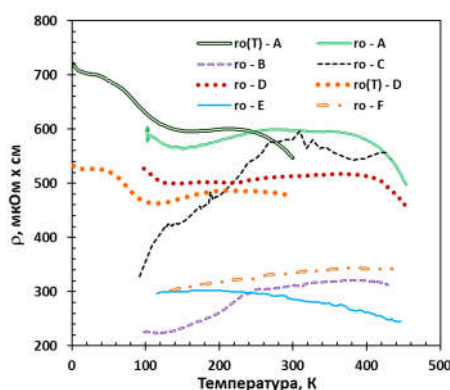


Рис. 3. Низкотемпературные ($T=1,5 - 300$ К) зависимости удельного сопротивления ($\rho(T)$) для УТ-пленок CrSi в образцах *A* и *D* и высокотемпературные ($T=100-450$ К) зависимости $\rho(T)$ для пленок в образцах *A* – *F*.

В исследуемых сверхтонких пленках CrSi (образцы *A* и *D*) слабое (в 1,1 – 1,2 раза) увеличение удельного сопротивления с понижением температуры от 120 К до 50 К связано, по-видимому, с эффектом Кондо [11] за счет магнитных примесей. А снижение наклона зависимости $\rho(T)$ при температурах ниже 40 К (рис. 3) может быть следствием эффекта слабой локализации [12], что требует исследований магнеторезистивного эффекта в широком диапазоне магнитных полей (0 – 8 Тл) и температур (2 – 300 К). По величине удельного сопротивления во всем диапазоне температур пленки в образцах *A* и *D* соответствуют пределу Мотта – Иоффе – Регеля [13], что характеризует их как плохие металлы. В образцах с большими толщинами пленок CrSi, выращенных без и с поверхностной фазой хрома, наблюдается металлический характер проводимости (рис. 3) с, примерно, в 2-3 раза меньшими значениями удельного сопротивления по сравнению с УТ-пленками. При этом разница в величинах удельного сопротивления между образцом *C* и образцами *B*, *E* и *F* может быть объяснена влиянием окисления верхнего слоя хрома при неполном силицидообразовании на поверхности кремния по сравнению с полным силицидообразовании на ПФ хрома. Последнее коррелирует с изменениями в морфологии в образцах *E* и *F* (рис. 1 (д, е)).

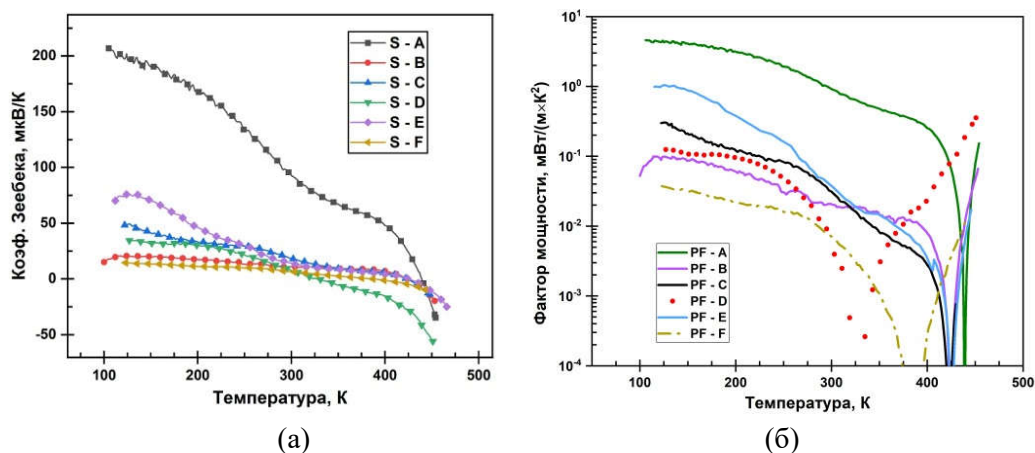


Рис. 4. Температурные зависимости коэффициента Зеебека (а) и фактора мощности (б) для пленок CrSi с разными толщинами Cr, выращенными без (образцы A, B и C) и с поверхностной фазой Cr (образцы D, E и F).

Термоэлектрические измерения в диапазоне температур 120 – 450 К показали, что коэффициент Зеебека (рис. 4а) сохраняется положительным до 300 – 400 К и затем меняет знак на отрицательный, что доказало преимущественный вклад электронов в конкуренции с дырками. Максимальное значение коэффициента Зеебека наблюдается для УТ-пленки CrSi, выращенной на атомарно-чистой поверхности кремния (образец A), что свидетельствует о высокой плотности состояний в пленке на уровне Ферми. С увеличением толщины пленок коэффициент Зеебека уменьшается по величине, но не монотонно. Второй по величине коэффициент Зеебека наблюдается для пленки в образце E (рис. 4а), выращенной на ПФ хрома с промежуточной толщиной (7,63 нм, таблица) и имеющей сеточную структуру, состоящую из пересекающихся нанопроволок (рис. 1д) на поверхности пленки. Данная сеточная структура также может способствовать увеличению плотности состояний на уровне Ферми при низких температурах. Проведенные расчеты температурных зависимостей фактора мощности (рис. 4 б) показали, что максимальные его величины 3,0 – 4,0 мВт/(см·K²) при температуре 120 – 200 К наблюдаются для УТ-пленки CrSi в образце A, а величина 1,0 мВт/(см·K²) при температуре 100 – 130 К характерна для пленки CrSi в образце E.

Выводы

Методами твердофазной эпитаксии (ТФЭ) в сверхвысоком вакууме при температуре 350 °С выращены ультратонкие (УТ 5 – 8 нм) и тонкие (14 – 30 нм) пленки моносилцида хрома (CrSi) на подложке Si(111) и на поверхностной фазе (ПФ) Si(111)/ $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -R30°-Cr. Методом рентгеновской дифракции установлено, что УТ и тонкие пленки CrSi состоят из нанокристаллов (НК) CrSi с эпитаксиальной ориентацией CrSi(210)//Si(111), а с увеличением толщины появляется вклад от НК CrSi(310). Из вычисленных межплоскостных расстояний определена постоянная решетки CrSi для всех образцов, что позволило установить, что решетка НК CrSi сжата на 1,78 – 2,69 %. Обнаружено, что температурные зависимости проводимости (T=2 – 300 К) для УТ-пленок не монотонны и содержат по два участка полупроводниковой и металлической проводимости, но расположены в области ниже или порядка предела Мотта – Иоффе – Регеля, характеризующих их как плохие металлы. При увеличении толщины пленок от 14 до 30 нм наблюдается переход к металлической проводимости с двух- трехкратным увеличением проводимости. Термоэлектрические измерения в диапазоне температур 120 – 450 К показали, что коэффициент Зеебека для всех образцов с пленками CrSi сохраняется положительным до 320 – 400 К, а затем меняет знак на отрицательный, что доказало преимущественный вклад электронов в конкуренции с дырками. Проведены расчеты температурных зависимостей фактора мощности и показано, что

максимальные его величины 3.0-4.0 мВт/(м×К²) при температуре 120-200 К наблюдаются для УТ-пленки CrSi (без ПФ Cr).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-12-00036.

-
1. Wu F., McLaurin A.W., Henson K.E., Managhan D.G., Thomasson S.L. The effects of the process parameters on the electrical and microstructure characteristics of the CrSi thin resistor films: part I // Thin Solid Films. – 1998. – V. 332. – 418-422.
 2. Tseng H.-W., Feng D. J.-Y., Li C.-L., Yang C.-F. Effects of deposition parameters on properties of high resistance CrSi-based thin-film resistors // International Journal of Modern Physics B. – 2021. - V. 35. - No. 3. - 2150040(1-10).
 3. Shinoda D., Asanabe S. Magnetic properties of silicides of iron group transition elements // J. Phys. Soc. Japan. – 1966. – V. 21. - 555.
 4. Mishra A. K., Krishnan M., Gangrade M., Venkatesh R. and Ganesan V. Transport and calorimetric properties of CrSi // AIP Conference Proceedings. - 2019. – V. 2115. – 030436.
 5. Kousaka Y., Takahashi Y., Ikeda N., Matsui H., a.o. Weak Ferromagnetism in Chiral Inorganic Compound CrSi // JPS Conf. Proc. – 2014. V. 3. – 014037.
 6. Banik S., Chattopadhyay M. K., Tripathi S., Rawat R., Jha S.N. Large positive magnetoresistance and Dzyaloshinskii–Moriya interaction in CrSi driven by Cr 3d localization // Scientific Reports. – 2020. – V. 10. – 12030.
 7. Wetzel P., Pirri C., Peruchetti J.C., Bolmont D. and Gewinner G. Epitaxial growth of CrSi and CrSi₂ on Si(111) // Solid State Communications. – 1988. - V. 65. - No. 10. - 1217-1220.
 8. Galkin N.G., Konchenko A.V., Goroshko D.L., Maslov A.M., Vavanova S.V., Kosikov S.I. Electronic structure, conductivity and carrier mobility in very thin epitaxial CrSi(111) layers with Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ LEED pattern // Applied Surface Science. – 2000. – V. 166. – 113-118.
 9. Кучис Е.В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. –М. Изд-во «Радио и связь». – 1990. - 264 С.
 10. Thorne R.E. Charge-density-wave conductors // Physics Today. - 1996. - V. 49. – No. 5. – 42-49.
 11. Fisk Z., Sarrao J.L., Thompson J.D., Mandrus D., Hundley M.F., a.o. Kondo insulators // Physica B. – 1995. - V. 206-207. – 798-803.
 12. Altshuler B.L., Khmel'nitzkii D., Larkin A.I., Lee P.A. Magnetoresistance and Hall effect in a disordered two-dimensional electron gas // Phys. Rev. B. - 1980. - V. 22. – 5142-5153.
 13. Hussey N.E., Takenaka K., Takagi H. Universality of the Mott-Ioffe-Regel limit in metals // Phil. Mag. – 2004. – V. 84. - 2847-2864.

УДК 538.958

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МИКРОСФЕР ДИОКСИДА КРЕМНИЯ И НАТРИЕВОГО ЖИДКОГО СТЕКЛА

А.Н. Дудин, В.В. Сердакова, А.С. Неретина

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

andrew.n.dudin@gmail.com

Исследованы спектры диффузного отражения и теплопроводность покрытий на основе полых частиц диоксида кремния и натриевого жидкого стекла с концентрацией от 20 до 80 об.%. Установлено, что малая концентрация связующего обуславливает низкую теплопроводность и высокую отражательную способность покрытий.

OPTICAL PROPERTIES AND THERMAL CONDUCTIVITY OF COATINGS BASED ON MICROSPHERES OF SILICON DIOXIDE AND SODIUM LIQUID GLASS

A.N. Dudin, V.V. Serdakova, A.S. Neretina

Amur State University, Blagoveshchensk

andrew.n.dudin@gmail.com

Diffuse reflection spectra and thermal conductivity of coatings based on hollow particles of silicon dioxide and sodium liquid glass with a concentration of 20 to 80 vol.% were studied. It was found that a low concentration of binder causes low thermal conductivity and high reflectivity of coatings.

DOI:10.22250/9785934934195_50

Применение полых частиц диоксида кремния и жидкого натриевого стекла имеет важное значение в области катализа и космического материаловедения. Эти материалы являются легкими и обладают низкой плотностью, что делает их идеальными для использования в космических аппаратах и спутниках. Они также обладают высокой прочностью и термостойкостью, что позволяет им выдерживать экстремальные условия космического пространства, включая высокие температуры, радиацию и экстремальные перепады давления. Кроме того, полые частицы SiO_2 способствуют улучшению теплоотвода и защите от радиации, что повышает надежность и долговечность космических материалов. Полые частицы диоксида кремния обладают высокой поверхностной активностью и большой площадью поверхности, что позволяет им быть эффективными и стабильными катализаторами. Они могут активизировать различные химические реакции, упрощая стадию переноса электрона и ускоряя скорость реакции. Кроме того, полые частицы SiO_2 легко модифицируются, что позволяет обеспечить оптимальные условия для конкретной реакции.

Цель настоящей работы – проведение исследований оптических свойств и теплопроводности покрытий на основе полых частиц диоксида кремния и жидкого натриевого стекла.

Синтез полых частиц осуществлялся с применением шаблонного метода. В качестве шаблонов использовались полистирольные шарики. Для их получения в 500 мл круглодонную колбу с тремя горлами заливали 300 мл этанола, затем добавляли 30 мл стирола и 0,12 г поливинилпирролидона, раствор смешивали со скоростью 300 об/мин. при температуре 80 °C в течение 30 мин. Затем добавляли водный раствор аммония персульфата в соотношениях: 36 мл деионизированной воды и 2 г аммония персульфата для получения частиц полистирола микронных размеров. Далее смешивание происходило при температуре 75 °C в течение 3 ч., до образования белого раствора. Раствор был дважды промыт 500 мл этанола, дважды центрифугирован при 2000 об/мин., после каждого этапа раствор подвергался ультразвуковому воздействию.

Чтобы получить полые частицы диоксида кремния, готовили раствор с добавлением полистирольных шариков, этанола, дистиллированной воды, раствора аммиака и тетраэтоксисилана в соотношениях к объему: 5:40:10:5:1. Затем полученный раствор перемешивали в течение 2 часов при температуре 50 °C. После этого раствор трижды промывали этанолом и водой и центрифугировали при 3000 об/мин. после каждого промывания. На последнем этапе его высушивали и подвергали трехстадийной термообработке при температуре 200, 300 и 500 °C. На выходе был получен белый мучнисто-сыпучий порошок. Для проведения измерений коэффициента теплопроводности были изготовлены образцы покрытий с различным содержанием натриевого жидкого стекла от 20 до 80 % по объему в виде прямоугольного параллелепипеда размером 100×100×10 мм.

Используя сканирующий двухлучевой спектрофотометр с двойным монохроматором Perkin Elmer Lambda 950 шагом 5 нм/с в диапазоне от 250 до 2500 нм, получили спектры диффузного отражения. Для измерения коэффициента теплопроводности использовался микропроцессорный измеритель плотности теплового потока ИТП-МГ4 [1]. Принцип работы прибора ИТП-МГ4 основан на создании стационарного теплового потока, проходящего через плоский образец определенной толщины и направленного перпендикулярно к лицевым граням образца. Основными контролируемыми при эксперименте параметрами являлись толщина образца, плотность теплового потока и температура противоположных лицевых граней образца. Вычисление коэффициента теплопроводности по результатам измерений производится вычислительным встроенным устройством прибора по формуле:

$$\lambda = \frac{H \cdot q}{t_h - t_x}, \quad (1)$$

где H – толщина измеряемого образца, м; q – плотность стационарного теплового потока, проходящего через измеряемый образец, Вт·м⁻²; t_h – температура нагретой грани измеряемого образца, К; t_x – температура холодной грани измеряемого образца, К.

Из полученных спектров диффузного отражения следует (рис.1), что коэффициент отражения (ρ_λ) для покрытий с высоким содержанием микросфер SiO₂ увеличивается и достигает 75 % в видимой области спектра. Увеличение концентрации жидкого стекла приводит к уменьшению отражательной способности покрытий до 55 % в видимой области спектра и до 12 % в ближней ИК-области. Для всех типов покрытий характерны пики поглощения вблизи 1440 и 1915 нм, обусловленные поглощением асимметричных растягивающих колебаний Si-O-Si или Si-O⁻ [2].

Значение интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения (a_s) рассчитывали в соответствии с ГОСТ Р 59313- 2021 и ASTM (E490-00a и E903-96). Расчет показал, что коэффициент a_s для покрытий с содержанием жидкого натриевого стекла в 20 об.% достигает 0,30, при добавлении 40 и 60 об.% интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения увеличивается до 0,35 и 0,39, а при 80 об.% $a_s=0,48$.

Регистрация теплопроводности покрытий на основе полых частиц и жидкого стекла показала, что с увеличением температуры значение λ увеличивается (рис.1 (Б)).

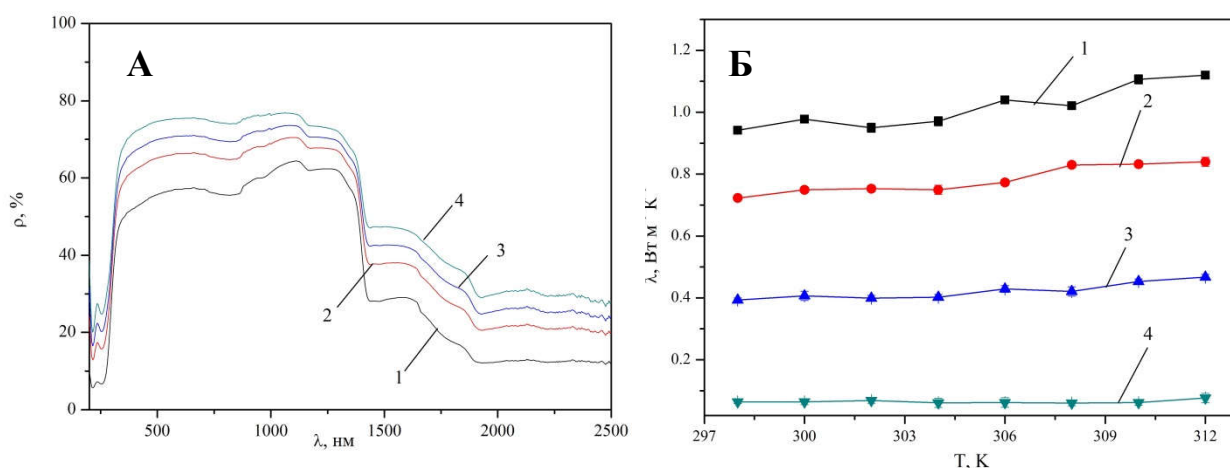


Рис. 1. Спектры диффузного отражения (А) и теплопроводность (Б) покрытий на основе микросфер SiO₂ и жидкого натриевого стекла (1 - 80 об.%, 2 - 60 об.%, 3 - 40 об.%, 4 - 20 об.%).

Теплопроводность покрытий с 20 об.% жидкого стекла составляет 0,064, при концентрации 40 об.% $\lambda=0,39 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; при 80 об.% изменение уже достигает 0,94 Вт·м⁻¹·К⁻¹. Отличие в теплопроводности определяется тем, что полые частицы в составе покрытий после затвердевания жидкого стекла образуют закрытую пористость, которая близка к их объемному содержанию. Теплоперенос в

пористых средах обусловлен кондуктивным теплопереносом по тонкому слою сферы и полимерной матрице.

Механизм теплопроводности может быть оценен в условиях нормального потока к пластине по формуле:

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{связ}} \lambda_{\text{пнгм}}}{\lambda_{\text{пнгм}} \rho + \lambda_{\text{связ}} (1 - \rho)}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{связ}}$ и $\lambda_{\text{пнгм}}$ – коэффициенты теплопроводности каждого из компонентов; ρ – объемная доля связующего.

Во втором случае, когда поток падает параллельно, теплопроводность будет определяться выражением:

$$\lambda = \lambda_{\text{пнгм}} \cdot \rho + \lambda_{\text{связ}} (1 - \rho). \quad (3)$$

Выполненные исследования показали, что интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения покрытий на основе полых частиц диоксида кремния с содержанием жидкого стекла в 20 об.% достигает 0,30, что на 23% больше по сравнению с покрытием, в котором жидкого стекла содержится 80 об.%. Теплопроводность таких покрытий с увеличением концентрации жидкого стекла возрастает от 0,064 до 0,94 Вт·м⁻¹·К⁻¹, с увеличением температуры среды теплоемкость покрытий может возрастать.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Госзадание № 122082600014-6 (FZMU-2022-0007).

1. Измеритель теплопроводности ИТП – МГ4. Руководство по эксплуатации. Технические характеристики. – СПб., 2010. – 37 с.

2. Burns D.A. Handbook of near-infrared analysis / D.A. Burns, E.W. Ciurczak, 2001. – P. 814.

УДК 526.3

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА НАНОЧАСТИЦ В ЖИДКОФАЗНОЙ СРЕДЕ

А.И. Ливашвили, П.В.Виноградова, О.В. Моисеева

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (г. Хабаровск)

livbru@mail.ru

Получено точное решение системы нелинейных уравнений, описывающих нелинейную динамику концентрации наночастиц в жидкофазной среде, подверженной лазерному облучению. При этом теплофизические и гидродинамические параметры рассматриваются как функции концентрации наночастиц.

NONLINEARDYNAMICSOFNANOPARTICLESINALIQUIDPHASEMEDIUM

A.I. Livashvili, P.V. Vinogradova, O.V. Moiseeva

Far Eastern State University of Communications (Khabarovsk)

livbru@mail.ru

An exact solution is obtained for a system of nonlinear equations describing the nonlinear dynamics of the concentration of nanoparticles in a liquid-phase medium subjected to laser irradiation. In this case, the thermophysical and hydrodynamic parameters are considered as functions of the concentration of nanoparticles.

Стремительный прогресс в области нанотехнологий предоставил исследователям широкий арсенал новых материалов с уникальными оптическими и физико-химическими свойствами для применения в биологии и медицине. Например, наножидкости участвуют в создании эффективных охлаждающих систем и управления большими тепловыми потоками [1 – 4].

К числу таких материалов относят коллоидные суспензии, или, как сейчас их принято называть, наножидкости. При исследовании оптических свойств наножидкости принимается, что длина облучаемой световой волны много больше размеров частицы.

Несмотря на большое число публикаций по этой проблематике [5 – 10], многие вопросы, связанные с процессами переноса в наножидкостях, остаются не выясненными, в частности, какова динамика концентрации частиц наножидкости в случае наличия концентрационных зависимостей коэффициента теплопроводности, диффузии, вязкости и поглощения излучения среды. Ранее были опубликованы работы [5 – 8], посвященные динамике концентрации наночастиц в жидкости, подверженной лазерному облучению. Однако в этих исследованиях не во всех теплофизических и гидродинамических параметрах системы учитывалась их зависимость от концентрации наночастиц.

Целью нашей работы является теоретическое исследование динамики концентрации наночастиц в жидкофазной среде, подвергаемой лазерному облучению постоянной интенсивности с учетом зависимости коэффициентов поглощения излучения, теплопроводности, вязкости среды, а также диффузии от концентрации наночастиц (рис.1).

В результате воздействия светового поля в среде возникают градиенты температуры и концентрации, обуславливающие процессы тепломассопереноса (термодиффузия - эффект Соре). Эти явления описываются системой балансных уравнений для температуры и частиц (эффектом Дюфура, в силу его малости, мы пренебрегаем) [11].

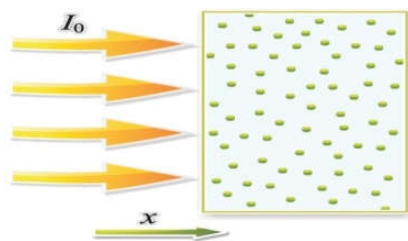


Рис.1. Геометрия задачи.

Запишем систему балансных уравнений теплопроводности и переноса массы (наночастиц) [10]

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(C) \overrightarrow{\text{grad} T}) + \alpha(C) I_0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(D(C) \overrightarrow{\text{grad} C}) + D_T \text{div}(C(1-C) \overrightarrow{\text{grad} T}) - \vec{V} \cdot \overrightarrow{\text{grad} C}, \quad (2)$$

где T – температура среды; C – объемная концентрация среды; $\lambda(C)$ – коэффициент теплопроводности среды; $\alpha(C)$ – коэффициент поглощения световой волны; I_0 – интенсивность падающей световой волны; D – коэффициент диффузии наночастиц; D_T – коэффициент термодиффузии; $\vec{V}$ – скорость концентрационной конвекции; C_p, ρ – известные теплофизические постоянные.

Заметим, что в уравнении (2) первое слагаемое в правой части выражает молекулярную диффузию, второе – поток, обусловленный термодиффузией (эффект Соре), а третье – связь с концентрационной конвекцией.

В дальнейшем будем рассматривать одномерный случай, пренебрегая, ввиду его малости, эффектом Дюфура. Мы также не учитываем потоки, вызванные силами давления на частицы со стороны светового поля.

Далее. В наших вычислениях полагаем:

$$\operatorname{div}\left(\lambda(C)\frac{\partial T}{\partial x}\right) \approx \lambda(C)\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad \operatorname{div}\left(D(C)\frac{\partial C}{\partial x}\right) \approx D(C)\frac{\partial C}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\operatorname{div}(C(1-C)\operatorname{grad}T) \approx C(1-C)\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (4)$$

В справедливости этих приближений можно убедиться прямыми вычислениями. Динамику наночастиц будем изучать на фоне стационарной температуры среды $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$. Как известно, тепловые процессы устанавливаются на 2-3 порядка быстрее, чем диффузионные. Нас будут интересовать процессы с $C \ll 1$. Это неравенство гарантирует отсутствие процессов коагуляции (слипание) наночастиц. Нанометрические размеры частиц позволяют пренебрегать явлениями дифракции и светорассеяния.

Согласно теоретическим и экспериментальным работам [8 – 10], концентрационную зависимость коэффициента теплопроводности среды при малых концентрациях можно считать линейной:

$$\lambda(C) = \lambda_0(1 + pC), \quad (5)$$

где λ_0 – значение коэффициента теплопроводности несущей жидкости (без наночастиц); параметр $p > 0$ – линейный коэффициент.

Концентрационную зависимость коэффициента поглощения света примем в виде $\alpha = \beta C$ [12], ($\beta > 0$). Учитывая стационарный температурный режим, приближения (4), равенство (5) и малую концентрацию, из уравнения теплопроводности получим:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = -\frac{\beta C}{\lambda_0(1+pC)} I_0 \approx -\frac{\beta C}{\lambda_0} I_0(1 - pC). \quad (pC < 1). \quad (6)$$

Ясно, чтобы замкнуть систему (1) – (2), нужно добавить уравнение Навье – Стокса. Такой подход был реализован авторами работ [13], которые решали ее численно. Заметим, что в этих работах коэффициенты $\lambda(C)$, $D(C)$ считались постоянными. Представим конвективную скорость в виде:

$$V(C) = \frac{\eta(C)}{\rho(C) \cdot l}, \quad (7)$$

где $\eta(C)$ – коэффициент динамической вязкости наножидкости; $\rho(C)$ – ее плотность (в дальнейшем считаем, что $\rho(C) \approx \rho_0$); l – характерная длина для системы, значение которой определится позже. Зависимость коэффициентов вязкости и теплопроводности от концентрации будем считать линейной [8]:

$$\eta(C) = \eta_0(1 + pC), \quad \lambda = \lambda_0(1 + qC). \quad (8)$$

Коэффициент диффузии, согласно [13] и (7), представим в виде

$$D(C) = \frac{kT_0}{6\pi\eta(C)a} = \frac{kT_0}{6\pi\eta_0(1+pC)a}, \quad (9)$$

где k – постоянная Больцмана; a – размер наночастицы; T_0 – начальная температура среды.

С учетом равенств (3) – (9) перепишем уравнение (2) в виде

$$(1 + pC)\frac{\partial C}{\partial t} = D_0\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\eta_0}{\rho_0 l}(1 + pC)^2\frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\gamma\beta S_T I_0}{\lambda_0} C^2(1-C)(1 - qC), \quad (10)$$

где $D_0 = \frac{kT_0}{6\pi\eta_0 a}$, $S_T = \frac{D_T}{D}$ – коэффициент Соре. Будем считать его постоянной величиной.

Перейдем в уравнении (10) к безразмерным переменным:

$$\tau = \frac{\gamma\beta I_0}{\lambda_0} S_T t, \quad y = \frac{\rho_0}{\lambda_0} l \beta S_T I_0 x. \quad (11)$$

Тогда уравнение (10) запишется в виде:

$$(1 + pC)\frac{\partial C}{\partial \tau} = d\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - (1 + pC)^2\frac{\partial C}{\partial y} - C^2(1-C)(1 - qC), \quad (12)$$

$$\text{где } d = \left(\frac{\rho_0 D_0 l}{\eta_0}\right)^2 \frac{\beta I_0 S_T}{\lambda_0}. \quad (13)$$

Заметим, что полученное уравнение из-за наличия множителя $(1 + pC)$ в левой части уравнения нельзя в полной мере отнести к обобщенному уравнению типа Бюргерса – Хаксли [13].

При решении нелинейного уравнения (12) используем подстановку Коула – Хопфа [14; 15]:

$$C(y, \tau) = \frac{W'}{W} \cdot \mu, \quad W = W(y, \tau). \quad (14)$$

Подставляя выражение (14) вместе с соответствующими производными в уравнение (12), получим переопределенную систему дифференциальных уравнений относительно функции $W(y, \tau)$, решение которой можно найти приравниванием коэффициентов при одинаковых степенях $W(y, \tau)$. В результате задача сводится к решению уравнения:

$$\frac{d^3 W}{dy^3} - \left(\frac{4}{p\mu} - \frac{1}{d}\right) \frac{d^2 W}{dy^2} + \left(\frac{2}{pd} + \frac{4}{p\mu^2} + \frac{4}{\mu d} + (1+q)\frac{1}{p}\right) \frac{dW}{dy} = 0, \quad (15)$$

где $\mu = \frac{p^2}{q}$.

Используя его решение, а также равенство (14), выражение для концентрации можно представить в виде

$$C(y, \tau) = \frac{p^2}{q} \frac{c_1 \exp(b\tau + gy) + c_2 \exp(r\tau + zy) + c_3}{c_1 g \exp(b\tau + gy) + c_2 z \exp(r\tau + zy)}. \quad (16)$$

Здесь обозначено: c_1, c_2, c_3 – произвольные постоянные; $b = b(p, q, d, y_1)$, $g = g(p, q, d, y_2)$, $r = r(p, q, d, y_1)$, $z = z(p, q, d, y_2)$ – рациональные функции этих параметров, а y_1, y_2 – корни характеристического уравнения (15). То есть мы получили двухфазное волновое решение. К сожалению, явный вид этих функций достаточно громоздкий, но авторы рассчитывают в дальнейшем их детально проанализировать.

Попутно заметим, что если обратиться к диффузионному числу Рейнольдса, записав его в виде:

$$Re = \frac{D_0}{\eta_0} \rho_0 \quad (17)$$

и полагая $D_0 = 10^{-11} \frac{м^2}{с}$, $\eta_0 = 10^{-2} Па \cdot с$, $\rho_0 = 10^3 \frac{кг}{м^3}$, получим оценку: $Re \cong 10^{-11} \ll 1$. Таким образом, можно утверждать, что возникающие в системе течения далеки от турбулентности.

В порядке заключения отметим, что нами получено точное решение системы нелинейных уравнений, которую удалось привести к новому нелинейному автономному уравнению параболического типа. Таким образом, наш подход описывает нелинейную динамику концентрации наночастиц в жидкофазной среде, подверженной лазерному облучению. При этом теплофизические и гидродинамические параметры рассматриваются как функции концентрации наночастиц.

К сожалению, за пределами нашего исследования остались вопросы анализа решения (16) и его графической визуализации. Далее, имея в виду тот факт, что уравнение (10) автономно получаем возможность его качественного исследования в терминах бегущих волн (на фазовой плоскости).

Эти проблемы будут предметом дальнейшего исследования авторов.

1. Рудяк В.Я. Современные проблемы микро- и нанофлюидики // В.Я. Рудяк, А.В. Минаков. – Новосибирск: Наука, 2016. – С.296.

2. Nadeem Baig, Irshad Kammakam and Wail Falath // Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges // Materials Advances . – 2021. – 2. – P.1821 – 1871.

3. Kolahalam A., Kasi Viswanath Review on nanomaterials: Synthesis and applications.// Materials today. –2019. – Vol.18, part 6. – P.2182-2190.

4. Сироткина А.Л., Федорович Е.Д., Перспективы использования наножидкостей в системах отвода тепла в авариях, с плавлением активной зоны // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – №2. – С.81-88.

5. Иванов В.И., Ливашвили А.И. Эффект Дюфура в дисперсной жидкофазной среде в поле гауссова пучка // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / под общей ред. В. М. Самсонова, – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. – Вып.5. –С. 116-119.
6. Livashvili A.I., Krishtop V.V., Bryukhanova T.N., Kostina G.V. Concentration dynamics of nanoparticles under a periodic light field // Physics Procedia. – 2015. –73. – P.156 – 158
7. Livashvili Abram I., Krishtop Victor V., Vinogradova Polina V., Karpets Yuriy M., Efremenko Vyacheslav G., Syuy Alexander V. and Igumnov Pavel V. Appearance of a Solitary Wave Particle Concentration in Nanofluids under a Light Field// Nanomaterials. – 2021.- 11.- P. 1291.
8. Smorodin B. L, Cherepanov L.N. Myznikova B. I, Shliomis M.I. Traveling-wave convection in colloids stratified by gravity // Physical Review, E. – 2011. –Vol. 84. – P. 026305
9. Livashvili A.I., Krishtop V.V., Vinogradova P.V., Kostina G.V., Bryukhanova T. N. Dynamics of nanoparticle concentration in nanofluids under laser light field// AIP, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. – 2017. Series 936. – P.012079 Article ID.
10. El-Ganainy E., Christodoulides D.N., Rotschild C., Segev M. Soliton dynamics and self-induced transparency in nonlinear nanosuspensions // Opt. Express. – 200. – 15. – P.10207–10218.
11. Гроот С. Де, Мазур П. Динамика необратимых процессов. –М.: Мир. –С.1968.-456 .
12. Борен К., Хафман Е. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир. – 1986. – С. 664 .
13. Черепанов И.Н., Попов В. А. Экспериментальное исследование влияния концентрации на параметры наножидкости // Вестник Пермского университета. Серия «Физика». –2017. – Вып. 2. (36). – С. 26–31.
14. Черепанов И.Н., Смородин Б.Л. О влиянии концентрационной зависимости вязкости на конвективную неустойчивость горизонтального слоя коллоидного раствора // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. – 2019. Вып. 1. (36). – С. 26–30.
15. Venerus D., Buongiorno J., Christianson R., et al. (33 more authors) Viscosity measurements on colloidal dispersions (nanofluids) for heat transfer applications // Applied Rheology. – 2010. –. FED.

УДК 544.723.2

ЭЛЕКТРОННЫЕ СПЕКТРЫ УГЛЕРОДНЫХ МОДИФИКАЦИЙ В РАМКАХ МОДЕЛИ ХАББАРДА

Т.А. Меределина, А.К. Стародубцева

Благовещенский государственный педагогический университет (г. Благовещенск)

biofirm@mail.ru

Получены спектры флуоресценции в ультрафиолетовом диапазоне для нескольких углеродных аллотропов. Показано, что независимо от модификации во всех квазилинейчатых спектрах присутствуют аналогичные линии электронных переходов в атомах углерода. Индивидуальность спектров каждого углеродного соединения объясняется в рамках модели Хаббарда.

ELECTRON SPECTRA OF CARBON MODIFICATIONS WITHIN THE HUBBARD MODEL

T.A. Meredelina, A.K. Starodubtseva

Blagoveshchensk State Pedagogical University (Blagoveshchensk)

biofirm@mail.ru

Optical absorption spectra were obtained in the ultraviolet range for several carbon allotropes. It is shown that, regardless of modification, all quasi-line spectra contain similar lines of electronic transitions in carbon atoms. The individuality of the spectra of each carbon compound is explained within the framework of the Hubbard model.

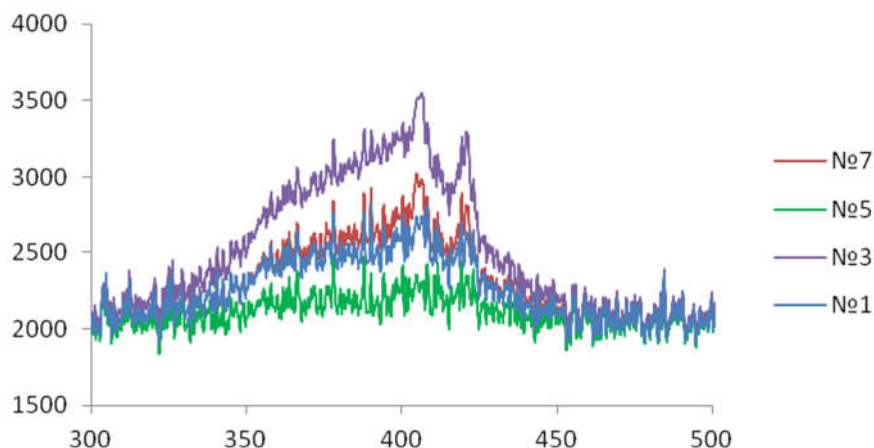
DOI:10.22250/9785934934195_57

Фуллеренсодержащие соединения обладают важнейшими нелинейно-оптическими свойствами, что позволяет использовать их для разработки механизма оптического ограничения энергии излучения. Механизм основан на явлении поглощения света с возбужденных электронных и колебательных уровней молекулы. Молекулы углеродных модификаций многоатомны. Даже в самой простой двухатомной молекуле происходят несколько видов движений: 1) поступательное движение молекул, т.е. движение центра масс молекулы; 2) вращение молекул около центра масс; 3) колебание атомов у центров масс; 4) движение электронов в атоме; 5) вращение электронов вокруг ядер; 6) вращение ядер атомов вокруг своих осей. Полная энергия молекулы складывается из поступательной, вращательной, колебательной и электронной энергии. Поступательная энергия значительного влияния на спектры молекулы не оказывает, три остальные существенно отличаются по величине: $E_{эл} \sim 1-10$ эВ, $E_{кол} \sim 10^{-2}-10^{-1}$ эВ, $E_{вр} \sim 10^{-4}-10^{-3}$ эВ. Источником сложности молекулярных спектров является множество степеней свободы многоатомных молекул. Молекула из n атомов имеет $3n$ степеней свободы, к тому же обычно в спектрах органических молекул проявляются колебания полярных связей C–O, C=O, C–N, C–H. Для атомов присущи переходы только между электронными состояниями, в молекулах же на каждое электронное состояние накладываются колебательные и еще более многочисленные вращательные состояния. Возможно получение спектров каждого из видов состояний, чисто вращательные переходы соответствуют области микроволнового радио или длинноволнового инфракрасного диапазонов. Переходы между колебательными состояниями определяются в инфракрасных спектрах, переходы между электронными состояниями дают ультрафиолетовый или видимый спектры [1]. Отождествление индивидуальных веществ по их инфракрасному спектру не всегда возможно для многоатомных молекул: при наличии нескольких групп атомов, входящих в молекулу, возникает резонанс и характеристическая частота может поменяться до неузнаваемости.

В данной работе исследованы квазилинейчатые спектры, полученные в ультрафиолетовом диапазоне, четырех углеродосодержащих модификаций. Для анализа взят фуллерен C_{60} , фуллерен $C_{60}C_{70}$, углеродные нанотрубки и аморфная сажа – Soot. Кристаллы соединения C_{60} имеют гранецентрированную кубическую (ГЦК) решетку [2]. Соединение $C_{60/70}$ состоит на 86 % из молекул C_{60} и на 14 % – C_{70} , молекула C_{70} имеет объемноцентрированную (ОЦК) решетку, в экваториальной зоне – 10 добавочных атомов углерода, в результате чего молекула вытянута. Нанотрубки имеют до 25 слоев с внешним диаметром до 15 нм и внутренним – до 5 нм, длина нанотрубок колеблется в пределах от 3 до 12 мкм [3]. Образец сажи Soot – 98 % аморфный углерод, состоящий из частиц с диаметром от 40 до 100 ангстрем.

Образцы, взятые в объеме 1 мм³, заливались 1 мл н-гексана ($CH_3(CH_2)_4CH_3$), растворителем нейтральным по отношению к внедренным молекулам, оптически прозрачным. Трубки с исследуемым раствором запаивались и погружались в жидкий азот ($T = 77,3$ К), возбуждение осуществлялось лазером ЛПИ-21 с длиной волны 337 нм. Спектры флуоресценции регистрировались на спектрографе ИСП-51 на высокочувствительную ПЗС линейку TCD1304DG. Обработка спектров производилась в программе №2017616306 «Модуль автоматизации спектрального анализа для спектрографа ИСП-51» [4]. В таком состоянии молекулы лишены возможности свободно вращаться, оставшиеся электронно – колебательные переходы дают четкие квазилинейчатые спектры. Явление было обнаружено и изучено советским ученым Эдуардом Шпольским и получило название «эффект Шпольского».

На графиках рис. 1 видно, что все четыре модификации углерода имеют одинаковое количество возможных сингулярных переходов электронов между энергетическими уровнями, так как все четыре спектра являются спектрами модификаций углерода. Однако они имеют различия в общем фоне, это свидетельствует, что в каждой молекуле присутствуют не только электронные переходы в атоме углерода, но и другие электронные и колебательные состояния, несмотря на то, что молекула жестко встроена в матрицу и ограничена по степеням свободы.



№1 – Soot, №3 – C_{60} , №5 – нанотрубки, №7 – $C_{60}/70$.

Рис. 1. Спектры люминесценции углеродных соединений.

Одна из базовых моделей квантовой теории конденсированных сред (модель Хаббарда) позволяет описать систему с сильными электронными корреляциями (СЭК) [5]. Гамильтониан Хаббарда состоит из двух слагаемых, первое из которых – перескоковый интеграл « t », отвечающий за кинетическую энергию перехода π -электронов от одного атома к другому внутри молекулы либо между атомами узлов кристаллической решетки; второе – внутриузельное кулоновское отталкивание « U » электронов:

$$H = t \sum_{i,j,\sigma} C_{j\sigma} C_{i\sigma} + U \sum_i N_{i\uparrow} N_{i\downarrow}.$$

Атомы углерода в молекуле фуллерена связаны σ - и π -связями, каждая молекула C_{60} имеет 60 свободных π -электронов, а молекула C_{70} соответственно 70 π -электронов, не связанные π -электроны могут свободно перемещаться по всей молекуле. Благодаря высокой подвижности π -электронов флуктуации электронной плотности внутри молекул могут легко смещаться, образуя кратковременные диполи. Мобильная π -электронная подсистема молекул фуллеренов C_{60} и $C_{60}C_{70}$ дает более интенсивный общий фон спектра по сравнению со спектрами сажи и нанотрубок. Однако, несмотря на то, что молекула $C_{60}C_{70}$ имеет большее количество свободных электронов, чем фуллерен C_{60} , ее спектр менее интенсивен. При низких температурах кинетическая энергия электронов уменьшается, т.е. энергетический спектр оптического поглощения обусловлен кулоновским взаимодействием в пределах одной молекулы. Из эксперимента видно, что наименьшими электронными корреляциями обладают нанотрубки: действительно, расстояния между слоями нанотрубок примерно в 2,5 раза больше, чем любая длина связи в молекуле фуллерена.

Таким образом, в рамках модели Хаббарда возможно описание π -электронной подсистемы молекул фуллеренов и других углеродных модификаций. Кроме основных условий получения квазилинейчатых спектров (оптимальная концентрация и удобная матрица), необходимо учитывать многочисленные электронные состояния. Углеродные аллотропы по сравнению с плоскими молекулами полициклических ароматических углеродов обладают сильными электронными корреляциями, что необходимо учитывать при получении их квазилинейчатых спектров флуоресценции.

1. Шпольский Э.В. Эмиссионный спектральный анализ органических соединений. // УФН. – 1959. – Т.LXVIII В.1. – С.51-69.
2. Макарова Т. Л., Захарова И. Б. Электронная структура фуллеренов и фуллеритов – СПб.:Наука, – 2001. 67 с.
3. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // УФН. – 2002. – 172 4. – 408 с.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017616306 «Модуль автоматизации спектрального анализа для спектрографа ИСП-51». Автор: Антонов А.А. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 07 мая 2019 г.
5. Лобанов Б.В., Мурзашев А.И. Электронные и оптические свойства фуллерена C_{70} в рамках концепции сильного коррелированного состояния // ФТТ. – 2017. – Т.59. – В.2. – С.409-413.

УДК 538.956

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА $CsNO_3$, ВНЕДРЕННОГО В МЕЗОПОРИСТЫЕ СИЛИКАТНЫЕ МАТРИЦЫ SBA-15

А.Ю. Милинский¹, С.В. Барышников¹, Е.В. Стукова²

¹Благовещенский государственный педагогический университет (г. Благовещенск)

²Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

a.milinskiy@mail.ru

Представлены результаты исследования диэлектрических и тепловых свойств нанокompозитов, полученных внедрением нитрата цезия в мезопористые силикатные материалы SBA-15. Результаты указывают на изменение температуры фазового перехода при нагреве и охлаждении в нанокompозитном нитрате цезия по сравнению с объемным образцом.

DIELECTRIC AND THERMAL PROPERTIES OF $CsNO_3$ INTRODUCED IN MESA-POROUS SILICATE MATERIALS SBA-15

A.Yu. Milinsky¹, S.V. Baryshnikov¹, E.V. Stukova²

¹Blagoveshchensk State Pedagogical University (Blagoveshchensk)

²Amur State University (Blagoveshchensk)

a.milinskiy@mail.ru

The results of a study of the dielectric and thermal properties of nanocomposites obtained by the incorporation of cesium nitrate into mesoporous silicate materials SBA-15 are presented. The results indicate a change in the phase transition temperature during heating and cooling in the nanocomposite cesium nitrate compared to the bulk sample.

DOI:10.22250/9785934934195_60

В последнее время большое внимание уделяется изучению композитов на основе нанопористых матриц, заполненных сегнетоэлектриками. Свойства композитов могут значительно отличаться от свойств монокристаллов в результате размерных эффектов, барического эффекта, взаимодействия со стенками матрицы и т.д. За последние десятилетия были исследованы нанокompозиты, полученные на основе пористых матриц и сегнетоэлектрических материалов – таких как сегнетова соль, триглицинсульфат, нитрит натрия, нитрат калия и др. [1]. В качестве нанопористых матриц использовались пористые стекла, мезопористые силикатные материалы MCM-41 и SBA-15, опалы, углеродные нанотрубки и т.д.

В данной статье представлены результаты исследования тепловых и диэлектрических свойств нанокомпозитов, полученных путем внедрения расплава нитрата цезия в мезопористые силикатные материалы SBA-15.

Нитрат цезия CsNO_3 при комнатной температуре имеет тригональную симметрию. Кристаллическая структура низкотемпературной фазы была определена как полярная тригональная с постоянными решетки $a = 10,950 \text{ \AA}$, $c = 7,716 \text{ \AA}$ и спонтанной поляризацией P_s около $1\text{--}2 \text{ мК/см}^2$ (при температуре $410\text{--}420 \text{ К}$) [2]. Выше температуры Кюри ($T_c = 427 \text{ К}$) элементарная ячейка является кубической с постоянной решетки $a = 8,980 \text{ \AA}$.

В качестве нанопористых матриц использовались мезопористые силикатные материалы SBA-15 с размерами пор $6\text{--}7 \text{ нм}$. Внедрение CsNO_3 в поры SBA-15 осуществлялось из расплава при температуре 713 К . Из полученного порошка прессовались таблетки диаметром 10 мм и толщиной 1 мм . В качестве электродов на поверхность объемного и наноструктурированного нитрата цезия наносилась In-Ga паста.

Для регистрации сигнала ДТА использовался синхронный термоанализатор Linseis STA PT 1600. Для измерения комплексной диэлектрической проницаемости применялся цифровой измеритель импеданса E7-25 с частотным диапазоном $20\text{--}10^6 \text{ Гц}$ и рабочим напряжением $0,7 \text{ В}$ электродом служила серебряная паста. Температура определялась с помощью электронного термометра TC-6621 с хромель-алюмелевой термопарой. Точность определения температуры составляла $0,1 \text{ К}$. Результаты, полученные методом ДТА, указывают на наличие одного фазового перехода для объемного CsNO_3 при нагреве около 427 К и при 423 К при охлаждении (рис. 1).

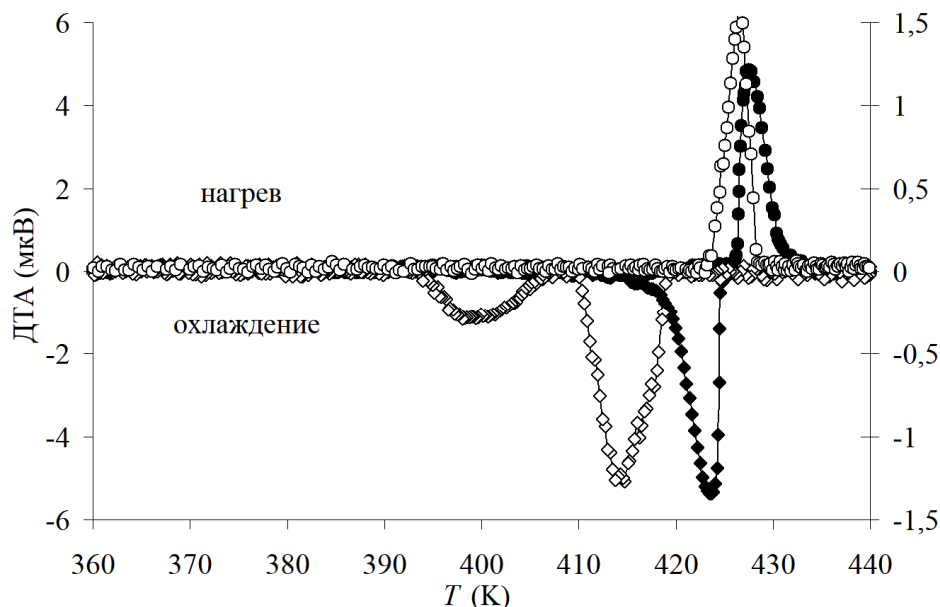


Рис.1. Температурная зависимость сигнала ДТА для CsNO_3 (заполненные символы) и для нанокомпозита $\text{CsNO}_3/\text{SBA-15}$.

Для нанокомпозита $\text{CsNO}_3/\text{SBA-15}$ переход при нагреве происходит около 426 К , а при охлаждении – около 413 К . Кроме того, появляется дополнительная аномалия с максимумом при температуре около 399 К . Результаты исследования температурных зависимостей диэлектрической проницаемости также указывают на снижение температуры фазового перехода при охлаждении для наноструктурированного нитрата калия.

2. Korotkov L.N., Stekleneva L.S., Pankova M.A., Logoshina E.M. Dielectric response of Rb_2ZnCl_4 within porous aluminum oxide // *Ferroelectrics*. – 2020. – V.567. – P.74–81.
3. Takagi Y., Kimura S., and Takeuchi Y. Structural phase transition of CsNO_3 crystal spontaneous polarization // *Ferroelectrics*. – 2003. – V.284. – P.129–135.

УДК 538.958

ВЛИЯНИЕ ФОРМ-ФАКТОРА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИКРОЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Н.Г. Морев, А.А. Воронина

*Амурский государственный университет (г. Благовещенск)
nikita2002morev@mail.ru*

Построена модель распределение поглощенного излучения сплошным микрокубом, микрошаром, полым микрогексаэдром и микросферой. Установлено, что рассеяние света интенсивней происходит на полых микро-частицах.

INFLUENCE OF THE FORM FACTOR ON THE OPTICAL PROPERTIES OF SILICON DIOXIDE MICROPARTICLES

N.G. Morev, A.A. Voronina

*Amur State University, Blagoveshchensk
nikita2002morev@mail.ru*

A model for the distribution of absorbed radiation by a solid microcube and microball, hollow microhexahedron and microsphere is constructed. It has been established that light scattering occurs more intensively on hollow microparticles.

DOI:10.22250/9785934934195_62

Исследования влияния формы микрочастиц имеют давние исторические корни, – например, хорошо известны исследования влияния геометрии частиц золота различных форм (шары, пластины, цилиндры и т.д.) на спектры поглощения и рассеяния. Понимание этих зависимостей позволяет разрабатывать новые материалы с желаемыми оптическими свойствами и применять их в различных областях – оптической технологии, фотонике и сенсорике. Определенные формы частиц могут обладать плазмонными резонансами, что позволяет усиливать вокруг них локальное электрическое поле. Это может найти применение в повышении эффективности солнечных батарей, усилении рассеяния света для улучшения оптических сенсоров и др.

Цель настоящей работы – моделирование оптических свойств микрочастиц диоксида кремния с формой куба, гексаэдра, шара и сферы.

Для проведения моделирования использовалась среда COMSOL Multiphysics, которая зачастую применяется при моделировании сложных процессов, где требуется переход от одного физического раздела к другому. Данная программа использует метод конечных элементов в процессе моделирова-

ния, широко известен при решении дифференциальных и интегральных уравнений в частных производных, встречающихся при решении прикладных задач физики. Этот метод заключается в разбиении области решения на конечное число элементов или построении сетки. В каждом элементе выбирается аппроксимирующая функция, равная нулю за его пределами.

Размер частиц составлял SiO_2 1000 нм, длины волн падающего света выбиралась в диапазоне от 500 до 800 нм. Толщина слоя в сфере и гексаэдре была взята 100 нм, в объеме которых располагали воздух.

На рис. 1 приведено сравнительное изображение объемного распределения поглощенного излучения сплошным микрокубом и полым микрогексаэдром, а на рис. 2 – сплошным микрошаром и полый микросферой. Максимальная поглощенная мощность не превышает 100 пВт/м^3 . У микрокуба по сравнению с другими частицами максимальная поглощенная мощность, то есть она имеет наибольшую способность поглощать излучение в видимом диапазоне. Таким образом, для полых частиц с наименьшей способностью поглощать излучение большая часть света будет рассеиваться и отражаться от поверхности материала, а не поглощаться им. Это может привести к увеличению интенсивности рассеянного света и уменьшению его поглощения.

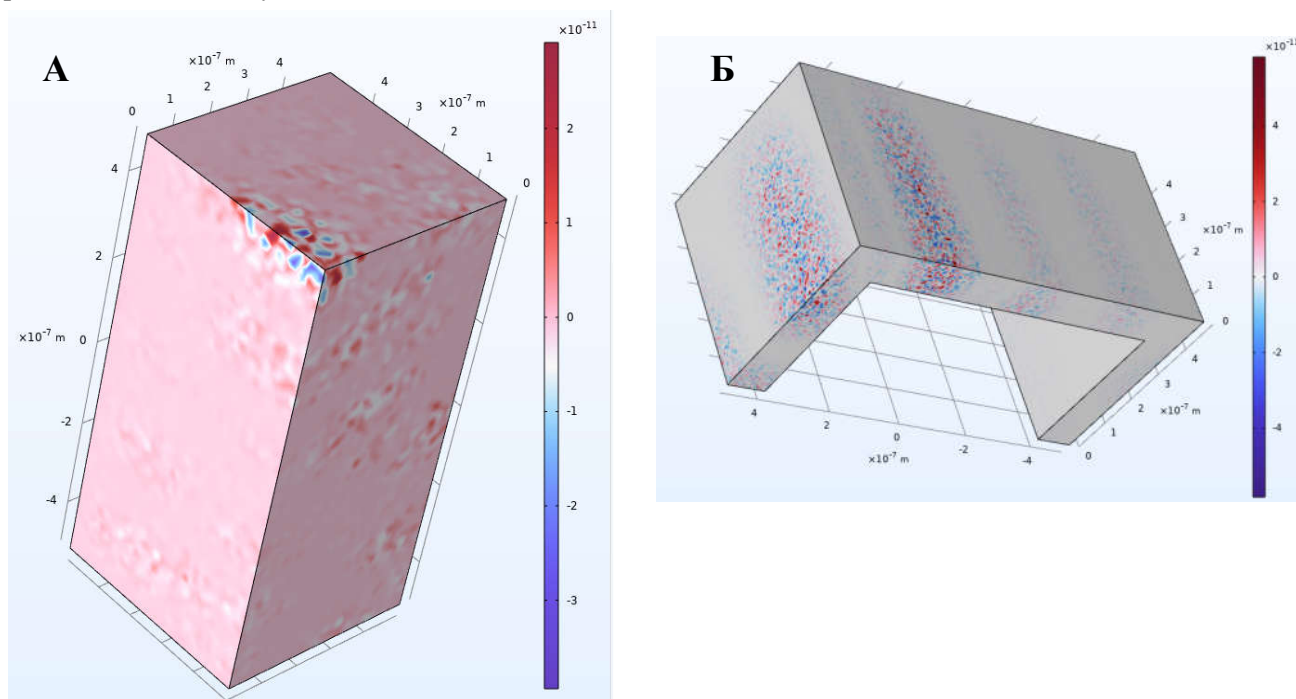


Рис. 1. Объемное распределение поглощенного излучения микрокубом SiO_2 (А) и микрогексаэдром SiO_2 (Б).

На рис. 3 и 4 приведено сравнительное изображение распределения направленности векторов E и H после отражения излучения сплошным микрокубом, полым микрогексаэдром, сплошным микрошаром и полый микросферой соответственно. Из рисунков следует, что характер индикатрис рассеяния для сплошных микрочастиц соответствует рассеянию Ми. На полярной диаграмме рассеяния света полых частиц видно, что значение интенсивности нерассеянного излучения в несколько раз больше, чем значение интенсивности на полярной диаграмме рассеяния света сплошной частицы.

Таким образом, моделирование распределения поглощенного излучения и распределение направленности векторов E и H сплошным микрокубом, микрошаром, полым микрогексаэдром и микросферой показало, что наиболее интенсивно свет рассеивается на полых частицах, тогда как сплошными микрочастицами свет видимого диапазона поглощается.

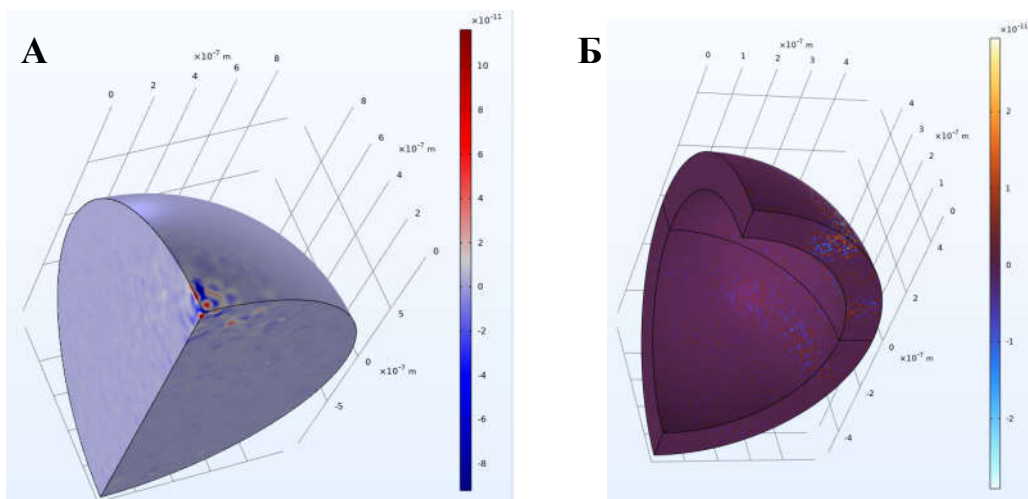


Рис. 2. Объемное распределение поглощенного излучения микрешаром SiO_2 (А) и микросферой SiO_2 (Б).

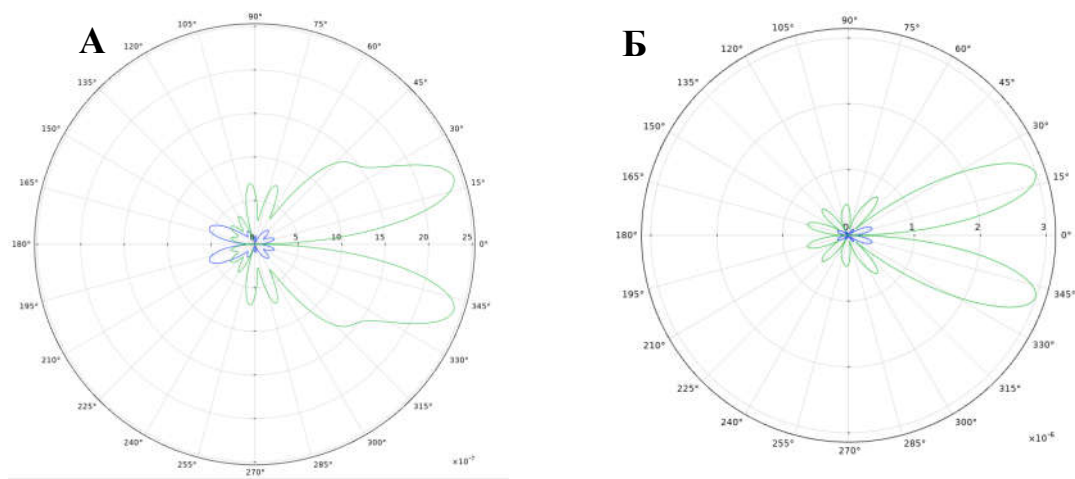


Рис. 3. Распределение направленности векторов E и H после отражения излучения сплошным микрокубом SiO_2 (А) и полым микрогексаэдром SiO_2 (Б).

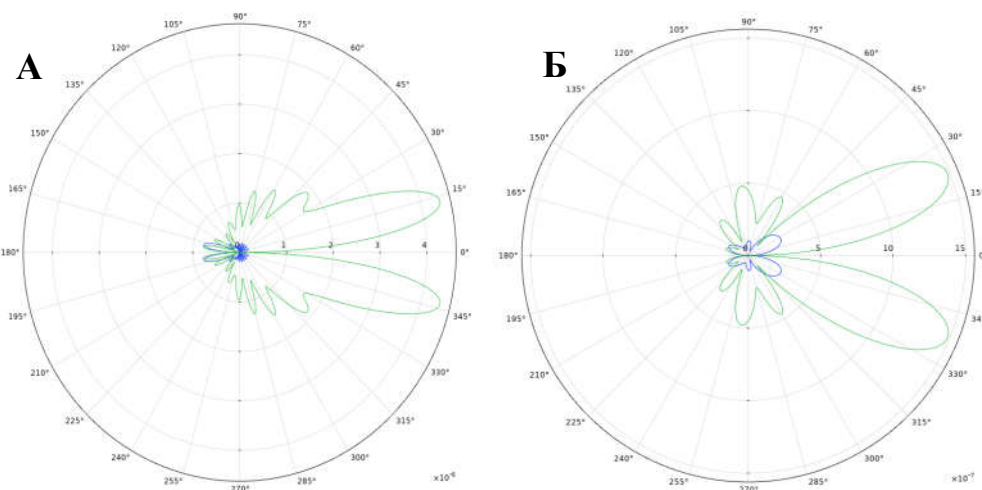


Рис. 4. Распределение направленности векторов E и H после отражения излучения сплошным микрешаром SiO_2 (А) и полым микросферой SiO_2 (Б).

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Госзадание № 122082600014-6 (FZMU-2022-0007).

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЭНТРОПИЙНО-СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ОКСИДОВ (MgNiCoCuZn)O ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ

**О.А. Алексеева¹, С.Б. Вахрушев¹, Ю.Е. Горшкова², А.А. Набережнов¹, С.В. Сумников²,
М.А. Яговкина¹, Varatharaja Nallathambi³, Lalith Kumar Bhaskar^{3,4}, Ravi Kumar^{3,4}**

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург)

² Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка. Объединенный институт ядерных исследований, (г. Дубна)

³ Laboratory for High Performance Ceramics, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Indian Institute of Technology Madras (IIT Madras), Chennai, 600036, India.

⁴ Ceramic Technologies Group, Centre of Excellence in Materials and Manufacturing for Futuristic Mobility, Indian Institute of Technology, Madras (IIT Madras), Chennai 600036, India
alex.nabereznov@mail.ioffe.ru

Представлены результаты исследования влияния скорости охлаждения энтропийно-стабилизированных оксидов (MgNiCoCuZn)O на их структуру и свойства. Исследования проводились с использованием методов дифракции нейтронов и рентгеновского излучения, а также малоуглового рассеяния рентгеновских лучей. Установлено, что увеличение скорости охлаждения от 1 К/мин до 5 К/мин приводит к резкому увеличению выделения фазы тенорита (CuO), т.е. к появлению фазового расслоения, а также к наноструктурированию обеих образовавшихся фаз. Определены соответствующие размеры наночастиц. Экспериментально показано, как подобное расслоение сказывается на изменении механических, диэлектрических, структурных, мезоскопических и прочих свойств этих материалов.

STRUCTURE AND PROPERTIES MODIFICATION OF ENTROPY-STABILIZED OXIDES (MgNiCoCuZn)O ON COOLING.

**O.A. Alekseeva¹, S.B. Vakhrushev¹, Yu.E. Gorshkova², A.A. Naberezhnov¹, S.V. Sumnukov²,
M.A. Yagovkina¹, Varatharaja Nallathambi³, Lalith Kumar Bhaskar^{3,4}, Ravi Kumar^{3,4}**

¹ Ioffe Institute (St.- Petersburg)

² Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research (Dubna)

³ Laboratory for High Performance Ceramics, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Indian Institute of Technology Madras (IIT Madras), Chennai, 600036, India.

⁴ Ceramic Technologies Group, Centre of Excellence in Materials and Manufacturing for Futuristic Mobility, Indian Institute of Technology, Madras (IIT Madras), Chennai 600036, India
alex.nabereznov@mail.ioffe.ru

The results of studies of effect of cooling rate of entropy-stabilized oxides (MgNiCoCuZn)O on their structure and properties are presented. The studies have been carried out using neutron and X-ray diffraction methods, as well as small-angle X-ray scattering. It has been established, that an increase in cooling rate from 1 K/min to 5 K/min leads to a sharp increase in the segregation of the tenorite (CuO) phase; to the appearance of phase separation, as well as nanostructuring of both formed phases. The corresponding sizes of nanoparticles have been determined. It is experimentally shown how such separation affects the change in mechanical, dielectric, structural, mesoscopic and other properties of these materials.

Разработка подходов к изготовлению принципиально новых функциональных материалов и перспективных с точки зрения практического использования, впоследствии названных высоко-энтропийными сплавами (high-entropy alloys – HEA), была разработана в конце XX – начале XXI века в работах [1; 2] и изначально применялась к многокомпонентным металлическим сплавам, содержащим пять и более основных металлов, которых в сплаве было в пределах от 5 % до 35 %. В дальнейшем произошло расширение класса высокоэнтропийных материалов, и следующим шагом был синтез структур на основе смеси оксидов MgO, CoO, NiO, CuO и ZnO, которые получили название энтропийно-стабилизированных оксидов (entropy-stabilized oxides – ESO, часто используется и аббревиатура НЕО – high-entropy oxides) [3]. Было показано, что только при эквимольном составе данной смеси (MgCoNiCuZn)O формируется однофазный твердый раствор со структурой каменной соли и со случайным распределением катионов. Никаких твердых растворов между любыми исходными оксидами в данной смеси не существует. Также авторы утверждают, что именно конфигурационный беспорядок приводит к стабилизации фазового состояния этого твердого раствора.

Соединения класса ESO уже находят широкое практическое применение благодаря своим диэлектрическим свойствам [4] как катализаторы для окисления CO [5], при очистке воды от красителей [6]: при допировании литием имеют высокую суперионную проводимость [7], перспективны при использовании в качестве термоэлектрических материалов [8].

В работе [9] показано, что наиболее сильное влияние на макроскопические свойства и структуру ESO оказывает изменение содержания CuO в исходном материале при синтезе [9], причем это изменение ведет к существенной эволюции самой кристаллической структуры ESO, но в целом кубическая симметрия сохраняется. Было высказано предположение [9; 10], что наблюдаемые аномалии могут быть вызваны локальными искажениями кислородной подрешетки за счет эффекта Яна – Теллера, характерного для ионов Cu^{2+} , находящихся в октаэдрическом окружении. Эти искажения должны быть или тетрагональными или ромбоэдрическими, и тогда должны были бы появиться соответствующие расщепления брэгговских пиков на дифрактограммах. В то же время напрямую таких расщеплений авторы работы не наблюдали, хотя результаты данных ЭПР указывают на то, что некоторые искажения октаэдров CuO_6 существуют [9].

Целью данной работы был поиск возможных искажений кристаллической структуры, а также получение информации о влиянии разных режимов охлаждения образцов ESO на их структуру из анализа дифрактограмм рассеяния нейтронов и рентгеновского излучения, а также из данных малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (МУРР). Образцы были изготовлены в Institute of Technology Madras (ИТ Madras), результаты исследования влияния режимов охлаждения на микроструктуру, механические и тепловые свойства, а также на композиционный и элементный состав представлены в работе [11]. Исследования структуры и МУРР проводились на порошковых образцах при комнатной температуре, изготовленных после охлаждения. В таблице представлены характеристики всех изученных образцов S1 – S5, исходный элементный состав S1-S4 был одинаков (в ат. %): O – 45,4 (3,5), Mg – 11,4 (1,4), Ni – 10,9 (0,8), Co – 11,1 (0,7), Cu – 10,8 (0,9), Zn – 10,3 (0,8), а S5, не содержащий оксида меди, использовался как реперный.

На рис. 1 приведены дифрактограмма для образца S5, полученная на ФВРД (ОИЯИ, г. Дубна) при комнатной температуре, и результаты подгонки методом полнопрофильного анализа. Набор необходимой статистики проводился в течение 8 ч. Для всех образцов кристаллическая структура соответствует кубической (пр. группа Fm-3m); упругих пиков от сегрегированного CuO со структурой тенорита на дифрактограммах для S2 – S4 не обнаружено.

Отметим, что увеличение количества выделившегося в процессе охлаждения CuO приводило к резкому уширению упругих пиков по сравнению с инструментальным разрешением (рис. 2), но при этом форма линии оставалась симметричной и никаких искажений, соответствующих появлению ожидаемых тетрагональных или ромбоэдрических искажений, мы не обнаружили. Наблюдаемое уширение

упругих отражений в данном случае в первую очередь следует считать следствием размерного эффекта.

Характеристики образцов

Номер	Обозначение	Описание образца	Примечание
S1	ESO 5C	Однофазный стабилизированный (MgNiCoCuZn)O, естественное охлаждение («закалка») на воздухе	
S2	ESO SC-5	Получен при охлаждении до комнатной температуры в печи со скоростью 5 °C/мин.	Содержит 5,4 мас. % CuO
S3	ESO SC-2	Получен при охлаждении до комнатной температуры в печи со скоростью 2 °C/мин.	Содержит 8,2 мас. % CuO
S4	ESO SC-1	Получен при охлаждении до комнатной температуры в печи со скоростью 1 °C/мин.	Содержит 12,3 мас. % CuO
S5	ESO 4C	Однофазный (MgNiCoZn)O	Без CuO

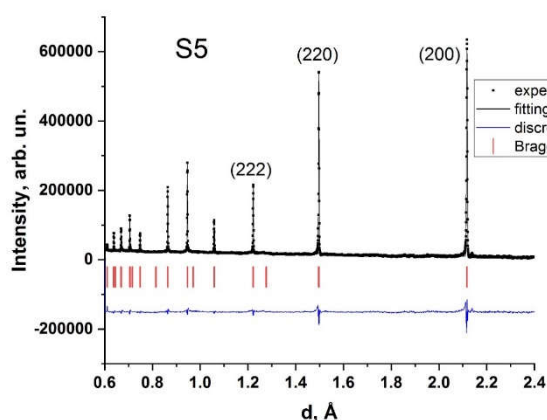


Рис. 1. Дифрактограмма рассеяния нейтронов на образце S5. Точки – эксперимент, линия – подгонка, вертикальные штрихи – положения упругих пиков, синяя кривая внизу – невязка.

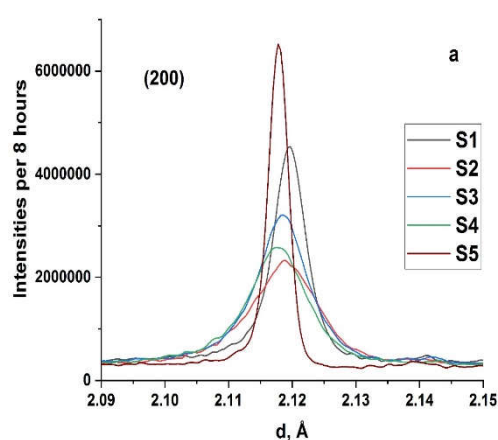


Рис. 2. Изменение формы линии упругого пика (200) для ESO образцов S1 – S5. Ширина пика для S5 соответствует инструментальному разрешению.

Детальные исследования фона в месте ожидаемого положения на дифрактограммах пика (111) для тенорита (CuO), имеющего наибольший структурный фактор для рассеяния нейтронов, позволили обнаружить слабые следы этого пика для образцов S2 – S4 (рис. 3). Из сравнения уширения с инструментальным разрешением оценен характерный размер частиц CuO, который составил ~ 20 nm. Из обработки спектров рассеяния нейтронов были также определены и размеры наночастиц в образцах S2 – S4: 110(6), 37(3), 48(3) и 44(3) nm соответственно. В дальнейшем эти результаты были подтверждены данными дифракции рентгеновского излучения и МУРР. Более того, было установлено, что существует преимущественная ориентация наночастиц основной матрицы, имеющей кубическую структуру, вдоль направления [111]. В то же время анализ рентгеновских дифрактограмм показал и наличие упругих напряжений в образцах S2 – S4, вызванных, видимо, появлением дислокаций, образовавшихся в процессе охлаждения при выделении (сегрегации) оксида меди.

Таким образом, установлено, что в пределах инструментального уширения тетрагональных или ромбоэдрических искажений в образцах S2 – S4 не наблюдается. Увеличение скорости охлаждения образцов S2 – S4 приводит к резкому уширению упругих пиков, вызванных процессом наноструктурирования как основной кристаллической структуры ESO, так и сегрегированного оксида меди. Также наблюдается и появление вклада упругих напряжений.

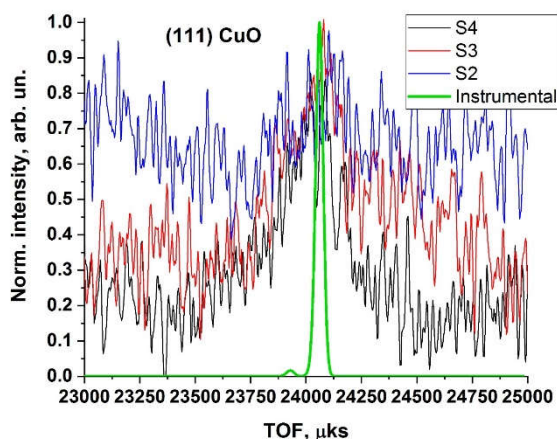


Рис. 3. Экспериментальные спектры интенсивности рассеяния нейтронов от времени пролета в области ожидаемого положения пика (111) для тенорита. Зеленая узкая линия – инструментальное разрешение.

Образующиеся наночастицы имеют преимущественную ориентацию в направлении [111]. Обнаруженные особенности пространственного устройства кристаллической структуры образцов S2 – S4 находят отражение в аномалиях поведения макроскопических механических и физических свойств данных материалов, приведенных в работе [11].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант 22-12-00328.

1. Yeh J.W., Chen S.K., Lin S.J., Gan J.Y., Chin T.S., Shun T.T., Tsai C.H., Chang S.Y. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principle Elements: Novel Alloy Design Concept and Outcomes // *Adv. Eng. Mater.* – 2004. – V. 6 – P. 299 -303.
2. Yeh J.W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S.-K. High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation // *Materials Science Forum* – 2007 – V. 560. –P. 1-9.
3. Rost C.M., Sachet E., Borman T., Moballeghe A., Dickey E.C., Hou D., Jones J.L., Curtarolo S., Maria J.-P. Entropy-stabilized oxides // *Nature communications.* – 2015. – V. 6. – Art. #8485
4. Bérardan D., Franger S., Dragoe D., Meena A.K., Dragoe N. Colossal dielectric constant in high entropy oxides // *Phys. Status Solidi RRL* – 2016. – V.10. – No. 4. – P. 328–333.
5. Chen H., Jie Fu J., Zhang P., Peng H., Abney C.W., Jie K., Liu X., Chi M., Dai S. Entropy-stabilized metal oxide solid solutions as CO oxidation catalysts with high-temperature stability // *J. Mater. Chem. A* – 2018 – V. 6, – P. 11129-11133.
6. Li B., Yang H., Li C., He X., Zhang Y. Preparation of novel (MgCoNiCuZn)O high-entropy ceramic membrane and its dye separation // *Jour. Eur. Cer. Soc.* – 2023 – V.43 – P. 3437-3446.
7. Berardan D., Franger S., Meena A.K., Dragoe N. Room temperature lithium superionic conductivity in high entropy oxides // *J. Mater. Chem. A.* – 2016 – V. 4 – P. 9536.
8. Liu R., Chen H., Zhao K., Qin Y., Jiang B., Zhang T., Sha G., Shi X., Uher C., Zhang W., Chen L. Entropy as a Gene-Like Performance Indicator Promoting Thermoelectric Materials // *Adv. Mater.* – 2017. – V. 29. – P. 1702712.
9. Berardan D., Meena A.K., Franger S., Herrero C., Dragoe N. Controlled Jahn-Teller distortion in (MgCoNiCuZn)O-based high entropy oxides // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2017. – V. 704. – P. 693-700.
10. Rák Z., Maria J.-P., Brenner D.W. Evidence for Jahn-Teller compression in the (Mg,Co,Ni,Cu, Zn)O entropy-stabilized oxide: a DFT study // *Materials Letters.* – 2017. – V. 217. – P. 300-303.
11. Nallathambi V., Bhaskar L.K., Wang D., Naberezhnov A.A., Sumnikov S.V., Ionescu E., Kumar R. Tuning the mechanical and thermal properties of (MgNiCoCuZn)O by intelligent control of cooling rates // *Jour. Eur. Cer. Soc.* – 2023. – V.43. – Iss.10. – P.4517-4529.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ТОНКИХ ПЛЕНОК СИЛИЦИДА МАГНИЯ НА КРЕМНИИ

Н.С. Новгородцев¹, А.В. Поляков¹, И.А. Рябов¹, К.Н. Галкин², Н.Г. Галкин², Д.В. Фомин¹

¹Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

²Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН (г. Владивосток)

nnc19991999@gmail.com

В настоящее время большой интерес у научного сообщества вызывают тонкие пленки силицида магния (Mg_2Si). Благодаря своим оптическим и электронным свойствам Mg_2Si является перспективным материалом для датчиков оптоэлектронных устройств. Связано это и с тем, что Mg и Si не токсичны, не загрязняют окружающую среду и широко распространены в земной коре. В данной работе представлены результаты исследования оптических свойств методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) тонких пленок Mg_2Si толщинами 180 и 225 нм, сформированных на Si (111). Формирование образцов происходило методом реактивной эпитаксии при порционном осаждении магния и кремния при температуре подложек 250 °С. Наличие Mg_2Si в составе пленок каждого из образцов установлено методом КРС-спектроскопии по пикам с КРС-сдвигом 258 см⁻¹ и 348 см⁻¹.

INVESTIGATION OF OPTICAL PROPERTIES AND SURFACE RELIEF OF Mg_2Si THIN FILMS ON Si (111)

N.S. Novgorodtsev¹, A.V. Polyakov¹, I.A. Ryabov¹, K.N. Galkin², N.G. Galkin², D.V. Fomin¹

¹Amur State University (Blagoveshchensk)

²Institute of Automation and Control Processes FEB RAS (Vladivostok)

nnc19991999@gmail.com

Currently, thin films of magnesium silicide (Mg_2Si) are of great interest to the scientific community. Due to its optical and electronic properties, Mg_2Si is a promising material for sensors in optoelectronic devices. This is also due to the fact that Mg and Si are non-toxic, do not pollute the environment and are widely distributed in the earth's crust. In this paper, we present the results of a study of the optical properties by Raman spectroscopy of thin Mg_2Si films with thicknesses of 180 and 225 nm formed on Si(111). Samples were formed by reactive epitaxy with batch deposition of magnesium and silicon at a substrate temperature of 250 °C. The presence of Mg_2Si in the composition of the films of each of the samples was established by Raman spectroscopy using peaks with a Raman shift of 258 cm⁻¹ and 348 cm⁻¹.

DOI:10.22250/9785934934195_69

Благодаря постоянному совершенствованию методов изготовления полупроводниковых приборов происходит интенсивное развитие нанотехнологий. Поэтому большой интерес представляет формирование тонких пленок на кремнии. Кремний является повсеместно распространенным и дешевым материалом для изготовления на его основе полупроводниковых приборов. К числу материалов, демонстрирующих наибольшее количество путей развития в области современной твердотельной электроники относят ряд соединений металла с кремнием. Подобный интерес вызван способностью данных соединений противостоять воздействию внешней среды, высокой стабильностью при высоких температурах и химической инертностью. В подобных соединениях чаще всего встречаются металлические

свойства, однако наиболее перспективными для изучения являются соединения с полупроводниковыми свойствами, к которым и относится Mg_2Si [1]. Исследование его фотоэлектрических свойств показало, что фотоотклик наблюдается до длин волн от 1800 до 2100 нм [2], а фоточувствительность при 1310 нм достигает нескольких десятков мА/Вт при малом обратном смещении [3]. Не менее привлекательно использование Mg_2Si при создании термоэлектрических преобразователей, работающих в температурном диапазоне от 500 до 800 К [4].

Формирование тонких пленок Mg_2Si осуществлялось с использованием сверхвысоковакуумной камеры Varian PHI-590 с базовым давлением 10^{-9} Торр. Подложкой служила площадка размером 15×5 мм, вырезанная из промышленной шайбы КЭФ-100 Si(111) с удельным сопротивлением от 2 до 15 Ом·см. Источником кремния служила аналогичная пластина, а источником магния служила магниевая стружка, полученная с бруска магния с чистотой 99,999 %. Температура подложки в ходе эксперимента поддерживалась на уровне 250 °С. Формирование происходило порционно (три раза) на предварительно сформированный буферный слой Si. Скорости осаждения Mg и Si калибровались по кварцевому датчику толщины. Для первого образца порция состояла из 45 нм Mg и 15 нм Si, для второго образца – 55 нм Mg и 20 нм Si. Толщина образца №1 составила 180 нм, а образца №2 – 225 нм.

Для контроля качества пленки на различных этапах формирования проводились исследования методами вторичной электронной эмиссии. На рис. 1 представлены результаты электронной Ожэ-спектроскопии. Анализ полученных Ожэ-спектров показал наличие атомов Mg (1186 эВ) и Si(92 эВ) в соответствующих формированию слоях.

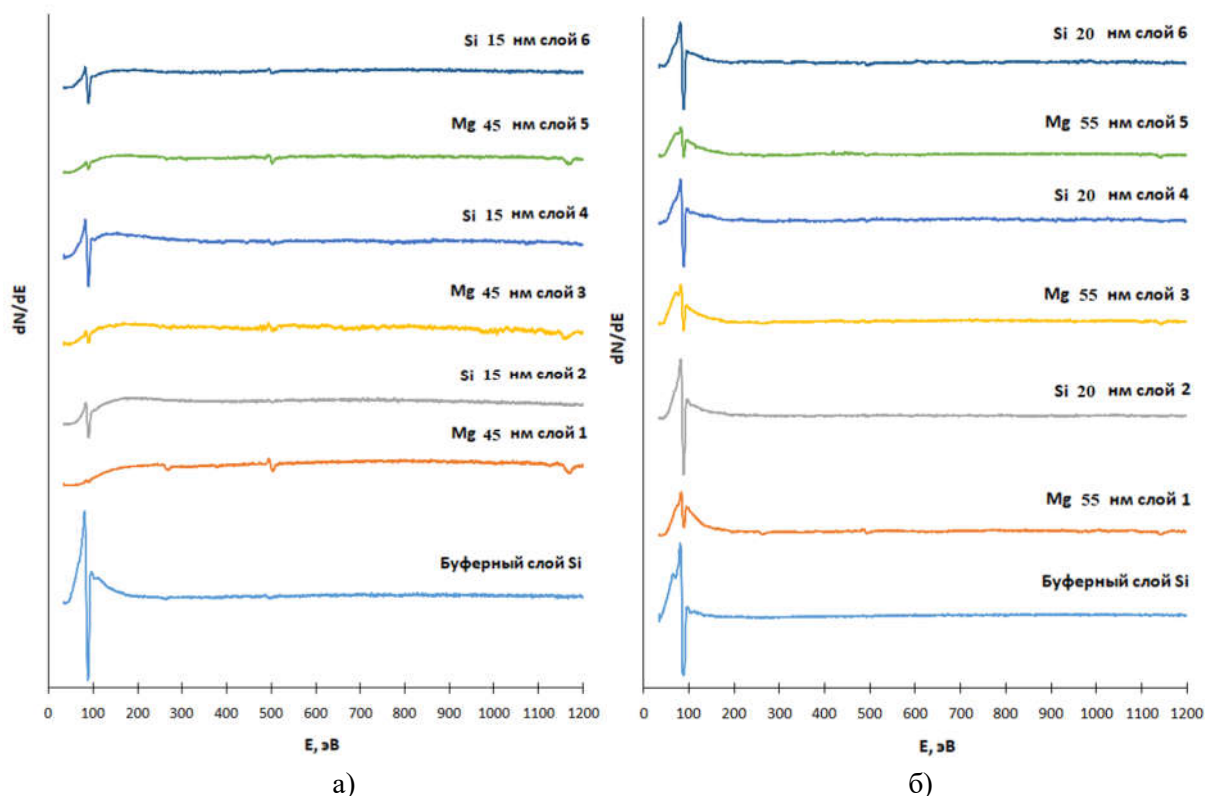


Рис. 1. Ожэ-спектры образцов №1 (а) и №2 (б) на различных этапах формирования.

Сформированные образцы были исследованы методом КРС-спектроскопии с помощью многофункциональной системы NTEGRASpectraII (NT-MDT, Россия) при длине волны лазерного луча 473 нм. Спектры КРС образцов представлены на рис. 2.

На спектре, соответствующем эталонному Si, наблюдаются пики различных интенсивностей при КРС-сдвиге $\sim 520 \text{ см}^{-1}$ и $\sim 305 \text{ см}^{-1}$, что указывает на монокристаллический кремний [5 – 7]. Анализ полученных спектров показал наличие пика большой амплитуды при 258 см^{-1} и малой амплитуды при

348 см^{-1} . Согласно литературе [5; 7; 8] этим пикам соответствует силицид магния стехиометрического состава (Mg_2Si). Также на спектрах присутствуют пики, соответствующие аморфному кремнию 470 см^{-1} для образца №1 и 500 см^{-1} – для образца №2.

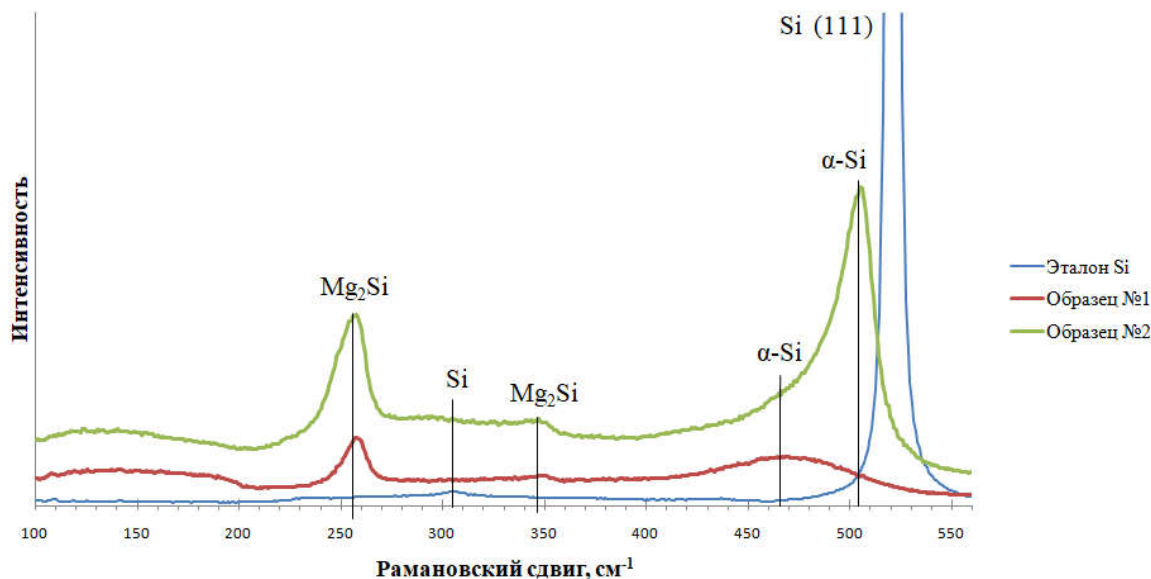


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния света выращенных образцов и подложки кремния.

По результатам выполненной работы можно сделать вывод, что методом КРС-спектроскопии установлено наличие Mg_2Si в составе пленок сформированных образцов.

1. Поляков А.В. Силицид магния – перспективный материал для оптических датчиков / А.В. Поляков, Д.В. Фомин, Н.С. Новгородцев // Успехи прикладной физики. – Т.11. – № 1, 2023. – С.52-60. – DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-1-52-60.

2. Галкин Н. Г. Электронная структура и моделирование диэлектрической функции эпитаксиальных пленок $\beta\text{-FeSi}_2$ на $\text{Si}(111)$ / Н. Г. Галкин, А. М. Маслов, А. О. Таланов // Физика твердого тела. – 2002. – №4. – С. 688-693.

3. Akiyama T., Hori N., Tanigawa S., Tsuya D., Usono H. Fabrication of MgSi p-n junction photodiode with shallow mesa-structure and ring electrode. – 2017. – 011102 JAP Conf. Proc. 5

4. Kobayashi M. Control of electron and hole concentrations in semiconducting silicide BaSi_2 with impurities grown by molecular beam epitaxy // Applied physics express. – 2008. – Т. 1, №.5. – С. 051403.

5. Наносекундный импульсный отжиг кремния, имплантированного ионами магния / Н.Г. Галкин [и др.] // Журнал технической физики. – Т.83. – Вып.1, 2013. – С.99-104.

6. Synthesis of Mg_2Si precipitates in Mg-implanted silicon by pulsed ion-beam treatment / S.V. Vavanova [et al.] // Physics Procedia. – 2012. – Vol.23, – P. 45-48. – DOI: 10.1016/j.phpro.2012.01.012.

7. Photoreflectance Spectra of Highly-oriented Mg_2Si (111)/ $\text{Si}(111)$ Films / Y. Terai [et al.] // JJAP Conference Proceedings. – The Japan Society of Applied Physics. – 2020. – Т.8. – P. 011004-1 - 011004-4. – DOI: 10.7567/JJAPCP.8.011004.

8. Textured Stainless Steel as a Platform for Black $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}$ Heterojunction Solar Cells with Advanced Photovoltaic Performance / A.V. Shevlyagin [et al.] // Materials. – 2022. – Vol.15. – № 19, – P. 6637. – DOI: 10.3390/ma15196637.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЫРОЧНЫХ СОСТОЯНИЙ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА В СЭНДВИЧ СТРУКТУРЕ Si/Ge/Si

К.В. Образцов^{1,2}, А.Н. Чибисов², А.С. Федоров³

¹Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

²Вычислительный центр ДВО РАН (г. Хабаровск)

³Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН (г. Красноярск)
2018102293@pnu.edu.ru

В данной работе авторами рассматривается квантово-механическое моделирование системы Si/Ge/Si. Были составлены и отрелаксированы тестовые структуры силицена, германена и самого интерфейса типа сэндвич. Были рассчитаны полный потенциал, электронная плотность и дырочные состояния оттранслированного интерфейса. Были проанализированы значения электронной плотности и полного потенциала системы в зависимости от направления намагниченности. Полученные результаты могут быть применены в нанoeлектронике для создания квантовых транзисторов.

LOCALIZATION OF HOLE STATES AND POTENTIAL DISTRIBUTION IN THE SEANDWICH STRUCTURE Si/Ge/Si

K.V. Obrazcov^{1,2}, A.N. Chibisov², A.S. Fedorov³

¹Pacific National University (Khabarovsk)

²Computing Center, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences (Khabarovsk)

³Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS (Krasnoyarsk)
2018102293@pnu.edu.ru

In this work, the authors carried out quantum mechanical simulation of the Si/Ge/Si system. Test structures of silicene, germanene and the most surface type of sandwich were compiled and relaxed. The total potential, electron density and hole states from the broadcast face were calculated. The contribution to the electron density and the total potential of the system, depending on the sign of the magnetization of the entire supercell was also noted. The obtained results can be applied in the field of nanoelectronics to create quantum transistors.

DOI:10.22250/9785934934195_72

Двухмерные материалы в настоящее время являются объектом внимания исследователей во всем мире, поскольку могут быть использованы для создания квантовых вычислителей на основе дырочных кубитов. В экспериментах двухмерные структуры силицена и германена получают путем осаждения полуметаллов на поверхности металлов (как правило, благородных). Получившиеся в результате материалы обладают новыми электронными свойствами, отличными от исходных материалов [1; 2; 3].

В данной работе мы хотим представить результаты квантово-механических расчетов атомной и электронной структуры для 2D-интерфейса типа сэндвич Si/Ge/Si, составленную из слоев силицена, между которыми расположен германен.

Квантово-механические расчеты атомной и электронной структуры проводились с использованием пакета программ VASP [4; 5; 6; 7], в основе которого лежит теория функционала плотности и

метод псевдопотенциала. Тестовые расчеты для элементарных структур германена, силицена и структуры типа сэндвич были проведены с однородной сеткой k-точек, построенной по схеме Монкхорста – Пэка. Для каждой из структур осуществлены расчеты, с сеткой k-точек $5 \times 5 \times 1$. Расчеты проводились с учетом спин-орбитального неколлинеарного взаимодействия. Для исследования атомной и электронной структуры 2D-интерфейса типа сэндвич Si/Ge/Si мы изучали прежде всего отдельные структуры для силицена и германена. Атомная структура 2D-интерфейса Si/Ge/Si строилась следующим образом: между двумя слоями силицена размещался слой германена. Полученная в результате структура изображена на рис. 1. Затем проводилась полная атомная релаксация структуры.

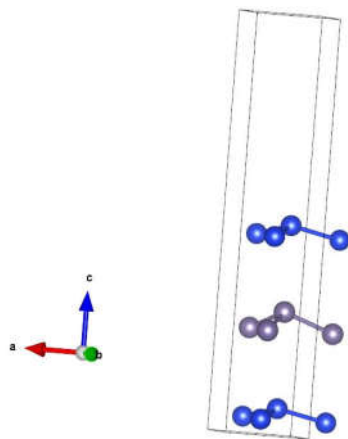


Рис. 1. Структура типа сэндвич.

Для исследования локализации зарядовых состояний дырок в системе для расчетов использовалась суперъячейка гораздо большего размера. Для этого ячейка Si/Ge/Si, представленная на рис. 1, транслировалась вдоль осей X и Y с увеличением параметров ячейки a и b в три раза. В результате получалась суперъячейка, состоящая из 54 атомов, из которых 18 атомов Ge и 36 атомов Si. Затем в системе Si/Ge/Si с помощью внедрения трех дырок создавался избыточный положительный заряд.

Для наглядной демонстрации распределения электронной плотности в системе из электронной плотности с дырками была вычтена электронная плотность системы без дырок (рис. 2). На рисунках синим цветом обозначены атомы кремния, серым – атомы германия. Однако в системе с полной намагниченностью, отрицательной по знаку рис. 3, есть сильное отличие.

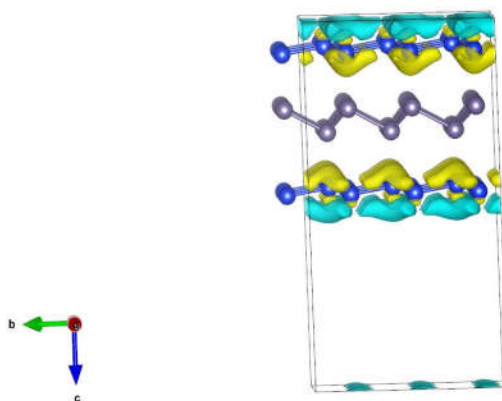


Рис. 2. Разность плотностей зарядовых состояний в системе с 1 и 3 дырками.

Видно, что в случае с отрицательным значением намагниченности дырки локализуются преимущественно на внутренних атомах германия. Подобное положение можно рассматривать в качестве логических «ДА» и «НЕТ», как в диодах (есть сигнал и нет сигнала).

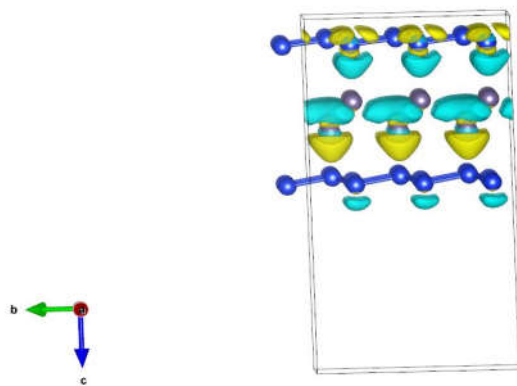


Рис.3. Разность плотностей зарядовых состояний в системе с 1 и 3 дырками.

Также в результате проделанной работы был посчитан полный потенциал приведенной суперячейки для одной и трех дырок соответственно. Формула полного потенциала системы выглядит следующим образом:

$$V_{LOCPOT} = V(r) + \int \frac{n(r')}{|r-r'|} dr' + V_{XC}(r), \quad (1)$$

где $V(r)$ – ионный потенциал; $\int \frac{n(r')}{|r-r'|} dr'$ – потенциал Хартри; $V_{XC}(r)$ – обменно-корреляционный потенциал.

В этой работе проведены квантово-механические расчеты атомной и электронной структуры 2D-интерфейса типа сэндвич Si/Ge/Si. Для расчетов была использована теория функционал-плотности с учетом неколлинеарной намагниченности в приближении спин-орбитального взаимодействия. В ходе работы были посчитаны распределение электронной плотности и полный потенциал системы для модели с избыточным положительным зарядом и без, с разным значением полной намагниченности системы.

В дальнейшем планируются исследования модели с внедренным атомом бора для образования свободной валентной связи и возможности управления его спиновым состоянием путем приложения разнополярного магнитного поля как возможного материала создания дырочного кубита с последующим использованием в квантовом суперкомпьютере.

-
1. Ni Z., Liu Q., Tang K., Zheng J., Zhou J., Qin R., Gao Z., Yu D., and Lu J. Tunable Bandgap in Silicene and Germanene // Nano Lett. – 2012. – №12. – С. 113.
 2. Drummond N. D., Zólyomi V., Fal'ko V. I. Electrically tunable band gap in silicene // Physical Review. – 2012. – №7. – С. 85.
 3. Fan Q., Chai C., Wei Q., Zhou P., Yang Y. Two novel Ge phases and their Si-Ge alloys with excellent electronic and optical properties // Material design. – 2017. – №17. – С. 1.
 4. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular dynamics for liquid metals // Phys. Rev. B. – 1993. – Янв. – Т. 47, вып. 1. – С. 558-561.
 5. Kresse G., Furthmüller J. Efficiency of ab-initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set // Comput. Mater. Sci. – 1996. – Т. 6, No 1. – С. 15-50.
 6. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set // Phys. Rev. B. – 1996. – Т. 54, вып. 16. – С. 11169-11186.
 7. Kresse G., Joubert D. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method // Phys. Rev. B. – 1999. – Т. 59, вып. 3. – С. 1758-1775.

ИССЛЕДОВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ НИТРАТА ЦЕЗИЯ, ВНЕДРЕННОГО В ПОРИСТЫЕ ПЛЕНКИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

А.В. Павлов, Е.В. Стукова

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

lenast@bk.ru

Были изготовлены образцы нанокмпозитов на основе пористых пленок Al_2O_3 (с размерами пор 300 и 240 нм), заполненных нитратом цезия $CsNO_3$, и изучены их электрофизические свойства. Измеренные температурные зависимости эффективной диэлектрической проницаемости ϵ' и коэффициента третьей гармоники показали, что уменьшение размера пор ведет к снижению температуры Кюри более чем на 30 К и размытию фазового максимума перехода, что обусловлено наличием собственных размерных эффектов.

STUDIES OF DIELECTRIC PROPERTIES OF A CAESIUM NITRATE-BASED NANOCOMPOSITE EMBEDDED IN POROUS ALUMINUM OXIDE FILMS

A.V. Pavlov, E.V. Stukova

Amur State University (Blagoveshchensk)

lenast@bk.ru

Samples of nanocomposites based on porous Al_2O_3 films (with pore sizes of 300 and 240 nm) filled with caesium nitrate $CsNO_3$ were made and their electrophysical properties were studied. The measured temperature dependences of the effective permittivity ϵ' and the third harmonic coefficient showed that a decrease in the pore size leads to a decrease in the Curie temperature by more than 30 K and a blurring of the transition phase maximum, which is due to the presence of its own dimensional effects.

DOI:10.22250/9785934934195_75

Композитные материалы на основе пористых наноразмерных матриц, таких как опал, пористое стекло, оксидные пленки металлов и другие, заполненных сегнетоэлектриками, представляют интерес для практического применения с целью получения разнообразных элементов нанoeлектроники. Изучению полярных наноразмерных структур, полученных путем внедрения частиц сегнетоэлектриков в поры оксидной пленки Al_2O_3 , посвящены статьи [1; 2]. В этих работах сообщалось об обнаружении стабилизации сегнетоэлектрической фазы в наноразмерном композите сегнетовой соли $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$, внедренной в пористую пленку оксида алюминия Al_2O_3 . Сегнетоэлектрическая фаза в композите удерживается вплоть до температуры разложения сегнетовой соли (328 К), которая в свою очередь выше температуры Кюри (примерно на 30 градусов) для фазового перехода сегнетовой соли (297 К).

Нитрат цезия $CsNO_3$ обладает сегнетоэлектрическими свойствами с температурой Кюри $T_C = 425$ К. Величина спонтанной поляризации нитрата цезия невелика и, по разным данным, составляет от 2 мКл/см² до 3,23 мКл/см² [3]. Сегнетоэлектрическим свойствам композитных структур на основе нитрата цезия посвящено на сегодняшний день несколько публикаций [4; 5].

В настоящей работе представлены результаты исследования коэффициента третьей гармоники и диэлектрической проницаемости нанокмпозитов, полученных путем внедрения частиц нитрата

цезия CsNO_3 в пленки нанопористого оксида алюминия Al_2O_3 с размерами пор 300 и 240 нм.

Наноккомпозиты были получены с использованием химически чистого CsNO_3 и оксидных пленок Al_2O_3 , произведенных китайской фирмы «TopMembranes Technology». Размеры ячеек составляли 450 нм, толщина – 50 мкм. В эксперименте использовались два вида пленок с диаметром пор 300 и 240 нм.

Внедрение нитрата цезия в поры производилось из насыщенного раствора CsNO_3 при температуре 343 – 353 К. Растворимость нитрата цезия значительно ниже, чем у других нитратов, поэтому степень заполнения пор после 5 циклов внедрения и сушки составляла около 15 % для пленки с порами 300 нм и около 12 % – для пленки с порами 240 нм. В качестве эталонов использовались цилиндрические образцы поликристаллического нитрата цезия (с диаметром 10 мм и толщиной 1,5 мм), полученные прессованием при давлении $8 \cdot 10^3$ кг/см².

Для измерения эффективной диэлектрической проницаемости применялся цифровой импеданс-метр E7-25. С целью обнаружения полярной фазы CsNO_3 использовались методы нелинейной диэлектрической спектроскопии. На образец подавался гармонический сигнал частотой 2 кГц и с помощью анализатора спектра фиксировались и записывались на компьютере сигналы кратных частот, по амплитуде и температурному ходу которых можно определить наличие полярной фазы. Напряженность электрического поля основного сигнала составляла ~ 10 В/мм для объемных образцов и $\sim 10^4$ В/мм – для пленок. Нами для дальнейшего анализа использовался коэффициент третьей гармоники ($\gamma_{3\omega} = U_{3\omega}/U_{\omega}$), наиболее чувствительный к появлению сегнетоэлектрического состояния. Принципы измерений нелинейных диэлектрических свойств подробно изложены в [6; 7].

Графики на рис. 1 и 2 представляют температурную зависимость диэлектрической проницаемости и коэффициента третьей гармоники для объемного нитрата цезия и наноккомпозитного образца на основе пористой оксидной пленки с внедренным нитратом цезия размером пор 300 нм. Температура фазовых переходов составляет 428 К при нагреве и 426 К – при охлаждении. Коэффициент третьей гармоники имеет аномалии при этих же температурах, что свидетельствует о переходе образца CsNO_3 из сегнетоэлектрической в парэлектрическую фазу.

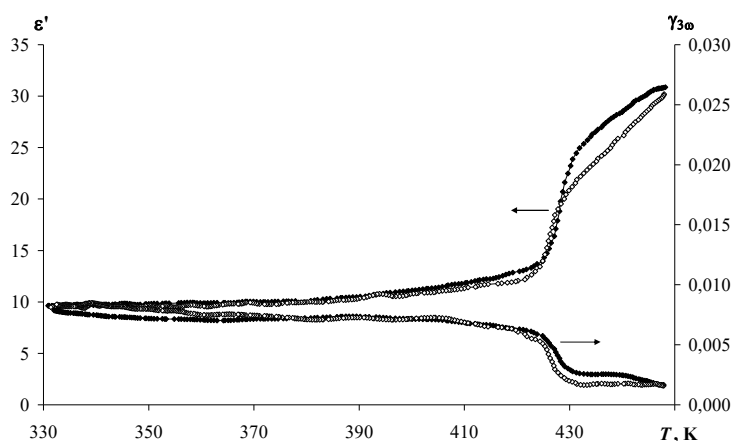


Рис. 1. Температурные зависимости ϵ' и $\gamma_{3\omega}$ для объемного образца CsNO_3 .

Как следует из графиков, приведенных на рис. 2, для наноккомпозитного образца фазовый переход существенно размывается, но по аномалиям на зависимости $\gamma_{3\omega}(T)$ можно оценить температуры исчезновения и появления спонтанной поляризации в CsNO_3 . Для пленки с порами 300 нм они составляют: 416 К при нагреве и 405 К – при охлаждении. Таким образом, наблюдается увеличение температурного гистерезиса фазового перехода с 2 до 11 К.

Для наноккомпозитов $\text{CsNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ с размером пор 240 нм, в связи с меньшей долей нитрата

цезия, сигнал третьей гармоники находится на уровне шумов. Фазовый переход размывается еще сильнее, но температура перехода, определенная по максимуму производной $d\epsilon'/dT$, смещается в низкотемпературную область и для пленки с размером зерен 240 нм, температура фазового перехода при нагреве составляет примерно 393 К, а при охлаждении – примерно 387 К.

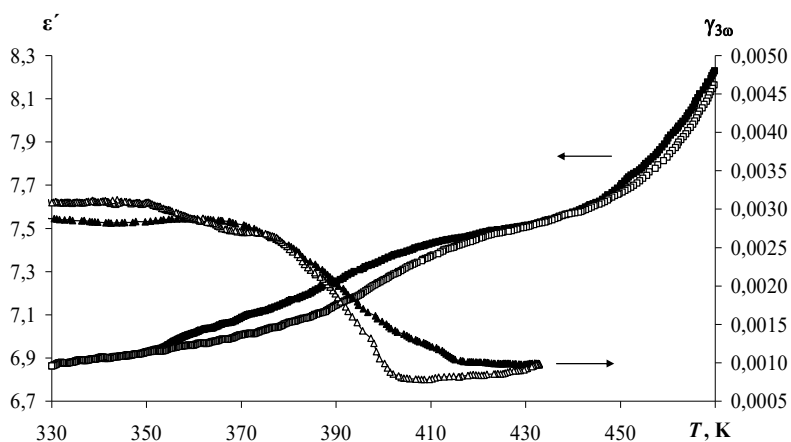


Рис. 2. Температурные зависимости ϵ' и $\gamma_{3\omega}$ для образца нанокompозита $\text{CsNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ с размером пор 300 нм.

Размытие и смещение температуры фазового перехода в область более низких температур было обнаружено в тонких пленках $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$, что авторы объясняют наличием в пленках переключаемых диэлектрических «мертвых слоев» [8; 9], вызванных пиннингом доменных стенок или экранированием внутреннего поля обедненным слоем [10; 11]. Снижение температуры Кюри и размытие фазового перехода отмечались также для DTGS в пленках Al_2O_3 с порами 300 и 100 нм [11], где этот эффект объясняется собственным размерным эффектом. Для композита $\text{CsNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (300 и 240 нм), вероятно, реализуется подобная же ситуация.

Уменьшение температуры фазового перехода CsNO_3 в пленке Al_2O_3 соответствует предсказаниям, выведенным из теоретических моделей Ландау и Изинга [13-15]. Эти модели основаны на концепции корреляционного объема, определяющего количество упорядоченных диполей, необходимых для возникновения сегнетоэлектричества. Сильные взаимодействия вдоль полярной оси и менее сильные перпендикулярно к ней ведут к анизотропии корреляционного объема.

Ранее в работах [16-18] было предсказано снижение температуры фазовых переходов с уменьшением размеров частиц. Эти утверждения были выведены из теоретических моделей Ландау и Изинга, базирующихся на концепции корреляционного объема. Корреляционный объем обуславливает то число упорядоченных диполей, которое определяет наличие сегнетоэлектрического состояния. Полученные нами результаты для CsNO_3 в пленке Al_2O_3 подтверждаются этими предсказаниями. Объясняется это тем, что происходит анизотропия корреляционного объема за счет того, что сильные взаимодействия направлены вдоль полярной оси, а менее сильные – перпендикулярно к ней. Когда размеры частиц уменьшаются ниже критического, баланс между дальнедействующими и короткодействующими силами нарушается и происходит разрушение сегнетоэлектрического состояния и, как следствие, формирование параэлектрической фазы.

Взаимодействия между полярными частицами и стенками пор, а также диполь-дипольное взаимодействие между частицами в соседних порах могут оказывать влияние на температуру фазового перехода сегнетоэлектрических наряду с собственным размерным эффектом. Направления дипольных моментов частиц, находящихся в соседних порах матрицы, могут способствовать как повышению, так и понижению температуры Кюри.

Роль механических напряжений в нанокompозите $\text{CsNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ минимальна из-за частичного

заполнения пор (около 12 – 15 %). Низкое же значение спонтанной поляризации и значительные расстояния между порами снижают влияние диполь-дипольного взаимодействия. Таким образом, самой вероятной причиной снижения температуры Кюри для CsNO_3 в порах оксида алюминия может считаться собственный размерный эффект.

Для сегнетоэлектрических наночастиц, внедренных в матричные материалы, характерно существенное размытие максимума фазового перехода, что обсуждалось в ряде теоретических исследований. Данный фактор может обуславливаться рядом причин, связанных с неоднородностью распределений упругих деформаций и внутренних электрических полей.

-
1. Рогазинская О.В., Миловидова С.Д., Сидоркин А.С., Чернышев В.В., Бабичева Н.Г. Свойства нанопористого оксида алюминия с включениями триглицинсульфата и сегнетовой соли // *Физика твердого тела*. –2009. – Т. 51, № 7. –С. 1430–1432.
 2. Baryshnikov S.V., Stukova E.V., Milinskiy A.Yu., Charnaya E.V., Tien C. Ferroelectricity in Rochellesalt nanoparticles confined to porous alumina // *Ferroelectrics*. –2010. –Vol. 396, No. 1. – P. 3–9.
 3. Lucas B.W. The structure (neutron) of phase II caesium nitrate at 298 K, CsNO_3 // *Acta Crystallographica. Section C: Structural Chemistry*. –1983. –Vol. C39. –Part 12. –P. 1591–1594.
 4. Nautiyal A., Sekhar K.C., Pathak N.P., Nath R. Study of ferroelectric properties of spray pyrolysis deposited cesium nitrate films // *Thin Solid Films*. –2010. –Vol. 518, No. 24, Supplement. –P. e143–e145.
 5. Rao M.V.M., Reddy S.N., Chary A.S. Enhancement of DC ionic conductivity in dispersed solid electrolyte system $\text{CsNO}_3:\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ // *Physica B: Condensed Matter*. –2007. –Vol. 389, No. 2. –P. 292–295.
 6. Милинский А.Ю., Барышников С.В., Чернечкин И.А. Диэлектрические и тепловые свойства нанокompозита нитрат цезия – пористое стекло // *Известия высших учебных заведений. Физика*. –2022. –Т. 65, № 9. – С. 15–19.
 7. Ikeda S., Kominami H., Koyama K., Wada Y.J. Nonlinear dielectric constant and ferroelectric-to-paraelectric phase transition in copolymers of vinylidene fluoride and trifluoroethylene // *Journal of Applied Physics*. –1987. –Vol. 62, No. 8. –P. 3339–3342.
 8. Vendik O.G., Zubko S.P. Ferroelectric phase transition and maximum dielectric permittivity of displacement type ferroelectrics ($\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$) // *Journal of Applied Physics*. –2000. –Vol. 88, No. 9. –P. 5343–5350.
 9. Lookman A., Bowman R.M., Gregg J.M., Kut J., Rios S., Dawber M., Ruediger A., Scott J.F. Thickness independence of true phase transition temperatures in barium strontium titanate films // *Journal of Applied Physics*. –2004. – Vol. 96, No. 1. – P. 555–562.
 10. Larsen P. K., Dormans G.J.M., Taylor D.J., van Yeldhoven P.J. Ferroelectric properties and fatigue of $\text{PbZr}_{0.51}\text{Ti}_{0.49}\text{O}_3$ thin films of varying thickness: Blocking layer model // *Journal of Applied Physics*. –1994. –Vol. 76, No. 4. – P. 2405–2413.
 11. Miller S.L., Nasbv R.D., Schwank J.R., Rodgers M. S., Dressendorfer P. V. Device modeling of ferroelectric capacitors // *Journal of Applied Physics*. –1990. –Vol. 68, No. 12. –P. 6463–6471.
 12. Stukova E., Baryshnikov S., Baryshnikova T., Solnyshkin A. Linear and non-linear dielectric properties of DTGS in porous Al_2O_3 films // *Ferroelectrics*. – 2019. –Vol. 543, No. 1. –P. 184–190.
 13. Zhong W.L., Wang Y.G., Zhang P.L., Qu B.D. Phenomenological study of the size effect on phase transitions in ferroelectric particles // *Physical Review B*. –1994. –Vol. 50, No. 2. –P. 698–703.
 14. Wang Y.G., Zhong W.L., Zhang P.L. Size driven phase transition in ferroelectric particles // *Solid State Communications*. –1994. –Vol. 90, No 5. –P. 329–332.
 15. Wang C.L., Xin Y., Wang X.S., Zhong W.L. Size effects of ferroelectric particles described by the transverse Ising model // *Physical Review B*. –2000. –Vol. 62, No. 17. –P. 11423–11427.
 16. Sedykh P., Michel D. Ferroelectric phase transition in barium titanate nanoparticles // *Physical Review B*. – 2009. –Vol. 79, No. 13. –P. 134119.
 17. Shchukin V.A., Bimberg D. Spontaneous ordering of nanostructures on crystal surfaces // *Review of Modern Physics*. –1999. –Vol. 71, No. 4. –P. 1125–1171.
 18. Morozovska A.N., Glinchuk M.D., Eliseev E.A. Phase transitions induced by confinement of ferroic nanoparticles // *Physical Review B*. –2007. –Vol. 76, No. 1. – P. 014102.

СТЕПЕНЬ РАЗМЕРНОСТНОГО СЖАТИЯ ГЛОБУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ КВАРЦЕВЫХ СТЕКОЛ

Т.А. Писаренко^{1,2}, Ю.А. Злобина²

¹*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН (г. Владивосток)*

²*Дальневосточный федеральный университет (г. Владивосток)*

tata_dvo@iacp.dvo.ru

В работе представлено исследование морфологии глобулярной структуры кварцевых стекол марок КС-4В, КВ, КУ-1, КУВИ-1 на основе модифицированного для спектральных оценок мультифрактального алгоритма Хентшеля-Прокаччо. Установлено, что увеличение фрактонной размерности приводит к уменьшению степени размерностного сжатия. Показано, что по степени размерностного сжатия глобулярная структура кварцевых стекол может быть разделена на два класса топологии.

DEGREE OF DIMENSIONAL COMPRESSION FOR THE GLOBULAR STRUCTURE OF SILICA GLASSES

T.A. Pisarenko^{1,2}, Yu.A. Zlobina²

¹*Institute for Automation and Control Processes FEB RAS (Vladivostok)*

²*Far Eastern Federal University (Vladivostok)*

tata_dvo@iacp.dvo.ru

The paper presents the morphology study of a globular structure of silica glasses of KS-4V, KV, KU-1, KUVI-1 grades based on the Hentschel-Procaccio multifractal algorithm modified for spectral estimates. It has been established that an increase of the fracton dimension leads to a decrease of the degree of dimensional compression. It is shown that, according to the degree of dimensional compression, the globular structure of silica glasses may be divided into two topology classes.

DOI:10.22250/9785934934195_79

В последние годы в физике разупорядоченных сред сформировался принципиально новый подход к проблеме стеклообразного состояния, который не сводится к методологии ближнего порядка [1-3]. Получившая широкое развитие концепция фрактального материаловедения позволяет считать разупорядоченные среды фрактальными объектами [2-5]. В частности, глобулярная (сеточная) структура кварцевых стекол (КС) выступает как иерархическая (многомасштабная) структура мезодефектов [6-8].

Кварцевое стекло получают разными методами: высокотемпературным плавлением кристаллов как натурального кварца, так и предварительно синтезированного кремний-обогащенного сырья. В зависимости от исходного сырья, а также технологии и нюансов плавки выделяют четыре типа стекол [9]. В настоящей работе обсуждается структура КС марок КС-4В, КВ, КУ, КУВИ-1. Структурный аспект всех четырех марок КС представляет собой типичную для КС глобулярную систему [6; 7], которая на микронном уровне (≤ 1000 мкм) может образовывать очень сложные иерархические системы [8], имеющие топологию «мыльной пены» [10]. Причем даже на визуальном уровне для них справедлив принцип масштабной инвариантности [3-5].

Исходя из особенностей, топологии КС можно объединить в два класса. Стекла КУ и КУВИ-1 можно объединить в один класс по принципу существенной пространственной однородности мезомасштабных топологических элементов, характеризующихся достаточно узкополосной функцией распределения по размерам. В этом случае никакая многомасштабность в явном виде, на первый взгляд, не проявляется. В другом классе, к которому принадлежат стекла марок КС-4В и КВ, в глаза бросается явная многомасштабность в виде «пузырчатой» топологии, которая обычно и ассоциируется с фрактальностью [3-5].

Вполне естественно ожидать и при фрактонном подходе различимости этих двух классов КС. Исходными характеристиками для фрактонного анализа являются спектральные оценки, на которых строится интегральная нормированная мера интенсивности:

$$\mu(m, q) = \sum_{q_0}^q [I(q_0)/I(q_i)]^m, \quad (1)$$

где $m=1,2,3,\dots$; $q_i \in [q_{\min}, q_{Na}]$ – порядок меры. Интегральная мера $\mu(m, q)$ зависит от двух переменных: m – обыкновенных гладких размерностей, q – пространственных частот. В R_q -пространстве вводятся аналоги логарифмических шаров размерности m :

$$S(m, q) = \ln q^m = \ln V(q^m), \quad (2)$$

где $V(q^m)$ – объем шара в R_q -пространстве размерности m с радиусом $|q|$. Формулу (2) можно трактовать как геометрическую энтропию в обратном пространстве.

Следуя Реньи [11], введем спектральную энтропию:

$$H(m, q) = \ln \mu = \ln \sum_{q_0}^q [I(q_0)/I(q_i)]^m. \quad (3)$$

Выражение (3) несколько отличается от известных видов энтропии Реньи [11, 12], поскольку множитель $1/m$ мы отнесли на счет формулы (2).

Таким образом, при нашем подходе в рассмотрение вводятся два вида энтропий в R_q -пространстве. Одна из них является энергетическим спектральным функционалом в вероятностной форме, а другая – геометрическая энтропия [13].

Важно заметить, что мы специально добиваемся согласованного (энтропийного) представления энергетического и геометрического подходов в $R(q^m)$ -пространстве. С точки зрения теории меры, спектральную энтропию мы записываем как логарифм меры интенсивности. Тогда фрактонная размерность определяется как

$$d(m, q) = \frac{H(m, q)}{S(m, q)} \Rightarrow \frac{\partial H}{\partial S}, \quad (4)$$

которую можно трактовать как плотность спектральной энтропии в логарифмическом шаре $R(q^m)$ -пространства. Согласно (4) $d(m, q)$ – это некоторая поверхность в координатах $\{m, q\}$ (рис.1а). С термодинамической точки зрения, выражение (4) является просто плотностью одной энтропии по другой энтропии над плоскостью $\{m, q\}$. Здесь разумно подчеркнуть, ссылаясь на формулы (1), (3), что как мера интенсивности, так и спектральная энтропия являются функциями текущего q , которое стоит в верхнем пределе. Их можно было бы назвать интегральными характеристиками.

Принцип подобия в классической степенной форме не выполняется. Поэтому вполне возможно, что первых производных может быть недостаточно, тогда надо переходить ко вторым производным, надеясь уже с их помощью заметить какие-либо закономерности. Основная производная будет браться в этом сечении по q (рис.1 б), т. е.:

$$\pi^* = \frac{\partial d(m^*, q)}{\partial q} = \frac{\partial^2 H(m^*, q)}{\partial S \partial q} = \frac{\partial^2 H}{\partial S^2} \frac{\partial S}{\partial q} \Big|_{m^*}. \quad (5)$$

Таким образом, фрактальный параметр π (5) – это уже вторая производная функционала $H(m, q)$ по $S(m, q)$.

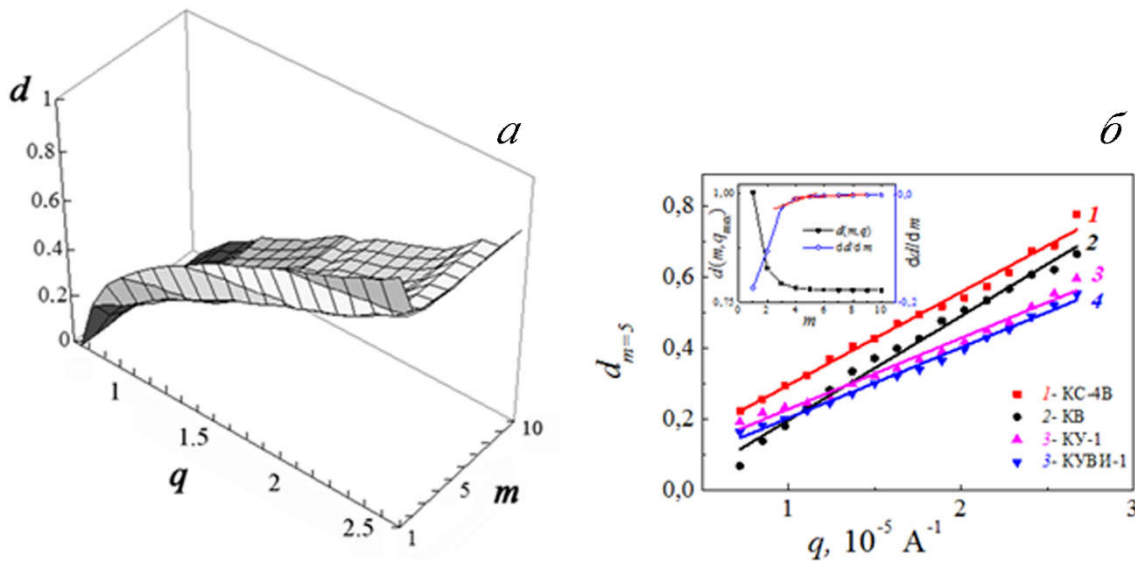


Рис. 1. Спектры фрактонных размерностей $d(m, q)$: а) поверхность состояния $d(m, q)$ для КС-4В; б) фрактонный спектр сечения $d(m^*=5, q)$ исследуемых кварцевых стекол.

Выбор сечения $[m^*]$ происходит по известному решающему правилу (вкладка на рис.1б) и по смыслу является целочисленной размерностью объемлющего пространства. Эта характеристика обычно в синергетике и теории аттракторов ассоциируется с нижней границей числа степеней свободы и рангом системы нелинейных уравнений динамической системы [12]. Численный эксперимент показал значение $[m^*]=5$ во всех случаях. Тем самым структура отдельностей КС универсальна и требует не менее в пяти степеней свободы, т.е. структура КС может быть бездефектно вложена в гладкое 5-мерное пространство.

Согласно данным табл.1, фрактальные характеристики исследуемых марок стекол наиболее четко разбиваются на два класса по производной π (5). Различие по производной π в ~ 1.4 раза следует признать существенным, тем более, что нами была использована приведенная шкала q . При этом большие значения π и d наблюдаются для ярко выраженных иерархических глобулярных структур, в то время как меньшие значения этих характеристик соответствуют более однородным ансамблям мезодефектов.

Фрактонные характеристики кварцевых стекол

	КС-4В	КВ	КУ-1	КУВИ-1
$d(m^*, q_{\max})$	0,78	0,67	0,59	0,55
π^*	$2,67 \pm 0,07$	$2,79 \pm 0,06$	$1,88 \pm 0,05$	$1,87 \pm 0,04$
$\square$	46,6	44,2	62,4	62,6

Увеличение сложности поверхностной топологии, с одной стороны, указывает на уменьшение плотности упаковки глобулярной структуры из-за увеличения объема системы мезодефектов, а с другой стороны, из полученных результатов следует, что увеличение фрактальной размерности как раз соответствует увеличению сложности структурообразующей системы мезодефектов.

Более того, используя производную π как основной фрактонный показатель, можно ввести степень фрактального сжатия η относительно пространства вложения m как:

$$\eta = \frac{m^* - \pi^*}{m^*}. \quad (6)$$

Как можно видеть из данных таблицы, степень размерностного сжатия для стекол КС-4В и КВ составляет менее 50 %, тогда как для стекол КУ и КУВИ-1 достигает более 60 %. Это различие в оценках плотности упаковки стоит отнести за счет принципиального различия топологии электронно-микроскопических изображений обоих классов КС. Например, можно ввести понятие «спектра размеров» для поверхностей КС, который в случае стекол КВ и КС-4В имел бы многомодальную структуру. Очевидно, что в этом случае существует многомасштабная упорядоченность по размерам. Топологическая особенность стекол этого класса указывает, что в полосу пропускания нашей системы обработки информации попадает сразу несколько масштабных уровней. Подобная многомодальная иерархическая система обладает бóльшим значением фрактонной размерности π и, соответственно, меньшей степенью размерностного сжатия η . Данная структура попросту является более плотной («густой»), поскольку в полосу пропускания канала обработки попадает сразу несколько уровней.

Таким образом, КС марок КС-4В и КВ имеют малый дефект упаковки по степени размерностного сжатия, поскольку их фрактонная размерность выше, чем у КС марок КУ-1 и КУВИ-1. Сопоставляя литературные данные [7; 9; 14] и наши результаты, можно предположить, что фрактальная топология морфологического рельефа КС отражает технологию их приготовления, поскольку морфологическая структура определяется такими технологическими параметрами как наличие в расплаве примесей, их объем и распределение. Именно распределение дефектов будет коррелировать с полученной нами степенью размерностного сжатия.

-
1. Кляцкин В.И. Стохастическое структурообразование в случайных средах // УФН. – 2016. – Т.186. – № 1. – С. 75-104.
 2. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. – М.: Наука, 1994. – 384 с.
 3. Олемской А.И., Флат А.Я. Использование концепции фрактала в физике конденсированной среды // Успехи физических наук. – 1993. – Т. 163. – № 12. – С. 1-50.
 4. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
 5. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 260 с.
 6. Ермоленко Т.А., Агроскин Л.С., Журавлев Г.И., Корнев В.В. Статистическое распределение размеров структурных отдельностей кварцевого стекла, выявленных глубоким травлением // Прикладная химия. – 1987. – Т.60, № 7. – С. 1648-1650.
 7. Корнев В.В., Ермоленко Т.А., Козлова М.А. Дискретность в строении кварцевого стекла // ДАН СССР. – 1985. – Т.285, № 4. – С.988 – 991.
 8. Юдин В.В., Савчук Е.Г., Журавлев Г.И., Ермоленко Т.А., Гольцова О.В., Матохин А.В., Корнев В.В. Лазерно-дифракто-метрический анализ поверхности образцов кварцевого стекла // Прикладная химия. – 1989. – Т. 62, № 4. – С. 860 - 865.
 9. Леко В.К., Мазурин О.В. Свойства кварцевого стекла. – Л.: Наука, 1985. – 166 с.
 10. Weaire D. The constraint of disorder // Physical Properties of amorphous materials. – 1985. – P.157–169.
 11. Реньи А. Трилогия о математике. – М.: Мир, 1980. – 376 с.
 12. Ахромеева Т.С., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Самарский А.А. Нестационарные структуры и диффузионный хаос. – М.: Наука, 1992. – 640 с.
 13. Писаренко Т.А., Юдин В.В. Фрактонная кинетика аморфных планарных сред в процессах структурной релаксации // Материаловедение. – 2002, № 11. – С.6–11.
 14. Vukolov K.Y., Levin B.A. Results of irradiation tests of KU-1 and KS-4V silica glasses as ITER candidate window materials // Fusion engineering and design. – 2003. – V. 66. – P. 861-864.

ФРАКТОННАЯ КИНЕТИКА СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ СПИННИНГОВАННЫХ ЛЕНТ Fe-Cr-B ПРИ ПОСЛОЙНОМ ТРАВЛЕНИИ

Т.А. Писаренко^{1,2}, А.М. Фролов², Г.С. Крайнова²

¹Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН (г. Владивосток)

²Дальневосточный федеральный университет (г. Владивосток)

tata_dvo@iacp.dvo.ru

Представлены результаты исследования фрактальной эволюции морфологии поверхностей раздела спиннингованных лент Fe-Cr-B в процессе послойного травления. Установлено, что кинетика фрактонных размерностей отражает сценарии эволюции топологии контактной и свободной поверхностей при их травлении, и наиболее ярко проявляется на скоростных режимах спиннингования вблизи фазового перехода поликристаллическое-аморфное упорядочение.

FRACTON KINETICS OF THE STRATIFIED STRUCTURE OF MELT-SPUN Fe-Cr-B RIBBONS UNDER LAYER-BY-LAYER ETCHING

T.A. Pisarenko^{1,2}, A.M. Frolov², G.S. Kraynova²

¹Institute for Automation and Control Processes FEB RAS (Vladivostok)

²Far Eastern Federal University (Vladivostok)

tata_dvo@iacp.dvo.ru

The results of the study of the fractal evolution of the interface morphology of the melt-spun Fe-Cr-B ribbons in the process of layer-by-layer etching are presented. It has been established the fracton dimension kinetics maps the scenarios for the topology evolution of the contact and free surfaces during their etching, which is most clearly manifested under high-speed spinning regimes near a polycrystalline-amorphous ordering phase transition.

DOI:10.22250/9785934934195_83

В последние годы одним из основных способов получения аморфного состояния в металлических сплавах стал метод сверхбыстрой закалки расплава со скоростями охлаждения $\geq 10^6$ К/с. Для этого метода характерна крайняя неравновесность термо- и гидродинамических условий получения: значительные градиенты температуры и импульса приводят к большим величинам сопряженных потоков. В подобных условиях можно трактовать быстрозакаленные ленты с позиций стратифицированной планарной среды, представляющей собой пакет элементарных слоев, не обязательно равномерных [1-3].

Аморфная лента, полученная методом спиннингования, имеет две поверхности: свободную от влияния охлаждающего барабана и контактную. В процессе формирования из расплава на контактной с материалом закалочного диска поверхности образуется технологический рельеф, состоящий из каверн, каналов, полос обработки поверхности закалочного диска, грубого и тонкого поперечного «муара» и ручьистого узора неконтакта, связывающего между собой все неоднородности (рис.1а) Главной особенностью контактной поверхности является разный уровень формирования неоднородностей по высоте поверхностного слоя ленты. На свободной поверхности лент замораживаются поверхностные волны, размеры которых зависят от конкретных параметров спиннингования [3]. Соответственно микрорельеф контактной и свободной поверхностей лент значительно отличается (рис.1), следствием чего является разная реакция на внешние воздействия, в частности, травление.

В работах [4-12] по структуре, в том числе морфологической, аморфных материалов показано, что они имеют фрактальную организацию. Принципиальным моментом является то, что структуры спиннигованных лент подчиняются принципу скейлинга в квазистохастическом смысле, что отражается в мультифрактальном упорядочении [6-12].

В настоящей работе объектами исследования являлись микроскопические изображения морфологического рельефа спиннигованных лент $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$, параметризованных скоростями вращения медного охлаждающего барабана: 10, 20, 30 и 45 м/с. Ленты, полученные при скоростях холодильника 20-45 м/с, рентгеноаморфны; при скорости 10 м/с возник быстрозакаленный сплав с кристаллическим упорядочением [13]. С микроизображений поверхностей раздела получены спектральные оценки в виде дифракционных картин Фраунгофера (ДКФ) [14] и дифференциальные профили частотных характеристик (рис.1). Для фрактонного анализа мы использовали интегральные частотные характеристики, позволяющие иметь более детальную оценку распределения неоднородностей.

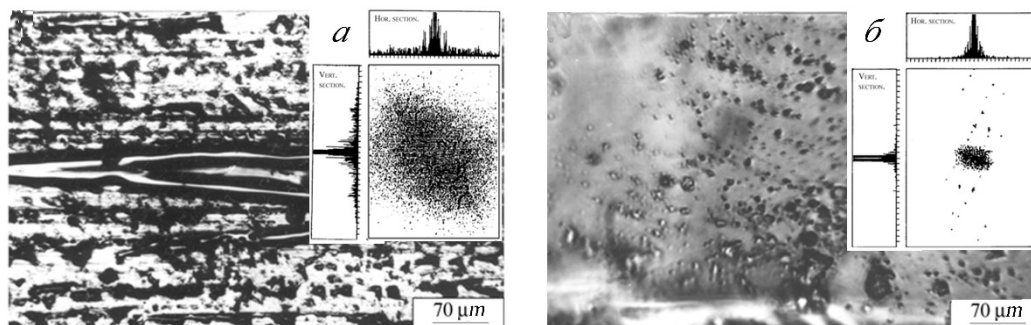


Рис. 1. Изображение микрорельефа поверхностей спиннигованной ленты: а) контактная, б) свободная. На вкладках дифракционные картины Фраунгофера с дифференциальными профилями спектра мощности.

Поверхности раздела фольг представляют собой искаженный слой, в котором вследствие физического и/или химического воздействия в сочетании с влиянием окружающей среды происходят структурные изменения. Он перекрывает структуру матрицы, не подвергшуюся внешнему воздействию. Этот слой неоднороден. В большинстве случаев его толщина неизвестна. Зачастую природа структурных изменений в этом слое носит сложный характер, поскольку одновременно протекает несколько процессов или реакций [1-3].

Для более детального изучения структуры и свойств лент последние были подвергнуты травлению в 50 %-ом растворе азотной кислоты при 60 °С. Для кристаллической ленты (10 м/с), выявлено значительное уменьшение толщины от 140 до ~70 мкм в течение 80 мин. Для аморфных аналогов фольг $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ отмечено монотонное изменение толщин от 40-45 до 20-30 мкм.

Для количественной параметризации кинетики структурной релаксации в процессе травления применялась стандартная методика оценки фрактонных размерностей [4-5]. Термин «фрактонная» отражает специфику определения размерности в двойных логарифмических шкалах в спектральном пространстве. Однако спектральные оценки от поверхностей раздела фольг $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ не относятся к классу степенных: они не спрямляются в двойных логарифмических шкалах, для них можно получить лишь малокомпонентную кусочно-линейную аппроксимацию. В результате наиболее надежные фрактонные оценки были получены для коротковолновой (КВ) части спектра мощности 3-14 мкм. Отметим, что КВ-компонента более чувствительна к характеру распределения морфонеоднородностей микрорельефа фольг. На рис. 2 представлены зависимости фрактонной размерности для КВ-неоднородностей морфореельефа от времени травления.

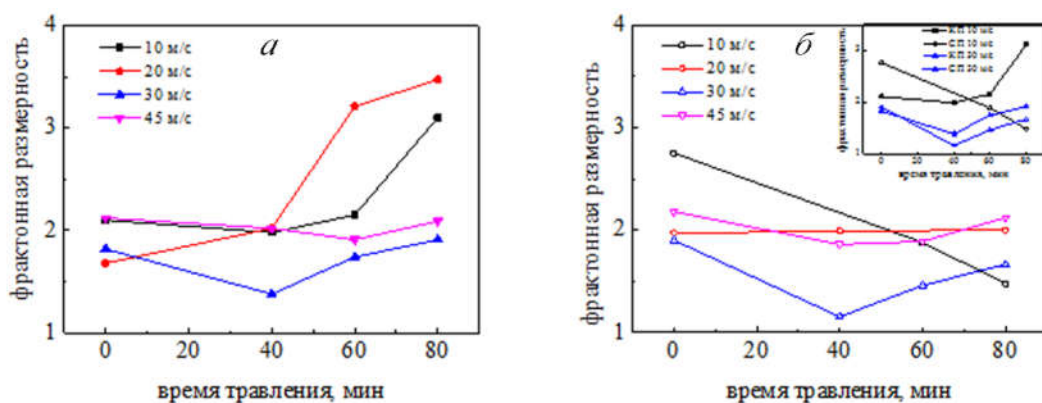


Рис. 2. Фрактонные размерности морфоструктуры спиннингованных лент FeCrB, параметризованных скоростями спиннингования в зависимости от времени травления:

а) контактная поверхность, б) свободная поверхность.

Из рис.2 видно, что для всех образцов, за исключением быстрозакаленной ленты, полученной при скорости холодильника 20 м/с, характерно уменьшение фрактонной размерности на первом этапе травления на обеих поверхностях раздела. Это связано с тем, что травление начинается со «снятия» технологического рельефа лент, сопровождающегося увеличением пространственных размеров морфонеоднородностей. Последующее увеличение фрактонной размерности фольг связано с началом процесса травления естественной матрицы, сопровождающегося проявлением мелкомасштабной сеточной структуры. Принципиально иное поведение в процессе послойного травления демонстрирует фольга, полученная при 20 м/с, что связано со структурным фазовым переходом кристаллическое-аморфное состояние [13].

Понимание особенностей фрактонных зависимостей (рис.2) может быть получено из их сравнения с данными рентгеноструктурного анализа (рис.3). С этой точки зрения, особый интерес представляет фольга 10 м/с. В процессе травления на рентгенограммах было отмечено увеличение числа фаз, в частности появляется аморфная фаза, которая со временем травления становится более интенсивной (рис. 3а). Следовательно, локальный минимум фрактонной размерности на контактной поверхности после 40 минут травления можно объяснить уменьшением интенсивности поликристаллической фазы и появлением аморфной фазы на рентгенограмме, а последующий рост фрактонной размерности связан с увеличением вклада мелкомасштабных дефектов сеточного типа. С другой стороны, зависимость фрактонной размерности для свободной поверхности имеет ниспадающий характер, что отражает последовательную эволюцию кристаллических фаз.

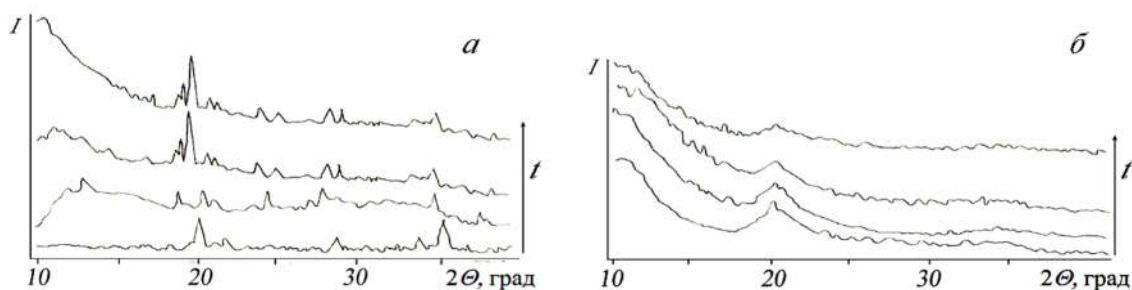


Рис. 3. Рентгенограммы (Mo K α) спиннингованных лент FeCrB, параметризованные временем травления (исходный, 40, 60, 80 мин.): а) для сплава при 10 м/с, б) для сплава при 20 м/с.

Гетерогенное аморфное состояние (20 м/с) по характеру границ между структурными единицами (отдельностями) ближе к сильно неравновесному поликристаллическому состоянию (10 м/с), однако рост фрактонной размерности на контактной поверхности отражает эволюцию аморфной сеточ-

ной структуры дефектов уже с первого этапа травления. Топологическая устойчивость свободной поверхности фольги в гетерогенном аморфном состоянии (20 м/с), на наш взгляд, связана с крайней степенью стохастичности распределения морфонеоднородностей [8], рентгенограммы этой фольги идентифицируют углубление аморфного состояния в процессе травления (рис. 3б).

При дальнейшем увеличении степени неравновесности сплава $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ фрактальное упорядочение отражает специфику формирования структуры в режиме динамического хаоса [6]. Как было показано в работе [8], при режиме спиннингования 30 м/с фольга имеет гомогенную стеклообразную структур, при этом фрактальная эволюция топологии поверхностей в процессе травления осуществляется синфазно, а сами фрактонные размерности отличаются незначительно (см. вкладку на рис. 2). Затянутость процесса травления крупномасштабной структуры морфонеоднородностей образца 45 м/с обусловлена наличием нанокристаллической фазы, цементирующей аморфную матрицу, сдерживая топологическую эволюцию.

Установлено, что при травлении контактная и свободная поверхности фольг, полученных при высокоскоростных режимах спиннингования, эволюционируют синфазно, тогда как в сценариях эволюции морфологии контактной и свободной поверхностей фольг, полученных при скоростных режимах вблизи фазового перехода поликристаллическое-аморфное упорядочение, наблюдается значительная разница. Показано, что эволюция системы мезодефектов осуществляется в пространстве переменной размерности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда ДВФУ, проект №22-02-03-005.

-
1. Кекало И.Б. Процессы структурной релаксации и физические свойства аморфных сплавов. – М.: Изд. дом МИСиС, 2014. – 436 с.
 2. Кекало И.Б. Процессы структурной релаксации и физические свойства аморфных сплавов. – М.: Изд. дом МИСиС, 2016. – 834 с.
 3. Метастабильные и неравновесные сплавы /под ред. Ю.В. Ефимова – М.: Металлургия, 1988. – 383 с.
 4. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. – М.: Наука, 1994. – 384 с.
 5. Федер Е. Фракталы. – М.: УРСС: Ленанд, 2014. – 256 с.
 6. Ахромеева Т.С., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Самарский А.А. Нестационарные структуры и диффузионный хаос. – М.: Наука, 1992. – 640 с.
 7. Писаренко Т.А., Фролов А.М., Крайнова Г.С. Эволюция многомасштабной иерархической структуры дефектов быстрозакаленного сплава $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}(\text{Sn})$ при низкотемпературном отжиге // Деформация и разрушение материалов. – 2019. – № 5. – С. 6–11.
 8. Frolov A.M., Pisarenko T.A. Identification of structure ordering of melt-spun $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ alloy by the entropy functionals // Solid State Phenomena. – 2020. – V. 312. – P. 229-234.
 9. Pisarenko T.A., Kraynova G.S., Frolov A.M. Kinetics of the fractal mesodefect structure of melt-spun $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}(\text{Sn})$ alloys during annealing // Solid State Phenomena. – 2016. – V. 249. – P. 101-105.
 10. Pisarenko T.A., Frolov A.M., Kraynova G.S. Evolution of structure-scaling and magnetic properties during thermal loading of melt-spun $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}(\text{Sn})$ alloys //Solid State Phenomena. – 2014. – V.215. – P.190-195.
 11. Kraynova G.S., Frolov A.M., Pisarenko T.A. Fractal ordering nanostructured planar media // Advanced Materials Research. – 2013. – V. 718–720. – P. 85–90.
 12. Frolov A.M., Pisarenko T.A., Kraynova G.S., Ilin N.V., Ralin A.Yu. Effect of high-speed nonequilibrium on morphological and magnetic properties of melt-spun $\text{Co}_{58}\text{Ni}_{10}\text{Fe}_5\text{Si}_{11}\text{B}_{16}$ alloy // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2022. – T. 15. – № S3.1. – С.155-161.
 13. Фролов А.М. Многомасштабные структурно-морфологические неоднородности металлических сплавов, полученных закалкой из жидкого состояния / Дисс. на соиск. уч. степ. д.ф.-м.н. – Владивосток: ДВФУ, 2022. – 253 с.
 14. Грудин Б.Н., Плотников В.С. Обработка и моделирование микроскопических изображений. –Владивосток: Дальнаука, 2010. – 349 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК Mg_2Si НА Si (111)

А.В. Поляков¹, Н.С. Новгородцев¹, К.Н. Галкин², Н.Г. Галкин², Д.В. Фомин¹, И.А. Рябов¹

¹Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

²Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН (г. Владивосток)

polyakov_a_1999@mail.ru

В данной работе представлены результаты исследования оптических свойств (методами комбинационного рассеяния света (КРС) и ИК-спектроскопии) и рельефа поверхности (методом атомно-силовой микроскопии (АСМ)) тонких пленок Mg_2Si с толщинами 180 и 240 нм, сформированных на Si (111). Формирование образцов происходило методом реактивной эпитаксии при трехкратном осаждении порций Mg и Si при температуре подложек $T_n = 250$ °С. Формирование Mg_2Si в обеих выращенных пленках доказано по присутствию в спектрах КРС пиков при 258 и 348 см^{-1} и полосы поглощения с максимумом при 272 см^{-1} в спектрах ИК-спектроскопии. Методом АСМ установлено, что для обоих образцов характерен островковый механизм роста пленок. Расчет среднеквадратичной шероховатости R_q показал, что у пленки образца 1 шероховатость в 1,5 раза выше, чем у образца 2; при этом у образца 2 по сравнению с образцом 1 площадь дефектов в 2,2 раза меньше.

INVESTIGATION OF OPTICAL PROPERTIES AND SURFACE RELIEF OF Mg_2Si THIN FILMS ON Si (111)

A.V. Polyakov¹, N.S. Novgorodtsev¹, K.N. Galkin², N.G. Galkin², D.V. Fomin¹, I.A. Ryabov¹

¹Amur State University (Blagoveshchensk)

²Institute of Automation and Control Processes FEB RAS (Vladivostok)

polyakov_a_1999@mail.ru

This paper presents the results of investigation of the optical properties (using Raman scattering (Raman) and IR spectroscopy) and surface relief (atomic force microscopy (AFM) methods) of thin Mg_2Si films with thicknesses of 180 and 240 nm formed on Si (111). The samples were formed by reactive epitaxy with triple deposition of portions of Mg and Si at the substrate temperature $T_s = 250$ °C. The formation of Mg_2Si in both grown films was proven by the presence of peaks at 258 and 348 cm^{-1} in the Raman spectra and an absorption band with a maximum at 272 cm^{-1} in the IR spectra. Atomic force microscopy showed that both samples are characterized by an insular mechanism of film growth. The calculation of the root-mean-square roughness R_q showed that the roughness of the film of sample 1 is 1,5 times higher than that of sample 2; at the same time, sample 2, compared with sample 1, area of defects are 2,2 times less.

DOI:10.22250/9785934934195_87

Большой интерес у научного сообщества вызывают тонкие пленки Mg_2Si , потому что данный материал является перспективным для датчиков оптоэлектронных устройств. Более высокое быстродействие характерно для датчиков, выполненных на основе Mg_2Si , по отношению к датчикам на основе Si , Ge и GaAs [1]. Это связано с тем, что низкоразмерный Mg_2Si обладает узкой шириной запрещенной зоны (от 0,6 до 0,8 эВ) по сравнению с рассмотренными выше полупроводниками. Помимо этого, Mg_2Si обладает широким диапазоном фоточувствительности (от 200 до 2100 нм) [1 - 3]. Поэтому формирование и исследование тонких пленок Mg_2Si является одной из востребованных научных задач.

Формирование образцов происходило методом реактивной эпитаксии в СВВ-камере Varian с $P_{\text{баз.}} = 10^{-7}$ Па. Кремниевые подложки вырезались из шайбы КЭФ-Si (111) с удельным сопротивлением от 2 до 15 Ом·см. Источник магния брался чистотой 99,999 %. Перед проведением ростовых экспериментов выполняли стандартную процедуру очистки всех подложек и источников [4].

Образцы были сформированы при $T_{\text{п.}} = 250$ °С. Первым этапом на подложках был сформирован буферный слой Si толщиной 60 нм, а вторым – проведено трехкратное поочередное осаждение слоев Mg и Si. При этом соотношение их толщин одно и то же для каждого образца ($h_{\text{Mg}}:h_{\text{Si}} = 3:1$). Отличие эксперимента по формированию пленок заключалось в толщинах слоев: $h_{\text{Mg}} = 45$ нм и $h_{\text{Si}} = 15$ нм – для образца 1; $h_{\text{Mg}} = 60$ нм и $h_{\text{Si}} = 20$ нм – для образца 2. В результате ростовых экспериментов были сформированы два образца, содержащие тонкие пленки разной толщины: $h_1 = 180$ нм и $h_2 = 240$ нм.

Сформированные образцы были исследованы методом КРС-спектроскопии с помощью спектрофотометра NTEGRA Spectra II (NT-MDT) при длине волны лазера $\lambda = 473$ нм (рис. 1).

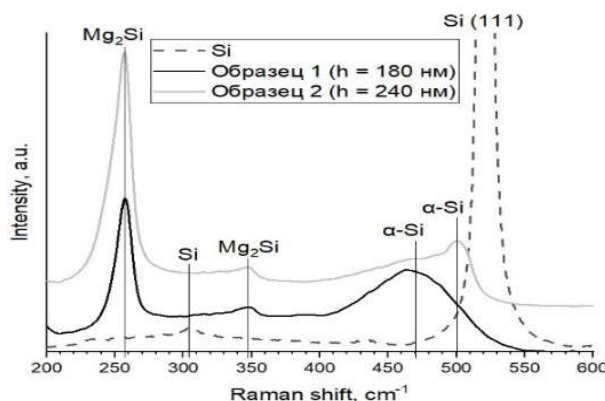


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния образцов.

На КРС-спектре, соответствующем Si, наблюдаются пики при КРС-сдвиге 520 и 305 см^{-1} , согласно [5; 6], указывающие на монокристаллический Si. Анализ спектров КРС обоих образцов показал наличие на них пиков большей амплитуды при 258 см^{-1} и меньшей амплитуды при 348 см^{-1} , которые указывают на наличие Mg_2Si [3; 5]. Также на спектрах наблюдаются широкие пики при КРС-сдвиге 470 и 500 см^{-1} , по данным [5; 7] свидетельствующие о наличии аморфного Si в составе полученных пленок.

Далее образцы исследовали методом ИК-спектроскопии с помощью Фурье-спектрофотометра Bruker VERTEX 80v. Полученные в результате исследования образцов графики показаны на рис. 2.

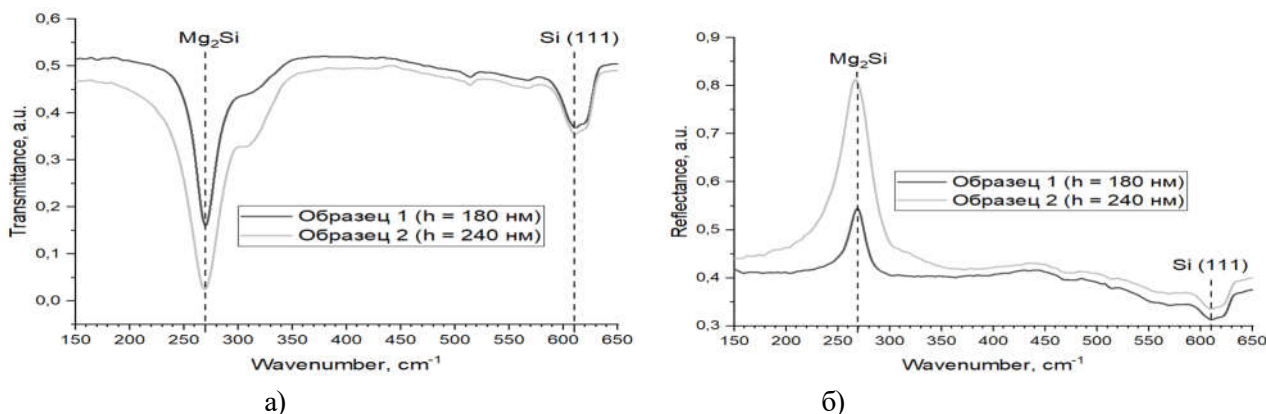


Рис.2. ИК-спектры пропускания (а) и отражения (б) образцов.

Их анализ показал, что на спектрах пропускания и отражения наблюдается спектральная полоса фонона с волновым числом 272 см^{-1} . При этом при 272 см^{-1} происходит резкое уменьшение коэффици-

ента пропускания и увеличение коэффициента отражения у обоих образцов. По данным [6; 8], это указывает на возбуждение фонона Mg_2Si . Видно (рис. 2, а), что при всех значениях энергии фононов величина коэффициента пропускания у образца 2 ниже, чем у образца 1. Заметно (рис. 2, б), что во всем ИК-диапазоне значение коэффициента отражения выше у образца, содержащего пленку толщиной 240 нм, по сравнению с образцом, содержащим пленку толщиной 180 нм. В то же время спектральная линия при 272 см^{-1} у образца 2 имеет большую ширину и интенсивность, чем у образца 1. По данным [5; 8], это указывает на большее количество Mg_2Si в образце 2. Также на спектрах пропускания и отражения наблюдается спектральная линия при 610 см^{-1} , согласно [5; 6], соответствующая возбуждению фонона монокристаллического Si (подложки Si (111)).

Рельеф поверхности сформированных пленок Mg_2Si изучался методом АСМ с помощью атомно-силового микроскопа Solver P47. 2D-АСМ изображение образца 1 и его 3D-реконструкция представлены на рис. 3, а образца 2 – на рис. 4.

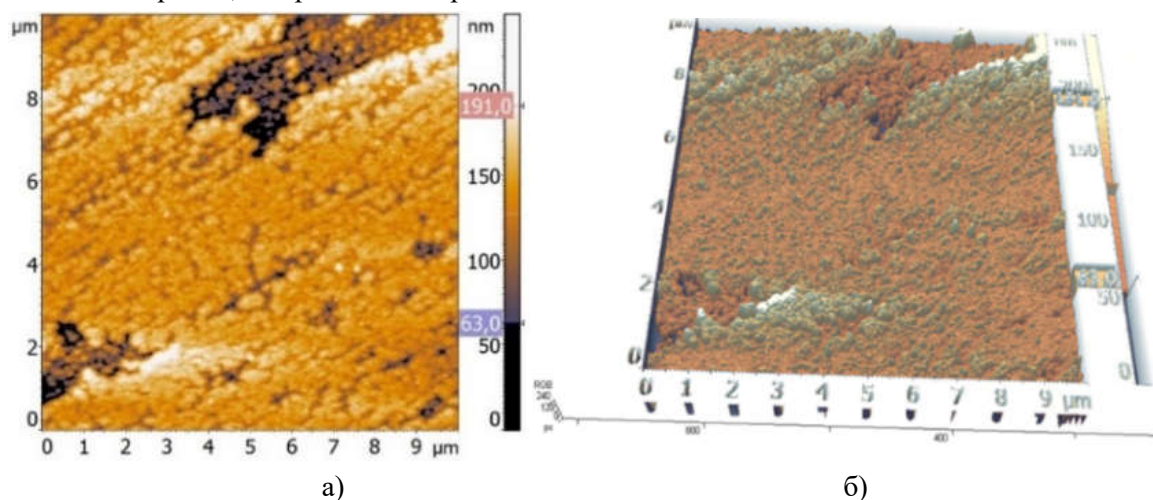


Рис. 3. 2D-АСМ изображение образца 1 (а) и его 3D-реконструкция (б).

Анализ 2D- и 3D-АСМ изображений показал, что рост пленки образца 1 происходил по островковому типу. При этом большинство островков узкие и имеют ширину от 100 до 200 нм. Четко видно малое количество островков размерами от 400 до 500 нм. Наблюдаются кластеры островков, образовавшиеся вследствие их коалесценции. Средняя площадь кластеров – 9 мкм^2 . Также в рельефе поверхности пленки образца 1 присутствуют впадины, относящиеся к поверхностным дефектам.

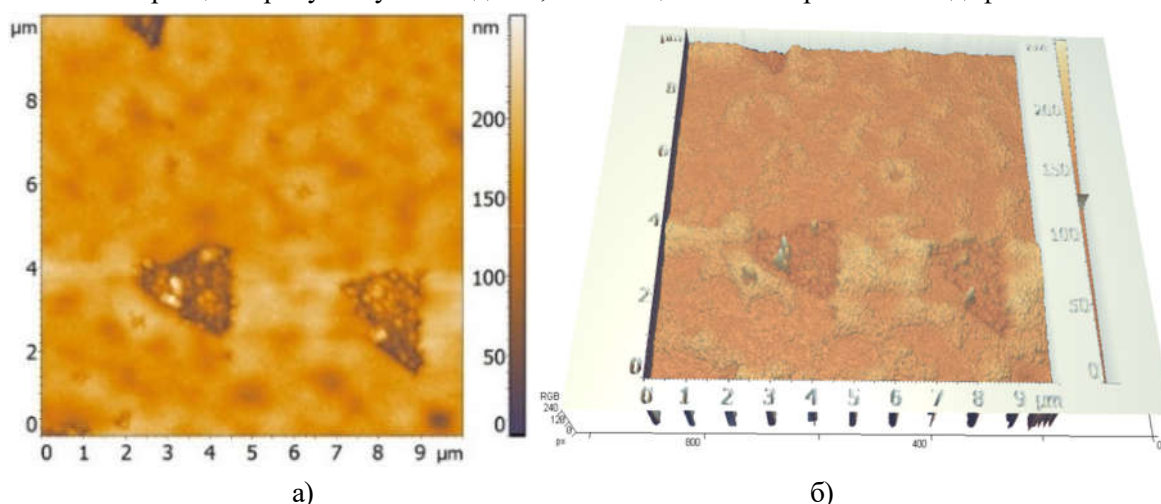


Рис. 4. 2D-АСМ изображение образца 2 (а) и его 3D-реконструкция (б).

Проанализировав 2D- и 3D-АСМ изображения, видим, что для образца 2 характерен островковый механизм роста пленки с последующей коалесценцией островков. При этом количество кластеров

у второго образца больше, чем у первого, при меньшем их размере. Также в рельефе поверхности у образцов наблюдаются впадины, площадь которых у образца 2 меньше по сравнению с образцом 1.

На основе полученных АСМ-изображений был проведен расчет параметров шероховатости поверхности сформированных пленок Mg_2Si . Результаты расчетов представлены в таблице.

Результаты расчета параметров шероховатости поверхности сформированных пленок Mg_2Si

Образец	Средняя шероховатость	Среднеквадратичная шероховатость	Мера эксцесса
	R_a , RGB	R_q , RGB	R_{ku}
1	33,20	46,86	4,52
2	18,23	31,06	9,88

Из анализа таблицы установлено, что среднеквадратичная шероховатость у пленки образца 1 в 1,5 раза выше, чем у образца 2; при этом у последнего площадь дефектов в 2,2 раза меньше.

Таким образом, по результатам работы можно сделать следующие выводы. Сформированные методом реактивной эпитаксии при $T_{\text{п}} = 250$ °С два образца с пленками толщинами 180 и 240 нм, по данным КРС-спектроскопии (пики при сдвиге 258 и 348 см^{-1}), содержат в своем составе Mg_2Si . Методом ИК-спектроскопии установлено присутствие на спектрах обоих образцов спектральной полосы при волновом числе 272 см^{-1} , также принадлежащей Mg_2Si . Методом АСМ установлено, что для обоих образцов характерен островковый механизм роста пленок. Расчет среднеквадратичной шероховатости R_q показал, что у пленки образца 1 шероховатость в 1,5 раза выше, чем у образца 2; при этом у образца 2 по сравнению с образцом 1 площадь дефектов в 2,2 раза меньше.

1. Поляков А.В. Силицид магния – перспективный материал для оптических датчиков / А.В. Поляков, Д.В. Фомин, Н.С. Новгородцев // Успехи прикладной физики. – 2023. – Т.11, №1. – С.52-60.

2. Fabrication and Characterization of Visible to Near-Infrared Photodetector Based on Multilayer Graphene/ Mg_2Si /Si Heterojunction / Hong Yu [et al.] // Nanomaterials. – 2022. – Vol. 12, №18. – P. 3230.

3. Textured Stainless Steel as a Platform for Black Mg_2Si /Si Heterojunction Solar Cells with Advanced Photovoltaic Performance / A.V. Shevlyagin [et al.] // Materials. – 2022. – Vol.15, № 19. – P. 6637.

4. Экспериментальные методы физики твердого тела / Д. В. Фомин. – М., Берлин: Директ-Медиа, 2014. – 186 с. – ISBN 978-5-4475-2829-4.

5. Наносекундный импульсный отжиг кремния, имплантированного ионами магния / Н.Г. Галкин [и др.]// Журнал технической физики. 2013. – Т.83, вып.1. – С. 99-104.

6. Photoreflectance Spectra of Highly-oriented Mg_2Si (111)/Si (111) Films / Y. Terai [et al.] // JJAP Conference Proceedings. – The Japan Society of Applied Physics. – 2020. – Т.8. – P. 011004-1 - 011004-4.

7. Рамановская спектроскопия аморфного кремния, подвергнутого лазерному отжигу / А.В. Нежданов [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2012. – № 1. – С. 3-7.

8. Галкин К. Н. Оптические свойства мультислойных материалов на основе кремния и наноразмерных кристаллитов силицида магния / К. Н. Галкин, А. М. Маслов, В. А. Давыдов // Журнал прикладной спектроскопии. – 2006. – Т. 73, № 2. – С. 204-209.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ПРОТОНОВ ЧЕРЕЗ ПОЛЫЕ И СПЛОШНЫЕ ЧАСТИЦЫ СТРУКТУРЫ Al_2O_3/SiO_2

М.В. Резник, В.Ю. Юрина

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

В данной работе представлены результаты моделирования воздействия протонов энергии 30 и 100 кэВ на полые и сплошные частицы структуры Al_2O_3/SiO_2 в программных комплексах «SRIM». Диаметр внешних стенок 900 нм. Внешний слой сфер состоит из SiO_2 толщиной 40 нм, внутренний слой полых сфер – из Al_2O_3 толщиной 160 нм. Внутреннее строение полых частиц представляет собой сферу радиуса 250 нм, заполненную O_2 . В результате моделирования было установлено, что длина свободного пробега протонов в полых частицах в двое больше по сравнению со сплошными.

SIMULATION OF PROTON PASSAGE THROUGH HOLLOW AND SOLID PARTICLES OF Al_2O_3/SiO_2

M.V. Reznik, V.Yu. Iurina

Amur State University (Blagoveshchensk)

This work presents the results of modeling the effects of protons of energy 30 and 100 keV on hollow and solid particles of the Al_2O_3/SiO_2 structure in SRIM software complexes. The diameter of the outer walls is 900 nm. The outer layer of the spheres consists of SiO_2 with a thickness of 40 nm. The inner layer of the hollow sphere consists of Al_2O_3 with a thickness of 160 nm. The internal structure of a hollow particle is a sphere with a radius of 250 nm filled with O_2 . As a result of the simulation, it was found that the free path of protons in hollow particles compared to solid particles is 2 times longer.

DOI:10.22250/9785934934195_91

В настоящее время продолжается активное исследование космоса при помощи различных космических аппаратов. Вследствие этого вопрос улучшения их защиты от ионизирующего излучения является достаточно важным. Один из основных способов решения данной задачи – разработка и применение новых защитных материалов и покрытий. Перспективным направлением космического материаловедения является разработка защитных материалов (терморегулирующих покрытий), состоящих из полых микрочастиц. Выбор полых микрочастиц объясняется их радиационной стойкостью в сравнении с объемными частицами [1; 2].

В нашей работе представлены результаты моделирования воздействия протонов энергии 30 и 100 кэВ на полые и сплошные частицы структуры Al_2O_3/SiO_2 в программных комплексах «SRIM».

Для моделирования воздействия протонов с полыми и сплошными частицами использовался программный пакет SRIM [3]. SRIM представляет собой программный пакет транспорта ионов в некристаллическом веществе методом Монте-Карло без учета неупругих ядерных реакций, моделирующий все процессы взаимодействия налетающих частиц с атомами вещества [4]. TRIM, входящий в программный пакет SRIM, является программой, способной рассчитывать как конечное трехмерное распределение ионов, так и все кинетические явления, связанные с потерей энергии ионов. К этим явлениям относятся: повреждение мишени, распыление, ионизация, генерация фотонов.

Условия моделирования воздействия протонов на полые и сплошные частицы в программном комплексе «SRIM»: энергия электронного пучка – 30 и 100 кэВ, диаметр электронного пучка – 1 нм, возникновение вторичных электронов нет, размер сфер – 900 нм, толщина внешней оболочки сферы – 40 нм, материал внешней оболочки – SiO_2 , толщина внутренней сферы полый частицы – 160 нм, диаметр внутренней сферы сплошной частицы – 8200 нм, материал внутренней сферы – Al_2O_3 , материал внутри полый сферы – газ O_2 , общее число сфер – 4, число бомбардирующих электронов – 10^3 , угол падения – 90° , число одновременно отображаемых траекторий – 1000.

На рис. 1 представлено воздействие пучка протонов с энергией 30 кэВ с полыми (рис 1.а) и объемными (рис 1.б) частицами $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$.

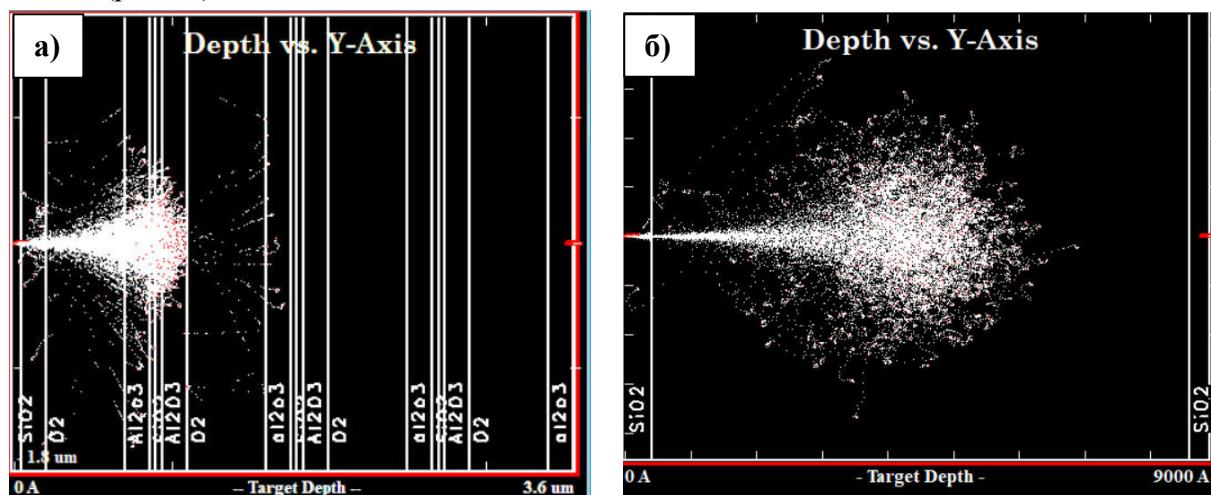


Рис.1. Результат воздействия протонов с энергией 30 кэВ с полый – а) и сплошной – б) частицами $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$.

Анализ воздействия протонов показал, что глубина проникновения протонов с энергией 30 кэВ достигает примерно от 0,6 до 0,7 мкм в сплошных частицах (рис 1.б) и примерно от 1,6 до 1,75 мкм в полых частицах (рис 1.а). Поскольку протоны энергии 30 кэВ неспособны преодолеть одну сплошную частицу, то дефекты будут образовываться в поверхностном слое частиц. В случае полых частиц протоны способны преодолеть первый слой частиц, благодаря чему часть дефектов возникать в частицах второго слоя.

На рис. 2 представлено воздействие пучка протонов с энергией 100 кэВ с полыми (рис 2., а) и объемными (рис 2.б) частицами $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$.

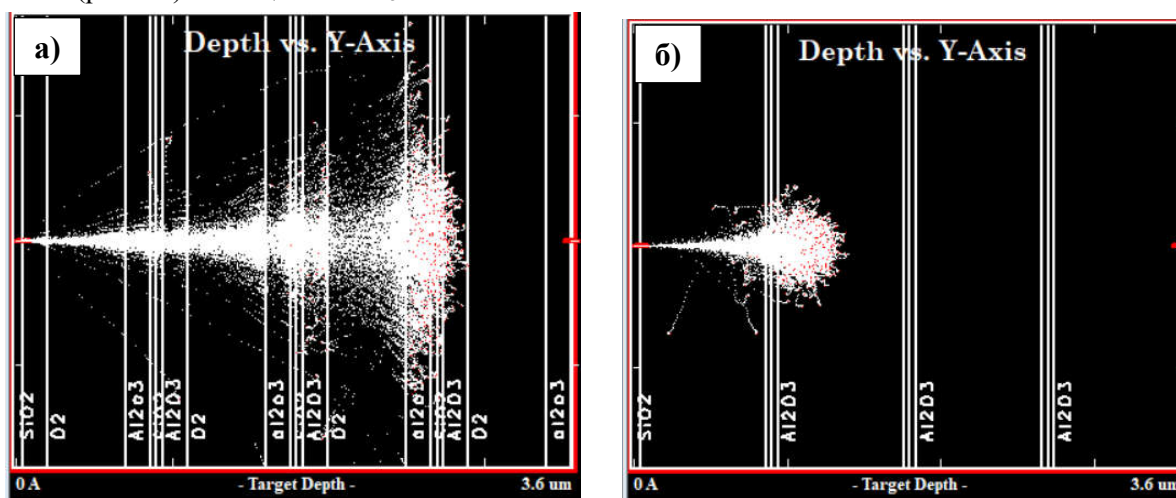


Рис. 2 Воздействие потока протонов энергии 100 кэВ на кластер из 4-х полых – а) и сплошных – б) частиц $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$.

Анализ воздействия протонов показал, что глубина проникновения протонов с энергией 100 кэВ достигает примерно 1,35 мкм в сплошных частицах (рис. 2а) и примерно от 2,8 до 2,9 мкм в полых частицах (рис. 2б).

Моделирование подтверждает большую эффективность и стойкость полых частиц в сравнении со сплошными. Это следствие наличия у полых частиц пустой области, внутри которой воздействия протонов на вещество не происходит. В то же время у сплошных частиц такая полость отсутствует, вследствие чего воздействие протонов на вещество происходит во всем объеме сплошной частицы.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Госзадание №122082600014-6 (FZMU-2022-0007).

1. Юрина В. Ю. Оптические свойства и радиационная стойкость микро-, наночастиц и микросфер Al_2O_3 / В. Ю. Юрина, В. В. Нещименко, Л. Чундун // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – № 3. – С. 46-52. – DOI 10.31857/S1028096020030218. – EDN RNUYPG.

2. Гамза Д. К. Радиационная стойкость полых частиц диоксида титана, обработанных УФ-облучением / Д. К. Гамза, В. В. Нещименко // Вестник Амурского государственного университета. Серия «Естественные и экономические науки». – 2022. – № 97. – С. 35-40. – DOI 10.22250/20730268_2022_97_35. – EDN OWZMBL.

3. Biersack J. P. A Monte-Carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous targets/ J. P. Biersack, L. G. Haggmark // Nuclear Instruments and Methods. – 1980. – V. 174 (1–2). –P. 257–269.

4. Kinchin G.H., Pease R.S. Displacement of Atoms in Solid by Radiation // Reports on Progress in Physics – 1955 – V. 18, No. 4. – P. 590-615.

УДК537.226

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ИОДИДА ДИИЗОПРОПИЛАММОНИЯ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ ЧАСТИЦ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

А.В. Сахненко, Е.В. Стукова

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

anna_izbickaya@mail.ru

В работе исследованы температурные зависимости диэлектрической проницаемости композитов на основе иодида диизопропиламмония (DIPAI) и наночастиц Al_2O_3 размером 100 нм и объемной долей оксида алюминия 0,05, 0,10, 0,2 в режиме нагрев – охлаждение в интервале 300 – 400 К. Обнаружено изменение последовательности фазовых переходов в композитах по сравнению с чистым DIPAI. Анализ полученных результатов показал, что в структуре композита проявляется изменение водородных связей с участием аминогрупп, что может приводить к появлению сегнетоэлектрического состояния в DIPAI.

INVESTIGATION OF DIELECTRIC PROPERTIES OF COMPOSITES BASED ON DIISOPROPYLAMMONIUM IODIDE WITH INCLUSIONS OF ALUMINUM OXIDE PARTICLES

A.V. Sakhnenko, E.V. Stukova

Amur State University (Blagoveshchensk)

anna_izbickaya@mail.ru

The temperature dependences of the dielectric permittivity of composites based on diisopropylammonium iodide (DIPAI) and Al_2O_3 nanoparticles with a size of 100 nm and a volume fraction of aluminum oxide of 0.05, 0.10, 0.2 in the heating-cooling mode in the range of 300–400 K. A change in the sequence of phase transitions in composites compared to pure DIPAI was found. Analysis of the obtained results showed that the structure of the composite shows a change in hydrogen bonds with the participation of amino groups, which can lead to the appearance of a ferroelectric state in DIPAI.

DOI:10.22250/9785934934195_93

В настоящее время ведется активный поиск органических сегнетоэлектриков ввиду их низкой стоимости, простоты обработки, экологичности и биосовместимости. В качестве примеров успешного поиска можно привести кроконовую кислоту, хлорид и бромид диизопропиламмония. Относительно иодида диизопропиламмония (DIPAI), который является третьим представителем сегнетоэлектриков на основе диизопропиламина, в литературе имеются противоречивые сведения [5; 6]. В исследовании [5] были выращены кристаллы DIPAI, спонтанная поляризация которых равна примерно $33 \text{ мкКл}\cdot\text{см}^{-2}$. Однако авторы [6] при изучении синтезированных ими кристаллов DIPAI не выявили в них полярного состояния. В работе [7] было показано, что для перевода DIPAI в сегнетоэлектрическое состояние его необходимо нагреть выше температуры 423 К.

Одним из способов модификации свойств сегнетоэлектрических материалов является создание на их основе композитов. Поскольку DIPAI представляет собой органический сегнетоэлектрик со сложной молекулярной структурой, то добавление в него наночастиц оксида алюминия Al_2O_3 может привести к взаимодействию на молекулярном уровне.

В настоящей статье приводятся результаты исследования диэлектрических свойств композитов $(\text{DIPAI})_{1-x}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_x$, полученных при смешивании порошка DIPAI с наночастицами оксида алюминия размером 100 нм. В качестве эталонного использовался образец объемного DIPAI.

Кристаллы DIPAI обладают орторомбической неполярной симметрией с пространственной группой $P2_12_12_1$ [5; 6]. При их нагревании выше комнатных температур в DIPAI возникают один или два фазовых перехода (в зависимости от технологии получения и температурной предыстории).

В нашем эксперименте получение DIPAI (иодид диизопропиламмония $[(\text{изо-}\text{C}_3\text{H}_7)_2\text{NH}_2]\text{I}$) основывалось на взаимодействии эквимольных количеств диизопропиламина ($\text{изо-}\text{C}_3\text{H}_7)_2\text{NH}$ (Sigma) и иодоводородной кислоты (57 %, AcrosOrganics) в водном растворе [8]. В общем виде реакция протекает по следующему уравнению: $(\text{изо-}\text{C}_3\text{H}_7)_2\text{NH} + \text{HI} = [(\text{изо-}\text{C}_3\text{H}_7)_2\text{NH}_2]\text{I}$.

При проведении синтеза 0,1 моль гидроиодида HI растворяли в 10 мл дистиллированной воды. К полученному раствору медленно, при охлаждении, добавляли 0,1 моль диизопропиламина. После испарения растворителя при комнатной температуре были получены крупные бесцветные прозрачные игольчатые кристаллы, которые перекристаллизовывались из горячего этанола. Кристаллы промывали диэтиловым эфиром и сушили в темном месте в эксикаторе над хлоридом кальция. Выход составил 68 %.

Образцы композитов $(\text{DIPAI})_{1-x}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_x$ ($x = 0,05; 0,10; 0,20$; x – объемные доли) были получены с использованием порошков DIPAI (~10 мкм) и Al_2O_3 с размером частиц 100 нм. Композиты приготавливали путем тщательного перемешивания указанных порошков в агатовой ступке. Для исследования диэлектрических свойств полученный порошок прессовали в виде дисков размером $\text{Ø}10 \times 1,5 \text{ мм}$ под давлением 7500 кг/см^2 .

Для измерения диэлектрических свойств (диэлектрической проницаемости ϵ') использовали импедансметр Е7-25 с частотным диапазоном от 20 до 10^6 Гц. В качестве электродов применялось серебряная паста. Температура фиксировалась с точностью 0,1 К при помощи термометра ТС-6621. Измерения проводили в температурном интервале от 300 до 440 К, в автоматическом режиме, со скоростью 1 К/мин.

Погрешность определения диэлектрической проницаемости исследуемых образцов не превышала 5 %. Инфракрасные (ИК) спектры образцов DIPAI, Al_2O_3 и композита $(\text{DIPAI})_{0,80}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0,20}$ в виде таблеток, запрессованных с KBr, регистрировали на интерференционном ИК-спектрометре с Фурье-преобразованием ФСМ-2202 (отечественного производства) в диапазоне $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$.

Полученный в данной работе образец DIPAI, согласно температурным зависимостям ϵ' и сигнала ДТА, обнаруживает один фазовый переход при нагревании и один – при охлаждении (рис. 1). Это позволяет заключить, что сегнетоэлектрическая фаза не формируется, а переход происходит между двумя параэлектрическими фазами при температурах 376 и 360 К при нагреве и охлаждении.

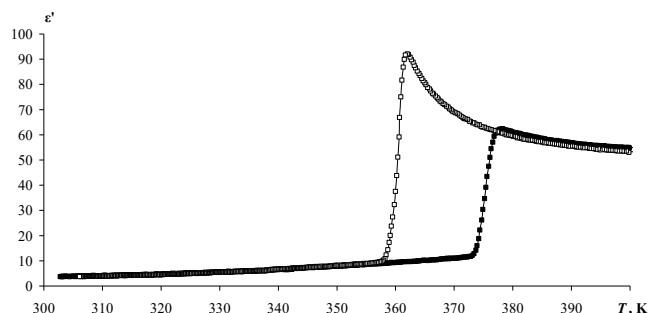


Рис. 1. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ' , полученные на частоте 10 кГц для образца DIPAI при нагреве (темные символы) и охлаждении (светлые символы).

Для композитов $(\text{DIPAI})_{0,95}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0,05}$ результаты исследования диэлектрической проницаемости также указывают на наличие двух фазовых переходов (рис. 2). В режиме нагрева максимум наблюдается при температуре 360 К, а при охлаждении – около 358 К.

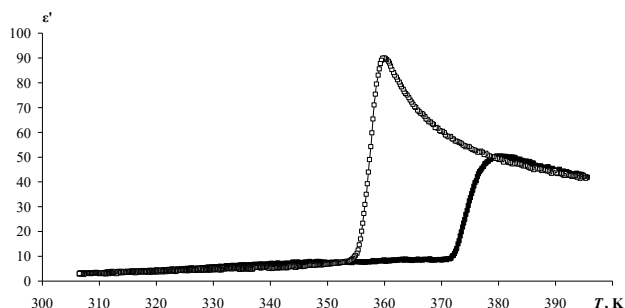


Рис. 2. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ' и сигнала ДТА (на вставке), полученные на частоте 10 кГц для образца композита $(\text{DIPAI})_{0,95}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0,05}$ при нагреве (темные символы) и охлаждении (светлые символы).

При увеличении содержания наночастиц Al_2O_3 до 10%, на $\epsilon'(T)$ в режиме нагрева прослеживаются два фазовых перехода: при 362 и 376 К (рис. 3). Это соответствует формированию сегнетоэлектрической фазы (согласно данным работы [7]). В режиме охлаждения наблюдается один фазовый переход – при 358 К.

Оксид алюминия относится к линейным диэлектрикам, и частицы Al_2O_3 не обладают дипольными моментами, которые могли бы индуцировать появление сегнетоэлектрической фазы в DIPAI. Поэтому единственным возможным механизмом взаимодействия наночастиц DIPAI и Al_2O_3 является их взаимодействие на молекулярном уровне. Для проверки этого предположения были получены ИК-спектры чистого DIPAI и композита $(\text{DIPAI})_{0,80}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0,20}$.

Супрамолекулярная структура галогенидов диизопропиламмония обусловлена водородными связями $\text{N}\cdots\text{H}\cdots\text{Hlg}$, где $\text{Hlg} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$. В ряду галогенид-ионов $\text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{I}^-$ расстояние $\text{N}\cdots\text{Hlg}$ увеличивается

с соответствующим ростом атомного радиуса галогена. В кристалле DIPAI иодид-ионы I⁻, выполняя мостиковую роль, объединяют катионы диизопропиламмония. Фазовый переход, наблюдаемый при нагревании кристаллов DIPAI, сопровождается их сложной структурной перестройкой, которая обусловлена образованием оптических изомеров катионами DIPAI, их перегруппировкой в кристалле, изменением упаковки цепей. Прочность водородных связей N–H...I в двух фазах существенно различна.

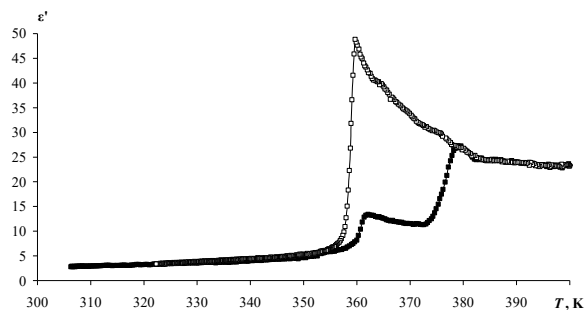


Рис. 3. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ' и сигнала ДТА (на вставке), полученные на частоте 10 кГц для образца композита $(\text{DIPAI})_{0.90}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0.10}$ при нагреве (темные символы) и охлаждении (светлые символы).

В композите $(\text{DIPAI})_{0.80}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0.20}$ также наблюдаются два фазовых перехода при нагревании: около 363 и 378 К, и один при охлаждении, при температуре примерно 358 К (рис. 4).

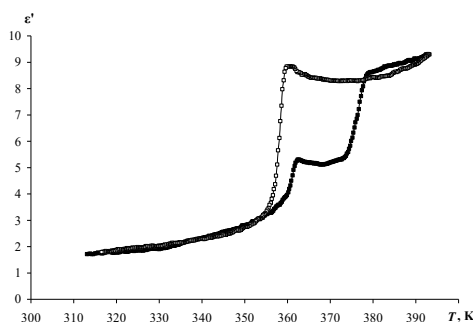


Рис. 4. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ' и сигнала ДТА (на вставке), полученные на частоте 10 кГц для образца композита $(\text{DIPAI})_{0.80}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0.20}$ при нагреве (темные символы) и охлаждении (светлые символы).

Лабильность водородных связей в структуре DIPAI способствует их перегруппировке и образованию новых связей в композите $(\text{DIPAI})_{0.80}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0.20}$. В ИК-спектре оксида алюминия полоса поглощения при $3770\text{--}3730\text{ см}^{-1}$ соответствуют льюисовскому основному центру [12]. Значительное сглаживание и исчезновение полосы поглощения $3760,0\text{ см}^{-1}$ в данной области спектра может свидетельствовать об образовании в системе $\text{DIPAI}\text{--}\text{Al}_2\text{O}_3$ водородных связей N–H...O–Al между атомами водорода NH_2 -групп и координационно ненасыщенными атомами кислорода, являющимися основными центрами. Присутствие в оксиде алюминия кислотных льюисовских центров – атомов алюминия – предполагает возможность их участия в (Al I)-взаимодействиях, которые приводят к значительному снижению интенсивности полос поглощения при $3566,8$ и $3588,1\text{ см}^{-1}$.

Частоты валентных колебаний NH_2 - и $i\text{-Pr}$ -групп зависят от степени их участия в водородной связи. Образование водородных связей проявляется сдвигом полос, соответствующих $\nu(\text{N}\text{--}\text{H})$ и $\nu(\text{C}\text{--}\text{H})$, в сторону низких частот [10; 11]. В спектре $\text{DIPAI}\text{--}\text{Al}_2\text{O}_3$ полоса поглощения валентных колебаний N–H ($3424,4\text{ см}^{-1}$) смещена в низкочастотную область спектра ($3422,5\text{ см}^{-1}$). Кроме того, полоса поглощения деформационных колебаний ($1573,9\text{ см}^{-1}$) смещена и проявляется при $1574,3\text{ см}^{-1}$; плечо при $1579,1\text{ см}^{-1}$ не выражено, что указывает на подавление деформационных колебаний N–H связей. Это

подтверждает предположение об упрочнении водородных связей, в образовании которых участвуют аминогруппы. В то же время не наблюдается смещения полосы поглощения валентных и деформационных колебаний (C–H)-связей *i*-Pr-групп.

Совокупность обсуждаемых результатов позволяет сделать вывод, что в структуре образца $\text{DIPAI-Al}_2\text{O}_3$ проявляется изменение водородных связей с участием аминогрупп, что может приводить к появлению сегнетоэлектрического состояния в DIPAI.

1. Ravi K.S., Diptikanta S., Siva P., Hariharan N., Handady L.B., Tayur N.G.R., Suja E. Observation of ferroelectric phase and large spontaneous electric polarization in organic salt of diisopropylammonium iodide // Journal of Applied Physics. –2017. –Vol. 121, No. 11. –P. 114101–114105.

2. Piecha-Bisiorek A., Gaḡor A., Isakov D., Zieliński P., Gaḡazka M., Jakuba R. Phase sequence in diisopropylammonium iodide: avoided ferroelectricity by the appearance of a reconstructed phase // Inorganic Chemistry Frontiers. –2017. –Vol. 4, No. 3. –P. 553–558.

3. Milinskiy A.Yu, Baryshnikov S.V., Egorova I.V, Nguyen H.T. Dielectric properties of ferroelectric diisopropylammonium iodide // Phase Transitions. –2019. –Vol. 92, No. 4. –P. 406–410.

4. Jiang C., Tong W.-Y., H. Lin, Luo C., Peng H., Duan C.-G. Effect of counter anions on ferroelectric properties of diisopropylammonium-cation based molecular crystals // Physica Status Solidi. A. –2017. –Vol. 214, No. 6. –P. 1700029.

5. Чукин Г.Д. Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций. М.: Типография Паладин, ООО «Принта», 2010. –288 с.

6. Smith B.C. Infrared spectral interpretation: A systematic approach. Florida, USA: Boca Raton: CRC Press, 1998. –288 p.

7. Nakamoto K. Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds. New York: J. Wiley & Sons, 1986. –484 p.

УДК 535.37

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА МАКСЕНОВ $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ И $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$

**А.В. Сюй¹, С.М. Новиков¹, Г.И. Целиков¹, В.В. Криштоп^{1,2}, Д.С. Штарев³, А.В. Арсенин¹,
В.С. Волков¹**

¹Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет)
(г. Долгопрудный)

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет (г. Пермь)

³Университет МГУ - ППИ в Шеньчжэне (г. Шеньчжень)
siui.av@mipt.ru

Сообщается, что максены $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ и $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ представляют собой металлический двумерный (2D) материал с высокой проводимостью, тогда как механизм его фотолюминесценции (PL) все еще обсуждается. Здесь мы показываем, что максены $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ и $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ демонстрируют регулируемую фотолюминесценцию в условиях окружающей среды с узкополосным пиком полушириной меньше 1 нм. Синтезированные максены $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ и $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ излучают на 694 нм при различных длинах волн возбуждения 532 нм и 633 нм. Длина волны их излучения ФЛ смещается в красную сторону на 0,4 нм, а пик интенсивности уменьшается на 40 % при нагревании образца на 60 °С. Наше исследование раскрывает оптические свойства максенов $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ и $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ и помогает всесторонне понять этот новый материал.

PHOTOLUMINESCENT PROPERTIES OF $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ AND $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ MXENES

A.V. Syuy¹, S.M. Novikov¹, G.I. Tselikov¹, V.V. Krishtop^{1,2}, D.S. Shtarev³, A.V. Arsenin¹, V.S. Volkov²

¹*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*

²*Perm National Research Polytechnic University (Perm)*

³*Department of Materials Science, Shenzhen MSU-BIT University, China (Shenzhen)*

siui.av@mipt.ru

$\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ and $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ MXenes are reported to be a highly conductive metallic two-dimensional (2D) material, while its photoluminescence (PL) mechanism is still under discussion. Here, we demonstrate that $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ and $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ MXenes exhibit tunable photoluminescence under ambient conditions with a narrow band peak at half-width less than 1 nm. The synthesized $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ and $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ MXenes emit at 694 nm at different excitation wavelengths of 532 nm and 633 nm. The wavelength of their PL emission is redshifted by 0.4 nm, and the intensity peak decreases by 40 % when the sample is heated by 60 °C. Our study reveals the optical properties of $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ and $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ MXenes and helps to understand this new material in a comprehensive way.

DOI:10.22250/9785934934195_97

Введение

2011 г. были получены первые MXene (новое семейство 2D-материалов) путем селективного травления MAX-фазы (общая формула $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n$, где М – ранний переходный металл, А – элементы 13 и 14 основной группы, а X – углерод и/или азот) в жидкости при комнатной температуре [1]. К настоящему времени изготовлено около 100 MAX-фаз и описано до 30 MXene, что делает их самой большой группой среди 2D-семейства [2]. MAX-фазы представляют собой слоистые тройные карбиды, нитриды или карбонитриды с гексагональной кристаллической структурой с пространственной группой $\text{P63}/\text{mmc}$. В отличие от других объемных трехмерных слоистых материалов таких как графит и дихалькогениды переходных металлов, которые можно легко механически расслаивать из-за слабых ван-дер-ваальсовых связей, удерживающих структуру вместе, связи между слоями в MAX-фазе слишком прочны, чтобы их можно было разрушить аналогичными средствами. Однако используя относительно более слабые связи М-А по сравнению со связями М-Х, можно селективно вытравить слой А химическими или электрохимическими методами, оставив слои М-Х MXene с общей формулой $\text{M}_{n+1}\text{X}_n\text{T}_x$. Полученный MXene всегда имеет различные присоединенные к поверхности химические группы (обозначенные как « T_x »), такие как - О, - ОН, - F, - Н, и т.д. [2]. Как правило, водные растворы, содержащие ионы фтора такие как водная плавиковая кислота (HF), смесь фторида лития (LiF) или фторида калия (KF) с соляной кислотой (HCl) или расплавы солей фтора, используются для селективного травления слоев.

После травления многослойные (ML)-MXenes погружают в диметилсульфоксид, гидроксидтетрабутил аммония, спирты, гидроксид холина или н-бутиламин для дальнейшего расслаивания с помощью обработки ультразвуком или центрифугирования [1-7]. По сравнению с тем, что получается с использованием однослойного графена, слоистые структуры, содержащие более одного элемента, предоставляют большие возможности функционализации для достижения необходимых свойств материала. Вот почему MXene является многообещающим кандидатом для множества приложений, включая устройства накопления энергии, датчики, сенсоры, фотокатализ, электрокатализ, очистку воды, расщепление воды с выделением водорода, восстановление CO_2 , мембранные структуры, прозрачные проводники, защиту от электромагнитных помех, термоэлектричество и плазмонику.

Одним из наиболее широко изученных вариантов применения MXene является их использование в устройствах накопления энергии, в основном из-за их высокой электронной проводимости [8-

14]. Несмотря на то, что существует множество приложений, использующих преимущества его различных превосходных свойств, в оптоэлектронных устройствах MXenes всё еще не применяется. Хотя существуют различные теоретические отчеты о полупроводниковых MXenes, насколько нам известно, экспериментальная работа с этими материалами пока не увенчалась успехом [2; 15]. Необходим прорыв в синтезе светоизлучающих материалов на основе MXene. На сегодняшний день известно лишь несколько работ по фотолюминесцентным свойствам MXenes [16-18]. При этом фотолюминесценция в максенах наблюдалась только на флэйках [18] или квантовых точках Ti_3C_2 , V_2C , Nb_2C [16; 17] – всегда широкополосная, с максимумом на 420 нм. В последнее время ученые стали обращать внимание на более сложные составы MAX-фаз, не из трех, а из четырех [19-22] компонент, которые также проявляют различные яркие свойства, обусловленные комбинацией различных металлов, особенностями встраивания в кристаллическую решетку. В каталитических исследованиях в основном используется гибридный материал, содержащий максен и различные добавки оксидов, диалкогогенидных материалов, сульфида цинка и т.д. Для этого максен расслаивают и производят дальнейшую гибридизацию частиц различными способами [23-25]. Но в части исследований, – например, в применениях, связанных с сохранением окружающей среды, расщеплением воды с выделением водорода, восстановлением CO_2 , расслаивать максены не требуется [26].

Для фотолюминесцентных свойств максенов обычно синтезируют квантовые точки или расслаивают на отдельные флэйки [16-18]. Фотолюминесценция широко используется в технике, так как около 10 % всей вырабатываемой энергии идет на цели освещения, а применение фотолюминофоров, используемых в люминесцентных лампах, позволяет наиболее экономно расходовать эту энергию. В настоящей работе мы изучали фотолюминесцентные свойства $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ и $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ MXenes в виде порошка с латеральными размерами 1-5 мкм.

Материалы и методы

Максены $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ и $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ были приобретены в Advanced 2D Materials Co. Ltd. (Китай). Латеральный размер – 1-5 мкм. Характеристики продукта: высокая чистота и отличные электрохимические характеристики. Функциональная группа: -OH, -F, -O, -Cl (настраиваемая). Чистота: 99 %. Условия хранения: в сухом месте при комнатной температуре. Процесс: обработка HF или обработка $\text{HCl}+\text{LiF}$.

Данные порошковой дифракции для анализа Ритвельда собирали при комнатной температуре с использованием порошкового дифрактометра Bruker D8 ADVANCE (излучение Cu-K α) и линейного детектора VANTEC. Размер шага 2θ составлял $0,016^\circ$, а время счета – 1,5 с на шаг. Уточнение Ритвельда выполняли с помощью TOPAS 4.2 [27]. Расширение кристаллической решетки в зависимости от температуры исследовали с помощью низкотемпературной камеры TTK 600 (Anton Paar).

Структурную морфологию $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ и $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (JEOL, JSM7001F), работающей в режиме визуализации вторичных электронов с использованием эмиттера Шоттки, ускоряющего напряжения 30 кВ и рабочего расстояния ~ 6 мм.

Изображения частиц максенов $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ и $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ были получены с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМ, микроскоп Jeol JEM-2100, Япония) с автоэмиссионной пушкой 200 кВ и точечным разрешением 0,19 нм.

Спектры КР снимались на спектрометре Horiba JY LabRAM HR Evolution, Япония (632,8 нм, 532 нм) с возможностью картографирования образцов – для характеристики двумерных материалов, гетероструктур MXenes в комбинации с двумерными материалами.

Результаты и обсуждение

На рис.1а показано СЭМ изображение частиц $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ со вставкой рентгеновского спектра, на котором видно, что в образцах также содержатся соединения Mo_2C , MoO_2 , Al_2O_3 , TiC. Видно, что латеральный размер частиц максенов соответствует заявленным производителем размерам 1-5 мкм. На

рис.1,б показано ПЭМ изображение максенов $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ с EDX анализом и вставкой высокого разрешения. По EDX-анализу видно, что в максенах присутствует достаточно много таких элементов Al, O и небольшое количество Cr.

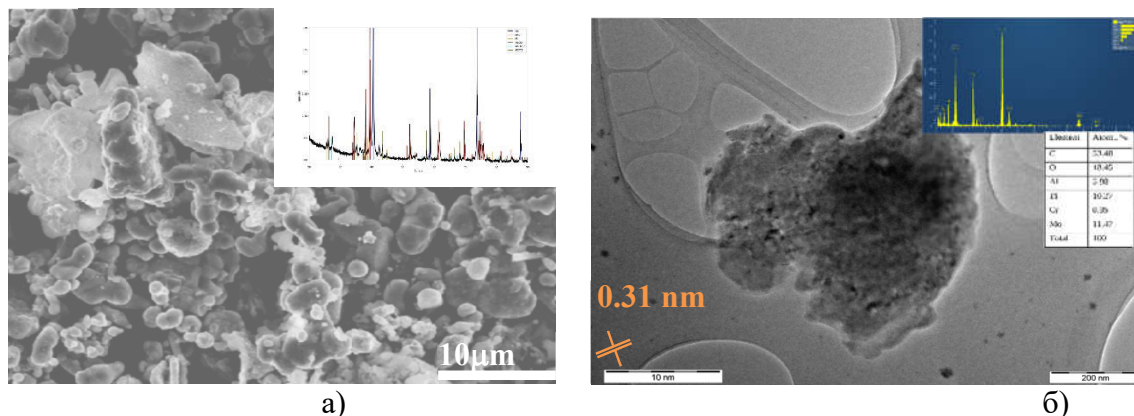


Рис. 1. СЭМ изображение частиц $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_2\text{T}_x$ – а) и ПЭМ изображение частиц $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ – б).

На рис. 2 показаны спектры КРС и фотолюминесценции с различными мощностями возбуждения и длинами волн. Видно, что в максене $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_2\text{T}_x$ даже при малой мощности возбуждения и любой длине волны (633 нм или 532 нм) в области до 1000 см^{-1} присутствуют характерные пики КР, соответствующие максену, а в образце $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ – нет. Но после локального нагрева образца $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ в области до 1000 см^{-1} появляются характерные пики КР, соответствующие максену. На спектрах фотолюминесценции максенов $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_2\text{T}_x$ четко проявляется интенсивный узкополосный пик в области 694 нм даже при малой интенсивности возбуждения, порядка 0,1 % мощности на любой длине волны (532 нм, 633 нм), а в образце $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ нет. Но после локального нагрева максена $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ порядка 25-50 % мощности возбуждающего излучения также наблюдается мощный узкополосный пик в области 694 нм, в $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_2\text{T}_x$ после нагрева люминесценция многократно усиливается. При этом полуширина интенсивного пика меньше 1 нм.

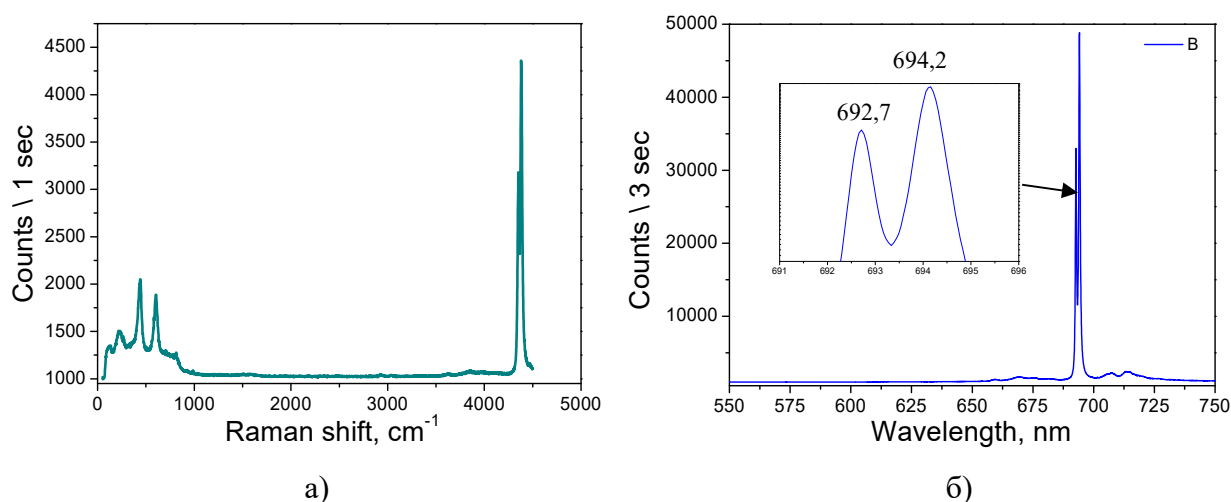


Рис. 2. Комбинационное рассеяние света и фотолюминесценция в максенах $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_2\text{T}_x$ – а) и $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ – б).

Известно, что длина волны излучения 694 нм соответствует длине волны излучения рубинового лазера. Также известно, что для узкополосной люминесценции в области 694 нм используются наночастицы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ порядка 6 нм с низким содержанием Cr (0,2вес. %) [28]. По результатам EDX анализа видно, что в процессе вытравливания из МАХ-фазы остается достаточно много алюминия (рис.1,б). И так как порошок находится на воздухе, то происходит его естественное окисление. Как показано на

рис. 1а, в максенах присутствует некоторое количество фазы Al_2O_3 . В низких концентрациях допустимо наличие различных примесей – таких как Cr. Поэтому мы связываем мощную узкополосную фотолюминесценцию в максенах $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ и $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ именно с наличием $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$ [28]. Пик интенсивности узкополосной люминесценции совпадает для макенов и для $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$. Усиление фотолюминесценции в $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ и появление в $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ после локального нагрева может обуславливаться локальным окислением Al и появлением соединения $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Cr}$. Для подтверждения данного предположения был проведен термогравиметрический анализ. Данные ТГА подтверждают предположение об окислении алюминия.

Были проведены температурные исследования фотолюминесценции. При нагреве образцов фотолюминесценция изменяется (рис.3). Пик интенсивности излучения фотолюминесценции смещается в красную сторону на 0,4 нм и уменьшается на 40 % при нагревании образца на 60 °С. Необходимо отметить, что все изменения фотолюминесценции обратимы.

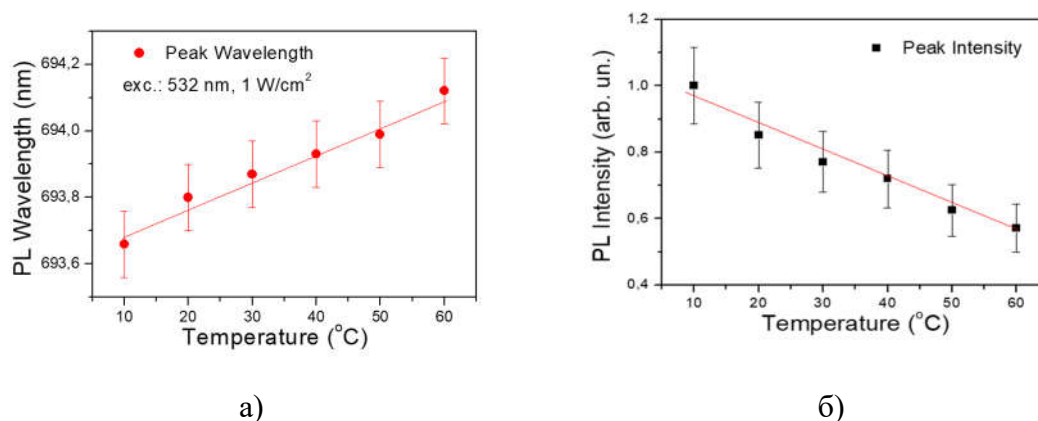


Рис. 3. Влияние температуры на фотолюминесценцию в максенах $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$. Смещение максимума интенсивности по длине волны – а); изменение величины пика интенсивности – б).

Заключение

Поиск и разработка новых фотолюминесцентных материалов – актуальная задача современного материаловедения в связи с возможностью наиболее экономно расходовать энергию. Проведенное исследование фотолюминесцентных свойств максенов $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ и $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ позволило определить условия возбуждения мощной узкополосной фотолюминесценции. Установлено, что максены содержат различные соединения оксидов и карбидов, а также остаточное количество Al, которое в силу технологии невозможно полностью вытравить. Экспериментальные данные по характеристике максенов подтверждают латеральные размеры максенов 1-5 мкм. Наличие узкополосной фотолюминесценции и влияние температуры в максенах $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ и $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ позволяет расширить знания об оптических свойствах таких новых 2D-материалов и способствует развитию оптоэлектронных устройств на их основе. Максены являются сравнительно дешевым материалом и при этом многообещающим в различных применениях материалом, так как обладают широким кругом ярких физических свойств в силу своей уникальности сочетать хорошую электрическую проводимость и свойства керамики.

Работа выполнена в рамках гранта РФФ № 22-19-00094. ПЭМ и СЭМ анализ выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования (МФТИ).

1. Naguib M., Kurtoglu M., Presser V., Lu J., Niu JJ et al. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2 // Adv.Mater. – 2011. – V.23. – P.4248–4253.
2. Hantanasirisakul K., Gogotsi Y. Electronic and optical properties of 2D transition metal carbides and nitrides (MXenes) // Adv.Mater. – 2018. – V.30. – P.1804779.

3. Naguib M., Mochalin V.N., Barsoum M.W., Gogotsi Y. 25th anniversary article: MXenes: a new family of two-dimensional materials // *Adv. Mater.* – 2014. – V.26. – P.992–1005.
4. Urbankowski P., Anasori B., Makaryan T., Er D.Q., Kota S. et al. Synthesis of two-dimensional titanium nitride Ti_4N_3 (MXene) // *Nanoscale.* – 2016. – V.8. – P.11385–11391.
5. Zhang T., Pan L.M., Tang H., Du F., Guo Y.H. et al. Synthesis of two-dimensional $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ MXene using $\text{HCl}+\text{LiF}$ etchant: enhanced exfoliation and delamination // *J. Alloys Compd.* – 2017. – V.695. – P.818–826.
6. Soundiraraju B., George B.K. Two-dimensional titanium nitride (Ti_2N) MXene: SYNTHESIS, characterization, and potential application as surface-enhanced raman scattering substrate // *ACS Nano.* – 2017. – V.11. – P.8892–8900.
7. Naguib M., Unocic R.R., Armstrong B.L., Nanda J. Large-scale delamination of multi-layers transition metal carbides and carbonitrides «MXenes» // *Dalton Trans.* – 2015. – V.44. – P.9353–9358.
8. Shahzad F., Alhabeab M., Hatter C.B., Anasori B., Hong S.M. et al. Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes) // *Science.* – 2016. – V.353. – P.1137–1140.
9. Dong Y.F., Wu Z.S., Zheng S.H., Wang X.H., Qin J.Q. et al. Ti_3C_2 MXene-derived sodium/potassium titanate-nanoribbons for high-performance sodium/potassium ion batteries with enhanced capacities // *ACS Nano.* – 2017. – V.11. – P.4792–4800.
10. Yang Q.J., GAO W., Zhong W., Tao M.L., Qi Y.R. et al. A synergistic $\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{MXene}$ composite with enhanced performance as an anode material of sodium-ion batteries // *New J. Chem.* – 2020. – V.44. – P.3072–3077.
11. Li R.Y., Zhang L.B., Shi L., Wang P. MXene Ti_3C_2 : an effective 2D light-to-heat conversion material // *ACS Nano.* – 2017. – V.11. – P.3752–3759.
12. Chaudhuri K., Alhabeab M., Wang Z.X., Shalaev V.M., Gogotsi Y. et al. Highly broadband absorber using plasmonic titanium carbide (MXene) // *ACS Photonics.* – 2018. – V.5. – P.1115–1122.
13. Ying G.B., Dillon A.D., Fafarman A.T., Barsoum M.W. Transparent, conductive solution processed spincoated 2D Ti_2CTx (MXene) films // *Mater. Res. Lett.* – 2017. – V.5. – P.391–398.
14. An H., Habib T., Shah S., Gao H.L., Radovic M. et al. Surface-agnostic highly stretchable and bendable conductive MXenemultilayers // *Sci. Adv.* – 2018. – V.4. – PP.eaaq0118.
15. Jiang X.T., Kuklin A.V., Baev A., Ge Y.Q., Ågren H et al. Two-dimensional MXenes: from morphological to optical, electric, and magnetic properties and applications // *Phys.Rep.* – 2020. – V.848. – P.1–58.
16. Sharbirin A.S., Akhtar S., Kim J.Y. Light-emitting MXene quantum dots // *Opto-Electron.Adv.* – 2021. – V.4. – P.200077.
17. Luxi Zhang, Weitao Su, HaiboShu, Ting Lü, Li Fu, Kaixin Song, Xiwei Huang, Jinhong Yu, Cheng-Te Lin, Yiping Tang, Tuning the photoluminescence of large $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ MXene flakes // *Ceramics International.* – 2019. - V.45. – Iss.9. – P.11468-11474.
18. Siyu Lu, Laizhi Sui, Yuan Liu, Xue Yong, Guanjun Xiao, Kaijun Yuan, Zhongyi Liu, Baozhong Liu, Bo Zou, and Bai Yang. White Photoluminescent Ti_3C_2 MXene Quantum Dots with Two-Photon Fluorescence // *Adv. Sci.* – 2019. – V.6. – P.1801470.
19. DayakarGandla, Fuming Zhang, and Daniel Q. Tan Advantage of Larger Interlayer Spacing of a $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3$ MXene Free-Standing Film Electrode toward an Excellent Performance Supercapacitor in a Binary Ionic Liquid–Organic Electrolyte // *ACS Omega.* – 2022. – V.7. – Iss.8. – P.7190-7198.
20. Li G.; Zhou B.; Wang P.; He M.; Fang Z.; Yuan X.; Wang W.; Sun X.; Li Z. High-Efficiency Oxygen Reduction to Hydrogen Peroxide Catalyzed by Oxidized Mo_2TiC_2 MXene // *Catalysts.* – 2022. – V.12. – P.850.
21. Jesus Gonzalez-Julian, Processing of MAX phases: From synthesis to applications // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2021. – V.104. – PP.659–690.
22. Maxwell T. P. Rigby, VarunNatu, Maxim Sokol, Daniel J. Kelly, David G. Hopkinson, YichaoZou, James R. T. Bird, Lee J. Evitts, Matt Smith, Christopher P. Race, Philipp Frankel, Sarah J. Haigh and Michel W. Barsoum. Synthesis of new M-layer solid-solution 312 MAX phases $(\text{Ta}_x\text{Ti}_{1-x})_3\text{AlC}_2$ ($x = 0.4, 0.62, 0.75, 0.91$ or 0.95), and their corresponding MXenes // *RSC Adv.* – 2021. – V.11. – P.3110.
23. AreenSherryna and Muhammad Tahir Role of Ti_3C_2 MXene as Prominent Schottky Barriers in Driving Hydrogen Production through Photoinduced Water Splitting: A Comprehensive Review // *ACS Appl. Energy Mater.* – 2021. – V.4. – Iss.11. – P.11982-12006.

24. Chao Peng, Tao Zhou, Ping Wei, Wenkang Xu, Hui Pan, Feng Peng, Jianbo Jia, Kun Zhang, and Hao Yu. Photocatalysis over MXene-based hybrids: Synthesis, surface chemistry, and interfacial charge kinetics // APL Mater. – 2021. – V.9. – P.070703.
25. Xing Li, Yang Bai, Xian Shi, Na Su, Gongzhe Nie, Rumeng Zhang, Hongbo Nie and Liquan Ye. Applications of MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$) in photocatalysis: a review // Mater. Adv. – 2021. – V.2. – P.15701594.
26. Yubing Sun, Ying Li. Potential environmental applications of MXenes: A critical review // Chemosphere. – 2021. – V.271. – P.129578.
27. Finkel P.; Seaman B.; Harrell K.; Palma J.; Hettinger J.D. Lofland S.E.; Ganguly A.; Barsoum M.W.; Sun Z.; Li S; Ahuja R. Electronic, thermal, and elastic properties of $\text{Ti}_3\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{C}_2$ solid solutions // Phys. Rev. B. – 2004. – P.70085104.
28. Anton Kostyukov, Mark Baronskiy, Alexander Rastorguev, Valeriy Snytnikov, Vladimir Snytnikov, Aleksey Zhu-zhgov and Arcady Ishchenko, Photoluminescence of Cr^{3+} in nanostructured Al_2O_3 synthesized by evaporation using a continuous wave CO_2 laser // RSC Adv. – 2016. – V.6. – PP.2072–2078.

УДК 535.34

СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ СИСТЕМЫ ПОЛИВИНИЛОВЫЙ СПИРТ-НИТРАТ КАДМИЯ В ОБЛАСТИ ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА

Л.А. Трофимова

*Дальневосточный государственный медицинский университет (г. Хабаровск)
lianatrofimova@yandex.ru*

Представлены результаты исследования системы поливиниловый спирт-нитрат кадмия методом электронной спектроскопии в диапазоне 160-220 нм.

ABSORPTION SPECTRA OF THE POLY (VINYL ALCOHOL)-CADMIUM NITRATE SISTEM IN THE VACUUM ULTRAVIOLET

L.A. Trofimova

*Far Eastern State Medical University (Khabarovsk)
lianatrofimova@yandex.ru*

The results of study of the poly(vinyl alcohol)-cadmium nitrate system by electronic spectroscopy in the 160-220 nm range are presented.

DOI:10.22250/9785934934195_103

Тетрагидрат кадмия $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ представляет собой бесцветные кристаллы с ромбической решеткой. При нагревании выше температуры плавления он обезвоживается сначала до дигидрата, затем до безводного состояния. Как и все соли кадмия, токсичен [1]. Однако применяется в современной науке и технике. Например, с его помощью можно получать координированные органические соединения, используемые в качестве люминесцентных материалов [2]. Известно и о получении наночастиц сульфида кадмия CdS в процессе реакции обмена $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ и H_2S или N_2S в растворе поливинилового спирта [3].

Поливиниловый спирт (ПВС) – полимер, который способен образовывать прозрачные эластичные пленки. Поэтому часто ему отводится роль матрицы, – например, при создании нанокompозитных структур [4], ионопроводящих гибридных мембран [5] и др.

Предметом изучения в настоящей работе служили электронные спектры поглощения (ЭСП) системы поливиниловый спирт-нитрат кадмия в диапазоне длин волн 160 – 220 нм.

Объектами исследования были пленки ПВС- $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, полученные из полимерно-солевых композиций на основе 1 %-ного водного раствора поливинилового спирта марки 16/1. Соль кадмия добавлялась в количестве 40 мг на 10 мл раствора. Толщина образцов определялась интерференционным методом и составляла ~ 2 мкм.

Электронные спектры поглощения образцов были измерены на установке для абсорбционных исследований, позволяющей осуществлять их в области дальнего (вакуумного) ультрафиолета. Проточная водородная лампа открытого типа являлась источником излучения. Фотоэлектронный умножитель ФЭУ-106 использовался в качестве приемника излучения. Образцами сравнения служили пленки ПВС той же толщины без добавки соли.

Полученный спектр представляет собой кривую, которую можно разделить на четыре области: 160 – 169 нм, 169 – 174 нм, 174 – 199 нм и 199 – 220 нм. Максимум первой приходится на 164 нм. Однако ее форма указывает на сложный состав. Вторая область – малоинтенсивная, с $\lambda_{\text{max}} = 172$ нм. Третья – широкая, несимметричная, неэлементарная. Наибольшая оптическая плотность в спектре соответствует длине волны 191 нм. У четвертой области максимум не выражен, верхняя ее часть представляет «плато», середина которого приходится на 208 нм. Она также является интегральной нескольких полос поглощения.

Ультрафиолетовое облучение (УФО) пленок ПВС- $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ полным спектром излучения проточной водородной лампы в течение 20 минут привело к изменениям в исследуемых образцах, что отразилось на их поглощении. В спектре наблюдается гипсохромный сдвиг (на 3 нм) максимума наиболее коротковолновой области; увеличение оптической плотности, соответствующей длине волны 172 нм; появление полосы с максимумом 176 нм; общее уменьшение оптической плотности в диапазоне 183 – 220 нм.

Разностные графики ЭСП системы после и до воздействия вакуумного ультрафиолета позволили узнать о существовании полос с максимумами 182 нм, 185 нм и 194 нм. По всей видимости, их «скрывала» мощная полоса с $\lambda_{\text{max}} = 191$ нм. Произошло увеличение центров, ответственных за поглощение в полосе с $\lambda_{\text{max}} = 182$ нм и непропорциональное уменьшение поглощающих центров, ответственных за остальные три. Данная ситуация позволила проявиться ранее невидимым полосам.

Благодаря разностным кривым выяснилось, что четвертая область поглощения (199 – 220 нм) состоит из полос с максимумами 205 нм и 211 нм. Изначально они имели одинаковую интенсивность. УФО вызвало большее, чем во второй, уменьшение оптической плотности в первой полосе.

Прогрев облученных пленок ПВС- $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ при температуре 90 °С в течение 20 минут привел к общему увеличению оптической плотности в диапазоне 166 – 215 нм. Анализ разностной кривой поглощения системы после и до термопроявления позволил сделать вывод о росте полос с максимумами 172 нм, 178 нм (по-видимому, она является интегральной полос с $\lambda_{\text{max}} = 176$ нм и $\lambda_{\text{max}} = 182$ нм) и уменьшении поглощения в области длин волн короче 166 нм. Тепловое воздействие не повлияло на центры, ответственные за поглощение в полосе 185 нм, и вызвало очень незначительный рост оптической плотности, соответствующей $\lambda_{\text{max}} = 191$ нм и $\lambda_{\text{max}} = 211$ нм. Прогрев способствовал нивелированию воздействия УФО в полосах 194 нм и 205 нм.

Ионы Cd^{2+} способны образовывать комплексы с полимерами. Но комплексы с полимерами, имеющими в своем составе гидроксильные функциональные группы (к которым относится поливини-

ловый спирт), обладают наименьшей устойчивостью. В [6] указывается, что ионы Cd^{2+} с цепями ПВС энергетически связаны слабо. В растворах они лишь способны мигрировать вдоль цепи под влиянием теплового движения. Авторы работы [7] получали гибридные материалы: поливиниловый спирт – гидроксиды/оксиды Be, Mg, Zn, Cd, B, Al, Cr и Fe. Проведя анализ результатов рентгенофазового и синхротронного термического анализа данных соединений, они указывают на образование интерполимерных комплексов в системах с гидроксидами/оксидами цинка, бора, алюминия, хрома и железа. Соединения кадмия в данную группу не вошли. Те же авторы уже в работе [8] пишут об отсутствии координационной связи между ПВС и CdS. Основываясь на данных фактах, можно предположить, что в исследуемой системе нет комплексов ионов кадмия, где в качестве лигандов выступают макромолекулы полимера. Нитрат-анион также не образует комплексов с полимерами [6].

В работе [9] приводится положение полос поглощения нитрат (NO_3^-)- и нитрит-ионов (NO_2^-) и указывается, что оно не зависит от катиона, стабильно в водных растворах и кристаллах. Зная это, можно предположить, что полоса поглощения с $\lambda_{\text{max } 1} = 205$ нм принадлежит NO_3^- , а с $\lambda_{\text{max } 2} = 211$ нм – соответственно NO_2^- .

За область поглощения с максимумом 191 нм, по всей видимости, ответственны октаэдрические комплексы кадмия, где в роли лигандов выступают нитрат-ионы и молекулы воды. Замена в координационной сфере лиганда слабого поля на лиганд сильного поля приводит к увеличению энергии соответствующего перехода с переносом заряда и, соответственно, гипсохромному смещению центра тяжести всей области поглощения за счет роста коротковолновых полос и уменьшения оптической плотности в длинноволновых. Такая ситуация наблюдается после УФО изучаемых образцов. Участок спектрохимического ряда: $\text{NO}_3^- < \text{H}_2\text{O} < \text{NO}_2^-$ [10]. Не исключается и возможность наличия в образцах тетраэдрических комплексов кадмия.

Поведение полосы с $\lambda_{\text{max}} = 164$ нм позволяет предположить, что это полоса H_2O . Авторы [11] считают, что слабое поглощение воды в коротковолновой области обусловлено ее собственным поглощением за счет электронного перехода $n \rightarrow \sigma^*$.

Недостаток литературных данных и противоречивость имеющихся, к сожалению, не позволяют дать более строгое объяснение наблюдаемым явлениям.

Проведенные исследования показали, что пленки системы ПВС- $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ светочувствительны и отзывчивы к тепловому воздействию. Их поведение, вызывающее изменения в ЭСП, указывает на наличие поглощающих центров нескольких видов.

1. Илларионова Е.А. Химико-токсикологический анализ тяжелых металлов: учебное пособие / Е.А. Илларионова, И.П. Сыроватский, А.Э. Митина. – Иркутск: ИГМУ, 2022. – 63 с.

2. Кокунов Ю.В., Ковалев В.В., Кискин М.А., Разгоняева Г.А., Еременко, И. Л. Образование нового необычного полимерного соединения кадмия с мостиковыми тиоцианат-ионами // Координационная химия. – 2019. – Т. 45, № 12. – С. 707-712.

3. Химические методы синтеза неорганических веществ и материалов. – Ч 2 / под ред. А.Р. Кауля. – М.: МГУ, 2008. – 211 с.

4. Васин С.В., Низаметдинов А.М., Сергеев В.А., Ефимов М.С. Структура и электропроводность пленок поливинилового спирта с многостенными углеродными нанотрубками, отвержденных в магнитном поле // РЭНСИТ: «Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии». – 2021. – Т. 13, № 4. – С. 457-464.

5. Лёзова О.С., Загребельный О.А., Шилова О.А., Иванова А.Г. Разработка ионопроводящих гибридных мембран на основе сшитого поливинилового спирта с использованием латинского квадрата // Физика и химия стекла. – 2021. – Т. 47, № 1. – С. 78-85.

6. Сафронов А.П., Габдрафикова Ю.М., Ухалин О.Л., Остроушко А.А. Энтальпия комплексообразования поливинилового спирта, полиэтиленгликоля и поливинилпирролидона с ионами меди и кадмия в водном растворе // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2004. – Т. 46, № 5. – С. 867-874.
7. Просанов И.Ю., Булина Н.В., Герасимов, К.Б. Комплексы поливинилового спирта с нерастворимыми неорганическими соединениями // ФТТ. – 2013. – Т. 55. – Вып. 10. – С. 2016-2019.
8. Просанов И.Ю., Булина Н.В. Полимерные сульфиды CdS, CuS и NiS в матрице поливинилового спирта // ФТТ. – 2014. – Т. 56. – Вып. 10. – С. 1221-1223.
9. Алукер Н.Л., Негтман М.Е., Суздальцева, Я.М. Спектрофотометрическое исследование солей нитратов и нитритов и их водных растворов // Оптика и спектроскопия. – 2019. – Т. 127. – Вып. 6. – С. 906-911.
10. Неудачина Л.К. Химия координационных соединений: учебное пособие / Л.К. Неудачина, Н.В. Лаккиза. – М.: Юрайт, 2018. – 123 с.
11. Клубин В.В., Клубина К.А., Маковецкая, К.Н. Зависимость электронных спектров поглощения водных растворов йода от концентрации // Журнал физической химии. – 2017. – Т. 91. – Вып. 6. – С. 973-978.

УДК 538.913

НЕСОРАЗМЕРНАЯ ФАЗА В ЦИРКОНАТЕ-ТИТАНАТЕ СВИНЦА

А.В. Филимонов^{1,2}, С.Б. Вахрушев^{1,2}, Г.А. Политова^{1,3}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург)

³Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН (Москва)

filalex@inbox.ru

Для понимания формируемой в твердых растворах антисегнетоэлектрик / сегнетоэлектрик несообразной фазы, расхождения данных критического рассеяния в парафазе и возникающей сверхструктуры в сегнетоэлектрической фазе, а также возможном межмодовом взаимодействии в окрестности M-точки проведено детальное исследование фоновых спектров в модельных объектах.

INCOMPORABLE PHASE IN LEAD ZIRCONATE-TITANATE

A.V. Filimonov^{1,2}, S.B. Vakhrushev^{1,2}, G.A. Politova^{1,3}

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg)

²Ioffe Institute (St. Petersburg)

³Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS (Moscow)

filalex@inbox.ru

To understand the antiferroelectric/ferroelectric incommensurate phase formed in solid solutions, the discrepancy between the critical scattering data in the paraphase and the emerging superstructure in the ferroelectric phase, and also the possible intermode interaction in the vicinity of the M-point, a detailed study of the phonon spectra in model objects was carried out.

DOI:10.22250/9785934934195_106

Введение

Антисегнетоэлектрики и их твердые растворы известны почти 70 лет. Долгое время основное внимание привлекали твердые растворы типа $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ (ЦТС) в области так называемых морфо-

тропных составов (примерно 50 % цирконата и 50 % титаната свинца), демонстрирующих в районе комнатной температуры сегнетоэлектрические свойства и высокие значения пьезоэлектрических коэффициентов. Сегодня большой интерес стали вызывать соединения, являющиеся антисегнетоэлектриками, при комнатной температуре. Причина – широкие перспективы практического применения подобных материалов в качестве:

материалов для быстрых систем хранения электрической энергии конденсаторного типа. При двойной петле гистерезиса потери энергии при деполяризации оказываются очень малыми, поэтому такие устройства оказываются очень эффективными;

подобные системы оказываются весьма перспективными для создания электрокалорических устройств;

систем хранения информации на нанодоменах, в первую очередь на доменных стенках.

Основой всех этих применений является крайне высокая «податливость» указанных материалов относительно внешних воздействий, обусловленная сложной мезоскопической структурой материалов.

Возможные варианты модуляции решетки

Если посмотреть на уточненную фазовую диаграмму ЦТС (рис. 1), можно увидеть, что в соединениях ЦТС присутствует широчайшая область существования несоразмерной фазы (ICM), которая раньше интерпретировалась просто как сегнетоэлектрическая (СЭ).

При исследовании атомной динамики методом рассеяния синхротронного излучения (СИ) в ICM фазе наблюдается сложная картина. С одной стороны, наблюдается неустойчивость в районе центра зоны Бриллюэна, что и определяет сегнетоэлектрические свойства. С другой стороны, отличается большой набор сателлитов отражений. Эти сателлитные отражения говорят о том, что формируются структуры на нанометровых масштабах. Дальше, в орторомбической фазе (антисегнетоэлектрическая), наблюдается существование различных параметров порядка. Мы видим разные сверхструктуры, и это приводит к возможности возникновения модулированных структур.

В твердых растворах ЦТС нами была обнаружена модуляция решетки двух типов: 1 – модуляция с волновыми векторами q вблизи $q_{\Sigma} = (0.25\ 0.25\ 0)$; 2 – модуляция М-типа с волновыми векторами q вблизи $q_{\Sigma} = (0.5\ 0.5\ 0)$.

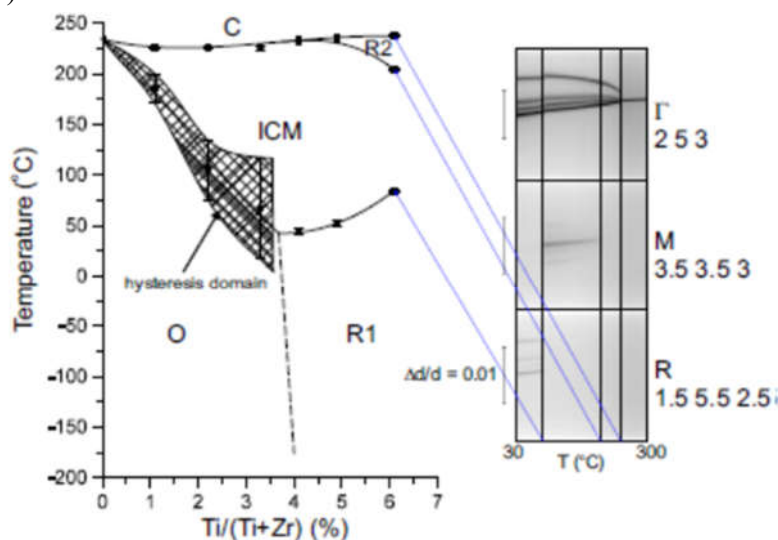


Рис. 1. Уточненная фазовая диаграмма ЦТС.

Рассмотрим сначала модуляцию 1-го типа.

В чистом цирконате свинца (ЦС) при нормальных условиях наблюдалось «схлопывание» к соразмерному значению q_{Σ} , обусловленное «Umklapp» – взаимодействием [1]. В то же время приложение

гидростатического давления приводит к сосуществованию соразмерной и несоизмерной модуляций [2]. Переход в АСЭ фазу в ЦТС происходит через промежуточную СЭ фазу (в чистом ЦС эта фаза существует в очень узкой температурной области шириной порядка 2 К). Кристалл при этом разбивается на субмикронные нанодомены, которые при переключении не меняют размер [3]. В неполярной АСЭ фазе 180° домены существовать не могут, однако может возникать сбой в волне ионных смещений, приводящий к формированию полярных антифазных доменных границ (АДГ). Эти границы имеют размер порядка 2 нм, рассматриваются как перспективная основа для создания сегнетопамяти сверхвысокой плотности. Нам удалось продемонстрировать, что охлаждение кристалла в слабых (относительно поля индуцированного перехода в СЭ фазу) полях позволяет получить регулярную систему АДГ [4].

Модуляция 2-го типа. В промежуточной СЭ фазе наблюдаются сверхструктурные отражения типа $(h+1/2, k+1/2, 0)$, что указывает на сосуществование сегнетоэлектрического и антиферродисторсионного параметров порядка. При этом, наряду с М-сверхструктурой, возникает набор сателлитных отражений вокруг М-точки.

Проведенный нами анализ картины рассеяния указал на формирование собственной несоизмерной структуры. Что касается самого антисегнетоэлектричества, то здесь есть флексоэлектрическое взаимодействие между поперечной оптической модой и акустической модой, что может приводить к формированию любых модулированных несоизмерных структур. В результате можно описать возникновение антисегнетоэлектричества как результат решеточной неустойчивости за счет возникновения флексоэлектрического взаимодействия.

Заключение

Были проведены комплексные исследования ряда твердых растворов антисегнетоэлектрик/сегнетоэлектрик и релаксор/антисегнетоэлектрик. Показано, что во всех исследованных соединениях возникают наноструктурные состояния различного типа. Впервые методом рассеяния СИ выявлено влияние электрического поля на антифазные доменные границы в АСЭ фазе. Для ряда твердых растворов ЦТС продемонстрировано, что промежуточная фаза является смешанной и может быть охарактеризована как несобственная ферриэлектрическая фаза.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2023-0016).

1. Tagantsev A.K., Vaideeswaran K., Vakhrushev S.B., Filimonov A.V., Burkovsky R.G., Shaganov A., Andronikova D., Rudskoy A.I., Baron A.Q.R., Uchiyama H., Chernyshov D., Bosak A., Ujma Z., Roleder K., Majchrowski A., Ko J.-H., Setter N. The origin of antiferroelectricity in PbZrO_3 // Nature Communications. – 2013. – 4. Article number: 2229.

2. Burkovsky R.G., Bronwald Yu., Andronikova D., Wehinger B., Krisch M., Jacobs J., Gambetti D., Roleder K., Majchrowski A., Filimonov A.V., Rudskoy A.I., Vakhrushev S.B., Tagantsev A.K. Critical scattering and incommensurate phase transition in antiferroelectric PbZrO_3 under pressure // Scientific Reports. – 2017. – 7, Article number: 41512.

3. Andreeva N.V., Pertsev N.A., Andronikova D.A., Filimonov A.V., Leontiev N.G., Leontyev I.N., and Vakhrushev S.B. Domain structures and correlated out-of-plane and in-plane polarization reorientations in $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.96}\text{Ti}_{0.04})\text{O}_3$ single crystal via piezoresponse force microscopy // AIP ADVANCES 6. – 2016. – 095211.

4. Vakhrushev S.B., Andronikova D., Bronwald Iu., Koroleva E.Yu., Chernyshov D., Filimonov A.V., Udovenko S.A., Rudskoy A.I., Ishikawa D., Baron A.Q.R., Bosak A., Leontiev I.N., Tagantsev A.K. Electric field control of antiferroelectric domain pattern // Physical Review B. – 2021. – 103. – 214108.

ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ Mg_2Si НА КРЕМНИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕЕ МЕТОДОМ ИК-ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ

Д.А. Шеметов¹, А.В. Поляков¹, Н.С. Новгородцев¹, К.Н. Галкин², Н.Г. Галкин², Д.В. Фомин¹

¹Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

²Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН (г. Владивосток)

daniil.shemet.2002@mail.ru

В статье представлены результаты исследования тонкой пленки Mg_2Si на Si (111) методами электронной оже-спектроскопии (ЭОС), спектроскопии характеристических потерь энергии электронами (СХПЭЭ), ИК-Фурье-спектроскопии и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Образец был сформирован при трехкратном поочередном осаждении слоев Mg и Si методом реактивной эпитаксии (РЭ). Эксперимент проводился при температуре подложки 240 °С. В результате исследования методом ЭОС определено наличие атомов Mg (1186 эВ) и Si (92 эВ) в соответствующих слоях пленки. На спектрах ХПЭЭ установлено присутствие пика потерь (объемного плазмона) с максимумом при энергии от 13,6 до 13,8 эВ, что свидетельствует о силицидообразовании в пленке. Наличие Mg_2Si в составе сформированной пленки доказано присутствием пика при 272 см⁻¹ в ИК-Фурье-спектрах. Методом АСМ показано, что для образца механизм роста пленки является островковым. При этом островки в дальнейшем коалесцируют в зерна, средняя площадь которых около 4 мкм². Морфология поверхности полученной пленки характеризуется наличием проколов (пустот) со средней площадью до 0,7 мкм².

FORMATION OF A THIN Mg_2Si FILM ON SILICON AND ITS INVESTIGATION BY THE METHOD OF IR-FOURIER SPECTROSCOPY

D.A. Shemetov¹, A.V. Polyakov¹, N.S. Novgorodtsev¹, K.N. Galkin², N.G. Galkin², D.V. Fomin¹

¹Amur State University (Blagoveshchensk)

²Institute of Automation and Control Processes FEB RAS (Vladivostok)

daniil.shemet.2002@mail.ru

Article presents the results of the study of the Mg_2Si thin film on Si (111) by methods of electron Auger spectroscopy (EOS), spectroscopy of characteristic energy losses by electrons (SHPEE), IR-Fourier spectroscopy and atomic force microscopy (AFM). The sample was formed by three-fold alternate deposition of Mg and Si layers by reactive epitaxy (RE). The experiment was carried out at a substrate temperature of 240 °C. As a result of the EOS study, the presence of Mg (1186 eV) and Si (92 eV) atoms in the corresponding layers of the film was determined. The presence of a loss peak (volumetric plasmon) with a maximum at an energy from 13,6 to 13,8 eV was found on the CPE spectra, which indicates silicification in the film. The presence of Mg_2Si in the composition of the formed film is proved by the presence of the phonon peak at 272 cm⁻¹ in the IR-Fourier spectra. The AFM method shows that the film growth mechanism is insular for the sample. At the same time, the islands subsequently coalesce into grains, the average area of which is about 4 μm². The surface morphology of the resulting film is characterized by the presence of punctures (voids) with an average area of up to 0,7 μm².

DOI:10.22250/9785934934195_109

На сегодняшний день хорошо исследован теоретически и экспериментально Mg_2Si в объемном состоянии, однако Mg_2Si в низкоразмерном состоянии вызывает особенный интерес. Он обладает следующими оптическими и электронными свойствами: высоким коэффициентом поглощения падающего света (максимальное значение – 96 %), широким диапазоном фоточувствительности (от 200 до

2100 нм), малой шириной запрещенной зоны (от 0,6 до 0,8 эВ) и большой величиной подвижности носителей заряда (от 400 до 550 см²/(В·с) – для электронов, от 65 до 70 см²/(В·с) – для дырок) [1 - 3]. Благодаря своим свойствам тонкопленочный Mg₂Si перспективен для датчиков, широко используемых в оптоэлектронике. Стоит отметить, что магний и кремний являются легкодоступными элементами. В связи вышесказанным формирование тонкой пленки Mg₂Si и ее исследование актуальны для изучения новых свойств, которые будут проявляться у низкоразмерного силицида магния в отличие от объемного.

На базе сверхвысоковакуумной (СВВ) камеры Varian с $P_{\text{баз.}} = 10^{-7}$ Па методом РЭ было проведено формирование тонкой пленки Mg₂Si. Из промышленных шайб КЭФ-Si (111) с удельным сопротивлением 2 – 15 Ом·см были изготовлены подложки для образца. С помощью ультразвуковой ванночки и изопропилового спирта выполнялась очистка кремниевой подложки и источников, а после загрузки в СВВ-камеру проводилась очистка кремниевых образцов термическим способом [4].

Образец выращивали методом РЭ при температуре подложки 240 °С. Сначала на подложке был сформирован буферный слой Si толщиной 60 нм, затем проведено трехкратное поочередное осаждение слоев Mg и Si толщами 30 и 10 нм соответственно. В результате выполненных ростовых экспериментов был сформирован образец, содержащий пленку толщиной 120 нм. С помощью двухпролетного оже-анализатора PHI-model 15-255g, установленного в СВВ-камере Varian, осуществлялся контроль этапов формирования пленки методами ЭОС и СХПЭЭ. Полученные спектры энергий оже-электронов и спектры ХПЭЭ представлены на рис. 1а и 1б соответственно.

Анализ спектра (рис. 1а), соответствующего буферному слою Si (на графике нижний слой), показал, интенсивный пик с энергией 92 эВ, по атласу спектров оже-электронов принадлежащий Si [5]. На графиках, принадлежащих 1, 3 и 5 слоям (Mg толщиной 30 нм), отчетливо видны обратные рефлексии с энергиями 92 и 1186 эВ, которые указывают на присутствие атомов Si и Mg, также по атласу оже-спектров. На кривых, соответствующих 2, 4 и 6 слоям (Si толщиной 10 нм), наблюдается обратный пик с энергией 92 эВ, принадлежащий Si. Также на некоторых спектрах наблюдается оже-пики малой амплитуды по сравнению с рефлексиями Mg с энергиями 272 эВ (C) и 503 эВ (O₂), по уже упоминавшемуся атласу оже-спектров, являющимися примесями в этом эксперименте.

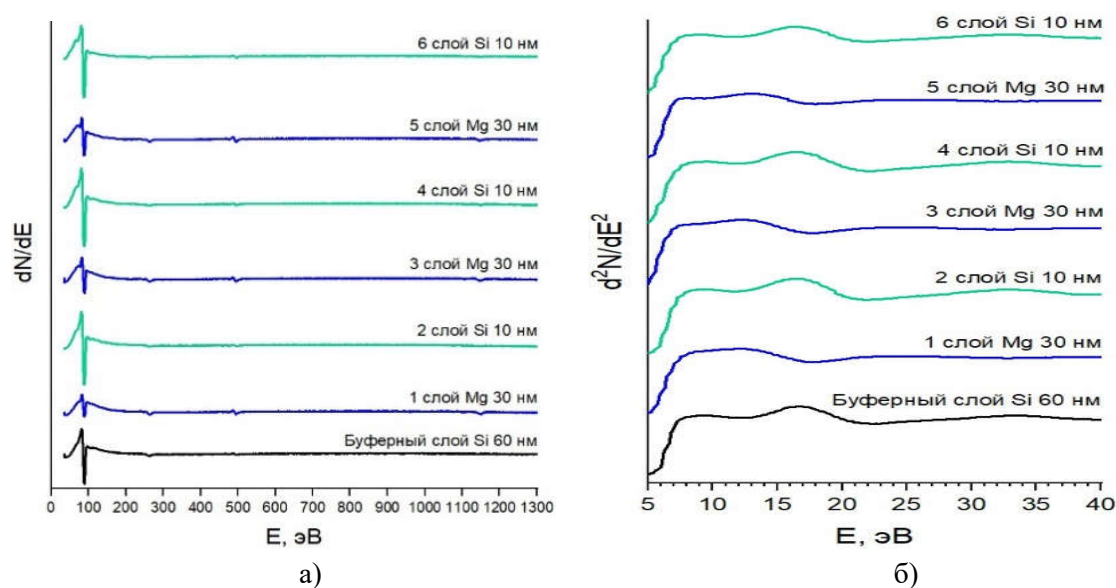


Рис. 1. Спектры энергии оже-электронов (а), спектры ХПЭЭ образца (б).

Анализ нижнего спектра ХПЭЭ (рис. 1б), соответствующего буферному слою Si, по данным ЭОС, показал, что на нем заметны интенсивные пики потерь с энергиями 9,5 эВ и 17,5 эВ, по справочным данным здесь и далее [6; 7] указывающие на возбуждение поверхностного и объемного плазмонов

чистого кремния. Широкий рефлекс с максимумом при 35 эВ свидетельствует о двукратном возбуждении объемного плазмона Si. На кривых 1, 3 и 5 слоев (Mg толщиной 30 нм) наличие широкого пика с максимумом при энергии от 13,6 до 13,8 эВ свидетельствует о возбуждении объемного плазмона силицида магния. Сравнивая спектры, соответствующие 2, 4 и 6 слоям (Si толщиной 10 нм) относительно буферного слоя Si, отмечаем незначительный сдвиг плазмонов Si по энергии влево.

Таким образом, в результате исследования пленки на каждом этапе (для отдельных слоев, методом ЭОС) было определено наличие атомов Mg (1186 эВ) и Si (92 эВ) в соответствующих слоях, а методом СХПЭЭ установлено силицидообразование (13,6 – 13,8 эВ) в сформированной пленке.

Дальнейшие исследования проводились в ИАПУ ДВО РАН. Так, с использованием прибора Bruker VERTEX 80v полученный образец был исследован методом ИК-Фурье-спектроскопии, в результате чего получены спектры пропускания и отражения (рис. 2).

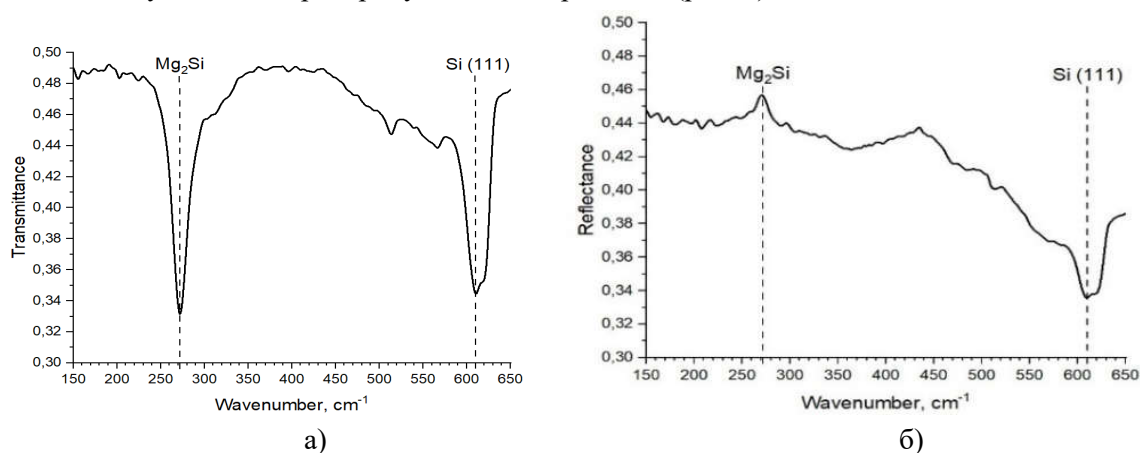


Рис. 2. ИК-Фурье-спектры пропускания (а) и отражения (б) образца.

На рис. 2а, б видны два отличающихся пика, но при одном и том же значении спектральной полосы. На графике (рис. 2а) наблюдается спектральная линия с волновым числом 272 см^{-1} , при чем величина коэффициента пропускания значительно уменьшается. Однако на рис. 2б значение коэффициента отражения увеличивается при 272 см^{-1} . По данным [8; 9], это указывает на наличие кристаллического Mg_2Si в составе пленки, сформированной при температуре подложки 240°C . Проанализировав графики, отмечаем, что минимальное значение коэффициента пропускания и максимальное значение коэффициента отражения сформированных пленок Mg_2Si составляют 0,33 (рис. 2а) и 0,46 (рис. 2б), соответственно. Также наблюдаются два обратных пика на обоих спектрах с минимумом при волновом числе 610 см^{-1} , что, согласно [8], указывает на монокристаллический Si (111).

Используя атомно силовой микроскоп Solver P47, методом АСМ были получены изображения сформированного образца (рис. 3).

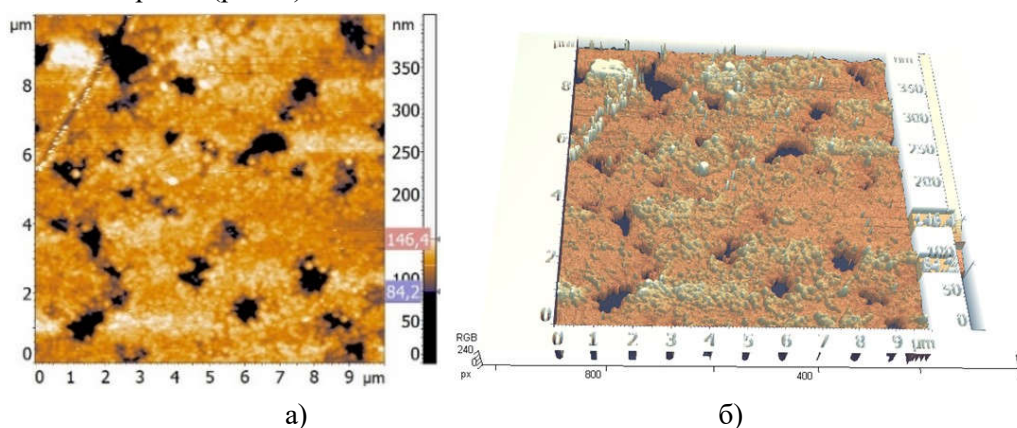


Рис. 3. 2D-АСМ-изображение образца – а) и его 3D-реконструкция – б).

При анализе 2D- (рис. 3а) и 3D- (рис. 3б) АСМ-изображения видно, что для образца характерен островковый тип роста пленки. Отчетливо видны зерна, образовавшиеся вследствие срастания островков между собой. Длина зерен составляет от 2 до 3 мкм, ширина – от 1 до 1,5 мкм, средняя площадь – 4 мкм². Наблюдаются отдельные узкие островки конической формы размером от 0,1 до 0,3 мкм, а также очень малое количество крупных островков (размер от 0,7 до 1 мкм). Помимо островков, в рельефе наблюдаются проколы (пустоты). Средняя площадь пустот – 0,7 мкм², расстояние между ними – от 2 до 4 мкм. Наличие проколов может быть связано с десорбцией Mg в данных областях.

Таким образом, в результате исследования методом ЭОС определено наличие атомов Mg (1186 эВ) и Si (92 эВ) в соответствующих слоях пленки. На спектрах ХПЭЭ установлено присутствие пика потерь (объемного плазмона) с максимумом при энергии от 13,6 до 13,8 эВ, что свидетельствует о силицидообразовании в пленке. Наличие Mg₂Si в составе сформированной пленки доказано присутствием фона с максимумом при 272 см⁻¹ в ИК-Фурье-спектрах. Методом АСМ показано, что для образца механизм роста пленки является островковым. При этом островки в дальнейшем коалесцируют в зерна со средней площадью до 4 мкм². Морфология поверхности полученной пленки характеризуется наличием проколов (пустот), средняя площадь которых не превышает 0,7 мкм².

1. Infrared photoresponse from p-n-junction Mg₂Si diodes fabricated by thermal diffusion / H. Uono [et al.] // J. Phys. Chem. Solids. – 2013. – 74 – P. 311-314.

2. Поляков А.В. Силицид магния – перспективный материал для оптических датчиков / А.В. Поляков, Д.В. Фомин, Н.С. Новгородцев // Успехи прикладной физики, 2023. – Т. 11, № 1, – С. 52-60. – DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-1-52-60.

3. Shevlyagin A.V. Mg₂Si is the new black: Introducing a black silicide with > 95 % average absorption at 200-1800 nm wavelengths / A.V. Shevlyagin [et al.] // Applied Surface Science. – 2022. – Vol. 602.

4. Экспериментальные методы физики твердого тела / Д. В. Фомин. – М.; Берлин: Директ-Медиа, 2014. – 186 с. – ISBN 978-5-4475-2829-4.

5. Handbook of Auger Electron Spectroscopy // JEOL, 1982. – 200 p.

6. Лифшиц В.Г. Спектры ХПЭЭ поверхностных фаз на кремнии / В.Г. Лифшиц, Ю.В. Луняков // Рос. акад. наук, Дальневост. отд., Ин-т автоматизации и процессов упр. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – 314 с.

7. Probing the Mg₂Si/Si (111) heterojunction for photovoltaic applications / A. Shevlyagin [et al.] // Solar Energy. – 2020. – Vol. 211. – P. 383-395.

8. Photoreflectance Spectra of Highly-oriented Mg₂Si (111)/Si (111) Films / Y. Terai [et al.] // JJAP Conference Proceedings. – The Japan Society of Applied Physics. – 2020. – Т.8. – P. 011004-1 - 011004-4. – DOI: 10.7567/JJAPCP.8.011004.

9. Галкин К. Н. Оптические свойства мультислойных материалов на основе кремния и наноразмерных кристаллитов силицида магния / К. Н. Галкин, А. М. Маслов, В. А. Давыдов // Журнал прикладной спектроскопии. – 2006. – Т. 73, № 2. – С. 204-209.

ФОРМИРОВАНИЕ НИЗКОРАЗМЕРНОГО Mg_2Si НА $Si(111)$ МЕТОДОМ РЕАКТИВНОЙ ЭПИТАКСИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

И.О. Шолыгин¹, А.В. Поляков¹, Н.С. Новгородцев¹, К.Н. Галкин², Н.Г. Галкин², Д.В. Фомин¹

¹Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

²Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН (г. Владивосток)

Sholygin435@gmail.com

В работе представлены результаты формирования пленок Mg_2Si на $Si(111)$ методом реактивной эпитаксии и исследование их методами ИК-спектроскопии. В ходе ростовых экспериментов были сформированы два образца с тонкими пленками. Первый образец имел толщину 150 нм, второй 120 нм, прогрев кремниевых подложек проводился при температурах 190 °C и 250 °C соответственно. Наличие пиков с энергиями 2,0 эВ и 2,6 эВ в спектрах видимого и ультрафиолетового (UV-VIS) диапазона и фонона с волновым числом 272 cm^{-1} в спектре колебательной ИК-спектроскопии доказало формирование Mg_2Si в пленке при температуре подложки 250 °C. Уменьшение температуры подложки привело к блокировке силицидообразования и формированию только многослойной структуры $Mg-Si$ с интерференционными особенностями в UV-VIS-спектре и отсутствию фонона с волновым числом 272 cm^{-1} .

FORMATION OF LOW-DIMENSIONAL Mg_2Si ON $Si(111)$ BY REACTIVE EPITAXY AND ITS INVESTIGATION BY OPTICAL METHODS

I.O. Sholygin¹, A.V. Polyakov¹, N.S. Novgorodtsev¹, K.N. Galkin², N.G. Galkin², D.V. Fomin¹

¹Amur State University, (Blagoveshchensk)

²Institute for Automation and Control Processes FEB RAS, (Vladivostok)

Sholygin435@gmail.com

The paper presents the results of the formation of Mg_2Si films on $Si(111)$ by the method of reactive epitaxy and their investigation by IR spectroscopy. During the growth experiments, two samples with thin films were formed. The first sample had a thickness of 150 nm, the second 120 nm, the silicon substrates were heated at temperatures of 190 °C and 250 °C, respectively. The presence of peaks with energies of 2,0 eV and 2,6 eV in the spectra of the visible and ultraviolet (UV-VIS) ranges and a phonon with a wave number of 272 cm^{-1} in the spectrum of vibrational IR spectroscopy proved the formation of Mg_2Si in the film at a substrate temperature of 250 °C. A decrease in the substrate temperature led to the blocking of silicide formation and the formation of only a multilayer $Mg-Si$ structure with interference features in the UV-VIS spectrum and the absence of a phonon with a wave number of 272 cm^{-1} .

DOI:10.22250/9785934934195_113

Mg_2Si является перспективным полупроводниковым соединением для изготовления на его основе оптоэлектронных компонентов. Перспективность материала обусловлена его малой шириной запрещенной зоны, лежащей в диапазоне от 0,6 до 0,76 эВ [1-3]. Тонкие пленки, сформированные на различных подложках, включая Si , обладают люминесценцией в видимой (от 580 до 630 нм) и инфракрасной (от 1100 до 1500 нм) частях спектра при комнатной температуре. Отличительной особенностью Mg_2Si является высокий коэффициент поглощения 95 % в спектральном диапазоне от 200 до 1800 нм, что в пять раз больше по сравнению с 17,6 % чистого кремния [3]. Высокая термоэлектрическая мощность, фоточувствительность за пределами длин волн 1100 нм, нетоксичность и отсутствие

редких или тугоплавких элементов делают Mg_2Si подходящим материалом для изготовления оптоэлектронных и термоэлектронных приборов [1-4]. Так как свойства Mg_2Si в низкоразмерном состоянии не изучены полностью, то формирование и исследование тонких пленок Mg_2Si на кремниевых подложках является актуальной научной задачей.

Тонкие пленки Mg_2Si формировались в лаборатории физики поверхности НОЦ им. К.Э. Циолковского, уже имеющей опыт по формированию и исследованию пленок силицидов на кремнии [5; 6 и др.]. В качестве подложек для пленок выступали пластинки Si (111) размером 5×15 мм, вырезанные из промышленной шайбы КЭФ-100 с удельным сопротивлением от 2 до 15 Ом·см. Источник магния выбирался чистотой 99,999 %. До загрузки в СВВ камеру Varian PHI 590 все подложки и источники прошли стандартную процедуру химической очистки, а после размещения их в вакуумной камере была проведена дополнительная термическая очистка [7].

Кремниевые подложки для получения атомарно-чистой поверхности очищались путем прогрева при температуре 600 °С в течение 1 часа, затем проводился отжиг при температуре 1250 °С трижды в течение 3 с. На подложке каждого образца предварительно был сформирован буферный слой Si толщиной 60 нм, а затем были поочередно сформированы три слоя Mg и три слоя Si. Для первого образца формировались слои Mg толщиной 40 нм при скорости осаждения 3,1 нм/мин, при этом подложка прогревалась до температуры 190 °С. Для второго образца формировались слои Mg с толщиной 30 нм, при скорости осаждения 10,9 нм/мин., подложка прогревалась до температуры 250 °С. Слои Si в обоих образцах формировались толщинами 10 нм, скорость осаждения составляла 0,9 нм/мин. В итоге были получены два образца с тонкими пленками толщинами 150 и 120 нм. Контроль состава пленок на этапах формирования проводился методом электронной оже-спектроскопии. Спектры энергий оже-электронов для каждого этапа формирования образцов представлены на рис. 1.

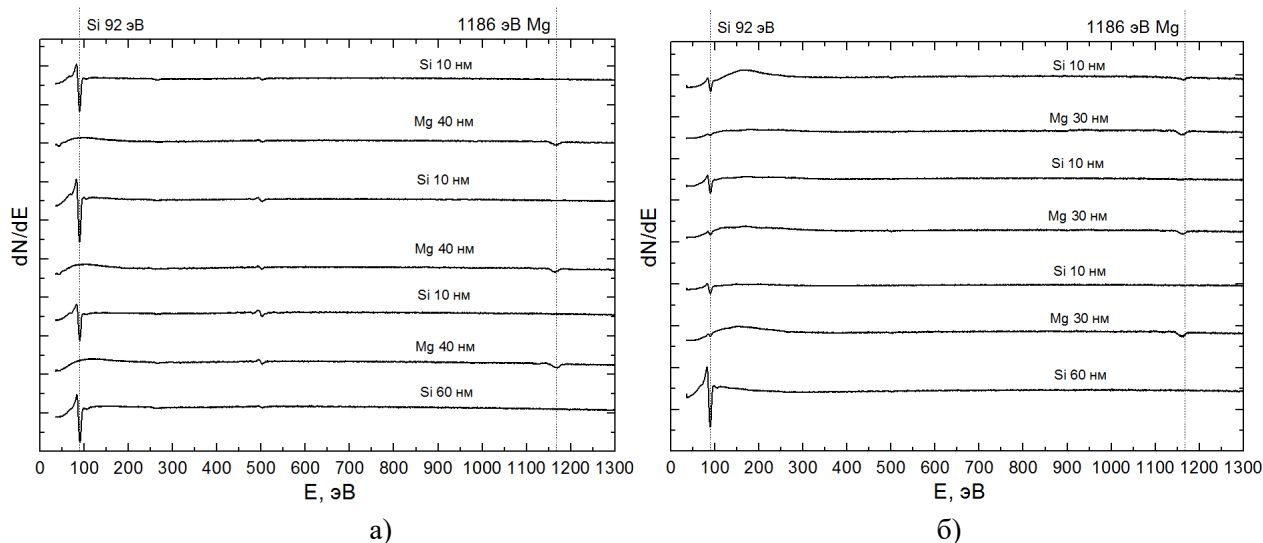


Рис. 1. Спектры энергий оже-электронов: а) первого образца; б) второго образца.

На спектрах энергий оже-электронов (для каждого образца) наблюдаются пики при энергиях 92 и 1186 эВ, которые по атласу оже-спектров [8] принадлежат кремнию и магнию. Для второго образца на оже-спектрах отдельных этапов формирования пики магния и кремния проявляются одновременно, что может быть связано с активным перемешиванием осажденных слоев.

Сформированные пленки были исследованы методом ИК-колебательной спектроскопии с использованием приборов BRUKER VERTEX 80v и UV-VIS спектроскопии - на Spectrophotometer U-3010. ИК-колебательные спектры пропускания и отражения представлены на рис. 2.

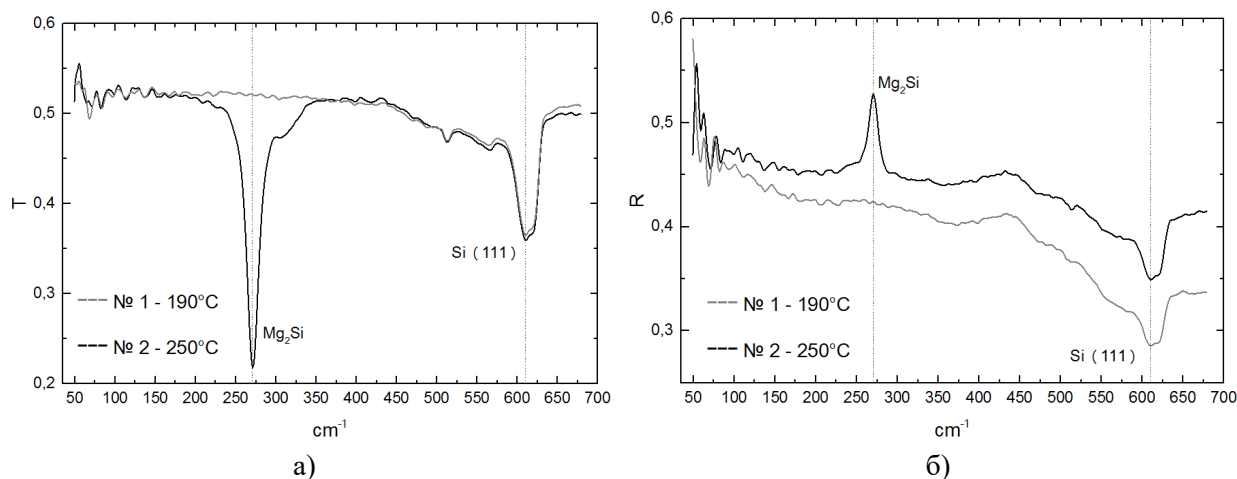


Рис. 2. Колебательные ИК-спектры а) – пропускания; б) – отражения.

В спектрах пропускания и отражения обоих образцов при энергии 610 см^{-1} наблюдаются пики поглощения и отражения большой интенсивности, которые принадлежат монокристаллическому Si (111) подложки. У второго образца отмечается уменьшение коэффициента пропускания и увеличение коэффициента отражения при энергии 272 см^{-1} , что, по данным [9; 10], свидетельствует об образовании кристаллического Mg_2Si в составе пленки второго образца. Для первого образца пик с волновым числом 272 см^{-1} не наблюдается, что свидетельствует об отсутствии силицидообразования из-за достаточно низкой температуры.

Помимо колебательной ИК-спектроскопии, сформированные пленки также были исследованы методом оптической UV-VIS-спектроскопии. Соответствующие спектры пропускания и отражения представлены на рис. 3.

Для второго образца в отличие от первого на спектре отражения наблюдаются рефлексии при энергиях 2 и 2,6 эВ (рис. 3 а), которые, по литературным данным [1; 10; 11], характерны для Mg_2Si . Для обоих образцов наблюдается уменьшение коэффициента отражения относительно спектра чистого кремния при энергиях более 2,5 эВ, что соответствует сильному рассеянию в пленках и коррелирует с данными АСМ (рис. 3). Спектр отражения первого образца в области энергий фотонов менее 2 эВ имеет дополнительные пики, связанные с интерференцией в мультислойной структуре со слоями магния и кремния без формирования силицида магния.

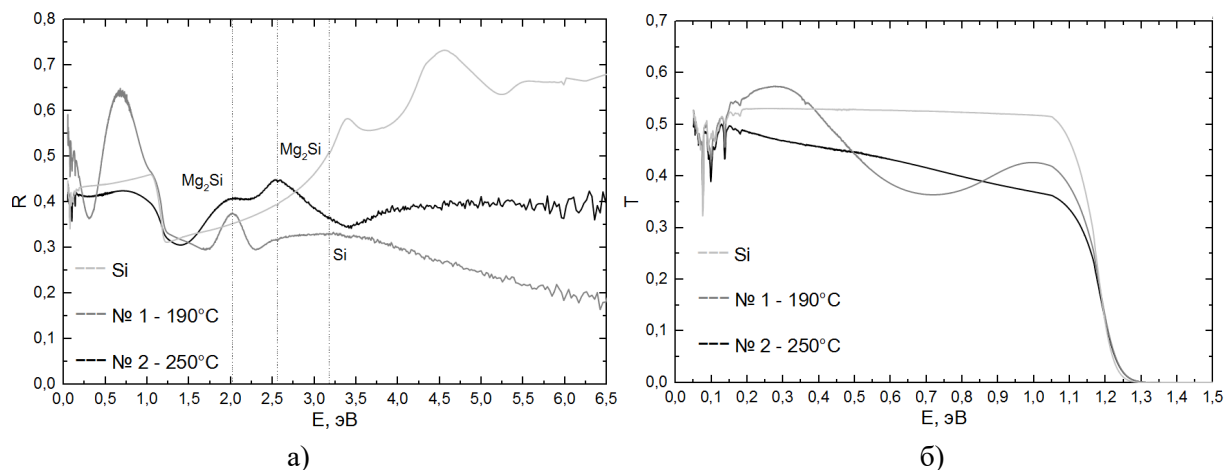


Рис. 3. UV-VIS спектры: а) – отражения; б) – пропускания.

Этот процесс подтверждается пиками интерференции в спектре пропускания UV-VIS-диапазона (рис. 3б) первого образца. На спектрах пропускания (рис. 3б) второго образца такие пики интер-

ференции не наблюдаются, а есть увеличение пропускания с уменьшением энергии фотонов, что подтверждает формирование в нем полупроводникового Mg_2Si [1; 2].

Таким образом, методом UV-VIS-спектроскопии, по наличию пиков при энергиях 2 и 2,6 эВ в спектре отражения и наклона с уменьшением поглощения в спектре пропускания для пленки второго образца, установлено, что в ней сформировался Mg_2Si при температуре подложки 250 °С. Данные колебательной ИК-спектроскопии подтвердили силицидообразование во втором образце по наличию в ИК-спектрах отражения и пропускания пиков при волновом числе 272 см^{-1} . В образце, сформированном при 190 °С, силицидообразования, по данным дальней ИК-спектроскопии не прошло, а в спектрах UV-VIS наблюдаемые пики свидетельствуют только о существовании многослойной структуры Si-Mg с интерференционными особенностями.

1 Galkin N.G. Multilayer Si (111) / Mg_2Si clusters / Si heterostructures: formation, optical and thermoelectric properties / N.G. Galkin, K.N. Galkin, S.V. Vavanova / e-journal of Surface Science and Nanotechnology. – 2005. –Vol. 3. – P. 12 – 20.

2. Probing the $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}$ (111) heterojunction for photovoltaic applications /A. Shevlyagin [et al.] // Solar Energy 211, 2020. – P. 383-395.

3. Mg_2Si is the new black: introducing a black silicide with 95 % average absorption at 200 – 1800 nm wavelengths / A. Shevelagin, V. Yashchenko, A. Kuchmizhak, A. Sergeev, E. Mitsai // 2022. –Volume 602, 15 November, 154321, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154321>.

4. Поляков А. В. Силицид магния - перспективный материал для оптических датчиков / А. В. Поляков, Д. В. Фомин, Н. С. Новгородцев // Успехи прикладной физики. – 2023. – Т. 11, № 1. – С. 52-60.

5. SPE grown BaSi_2 on Si(111) substrates: Optical and photoelectric properties of films and diode heterostructures on their base / N. G. Galkin, D. L. Goroshko, K. N. Galkin [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. – 2020. – Vol. 59, No. SF. – P. SFFA11. – DOI 10.35848/1347-4065/ab6b76. – EDN YGWDJN.

6. Исследование роста полупроводниковых силицидов кальция на Si (111) / Д. А. Безбабный, С. А. Доценко, Д. В. Фомин, Н. Г. Галкин // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование : Материалы Всероссийской молодежной научной конференции, Благовещенск, 2012. – С. 48-52. – EDN UVOZDB.

7. Экспериментальные методы физики твердого тела / Д. В. Фомин. – М. Берлин: Директ-Медиа, 2014. –186 с,

8 Handbook of auger electron spectroscopy / Lawrence E. Davis, Noel C. MacDonald, Paul W. Palmberg, Gerald E. Riach, Roland E. Weber // Physical Electronics Industries, Inc. February, 1976.

9. Multilayer Si (111)/ Mg_2Si clusters/Si heterostructures: Formation. Optical and thermoelectric properties // Nickolay G. Galkin, Konstantin N. Galkin, Svetlana V. Vavanova // e-J. Surf. Sci. Nanotech. – 2005. –Vol. 3. –P. 12-20, <https://doi.org/10.1380/ejsnt.2005.12>

10. Photoreflectance spectra of highly-oriented Mg_2Si (111) / Si (111) films / Y. Terai [и др.]. – The 5th Asia Pacific conference on semiconducting silicides and related materials, 2019.

11. Наносекундный импульсный отжиг кремния, имплантированного ионами магния / Н.Г. Галкин [и др.]. – Институт Автоматики и Процессов Управления ДВО РАН, журнал технической физики, том 83, выпуск 1, 2013.

ИНДИКАЦИЯ ЛАТЕРАЛЬНОГО ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В СТРУКТУРЕ Bi/n-Si(111)

А.А. Яковлев, Т.А. Писаренко, Д.А. Цуканов, М.В. Рыжкова

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН (г. Владивосток)

yakovlev@iacp.dvo.ru

Представлены результаты исследования латерального фотовольтаического эффекта в структуре Bi/n-Si(111). Обнаружено, что более выгодными для оптоэлектронных устройств характеристиками обладают структуры с толщиной слоя висмута 8–10 нм и расстоянием между контактами 1 мм. Показано, что с увеличением расстояния между контактами величина чувствительности уменьшается, а с увеличением толщины пленки увеличиваются времена фотоотклика.

INDICATION OF THE LATERAL PHOTOVOLTAIC EFFECT IN THE Bi/n-Si STRUCTURE

A.A. Yakovlev, T.A. Pisarenko, D.A. Tsukanov, M.V. Ryzhkova

Institute for Automation and Control Processes FEB RAS (Vladivostok)

yakovlev@iacp.dvo.ru

The results of studying the lateral photovoltaic effect in the Bi/n-Si(111) structure are presented. It has been found that structures with a bismuth layer thickness of 8–10 nm and a distance between contacts of 1 mm have more favorable characteristics for optoelectronic devices. It is shown that with increasing distance between the contacts, the LPE sensitivity decreases, and with increasing film thickness, the photoresponse times increase.

DOI:10.22250/9785934934195_117

На сегодняшний день в области микроэлектроники ввиду постоянной миниатюризации наметилась тенденция к переходу от обычных электронных приборов к многофункциональным. Кроме того, в последнее десятилетие создание двумерных (2D) материалов вызвало огромный интерес в области оптоэлектроники [1-3]. Элементарные 2D-материалы (Хене), – например, такие как 2D Bi, привлекают внимание из-за исключительных электрических и оптических свойств по сравнению с их объемными аналогами [4]. Исходя из концепции многофункциональности, пленки висмута демонстрируют различные сочетания свойств: от сверхпроводимости [5] до магнитотранспорта [6]. Для дальнейшего улучшения оптоэлектронных характеристик тонкого слоя Bi перспективно формирование гетероперехода с полупроводниками.

Латеральный фотовольтаический эффект (ЛФЭ), при котором поверхностная разность потенциалов определенной системы материалов изменяется линейно в зависимости от положения падающего пучка лазера, является одним из популярных эффектов, встречающихся во многих фотоэлектрических устройствах [7]. Из-за особого механизма ЛФЭ обеспечивает новое направление разработки высокоточных позиционно-чувствительных детекторов (ПЧД). По сравнению с традиционными устройствами такие фотодетекторы с автономным питанием более экономичны, их можно легко интегрировать в оптоэлектронные системы.

В данной работе проводились исследования ЛФЭ при постоянном и пульсирующем освещении структуры Bi/n-Si(111).

Формирование структуры $\text{Bi}/n\text{-Si}(111)$ проводилось в сверхвысоковакуумной (СВВ) установке путем осаждения висмута при комнатной температуре на атомарно-чистую поверхность кремния $\text{Si}(111)7\times7$. В качестве подложки использовались пластины кремния $\text{Si}(111)$ n -типа с удельным сопротивлением 7.5 Ом·см. Подложка очищалась в вакууме путем предварительной дегазации при температуре 600 °С в течение нескольких часов, а затем проводился кратковременный высокотемпературный отжиг при 1250 °С. Состояние поверхности подложки, а также напыляемых пленок висмута контролировалось с помощью метода дифракции медленных электронов. Скорость напыления висмута определялась из наблюдений картин дифракции согласно фазовой диаграмме субмнослойной системы $\text{Bi}/\text{Si}(111)$, а также по аллотропному переходу пленки висмута из псевдокубической $\{012\}$ в объемную гексагональную (001) фазу [8], и составляла 0,4 нм/мин.

Измерение латерального фотонапряжения проводилось *ex-situ*. Для измерения фотонапряжения использовались зондовые прижимные контакты, расстояние между которыми варьировало от 1 до 2 мм. Освещение осуществлялось He-Ne лазером с $\lambda = 633$ нм и мощностью излучения, падающего на поверхность образца, 0,3 мВт. Измерения зависимостей фотонапряжения $U(x)$ и $U(t)$ проводились с помощью Keitly-2000 и цифрового осциллографа Tektronix TDS 2012B, соответственно.

На рис. 1 представлены зависимости латерального фотонапряжения от положения светового пятна, параметризованные расстоянием между контактами, для пленок Bi толщиной 6, 8 и 10 нм. Из рис. 1 можно видеть, что с увеличением расстояния между контактами величина фотонапряжения уменьшается.

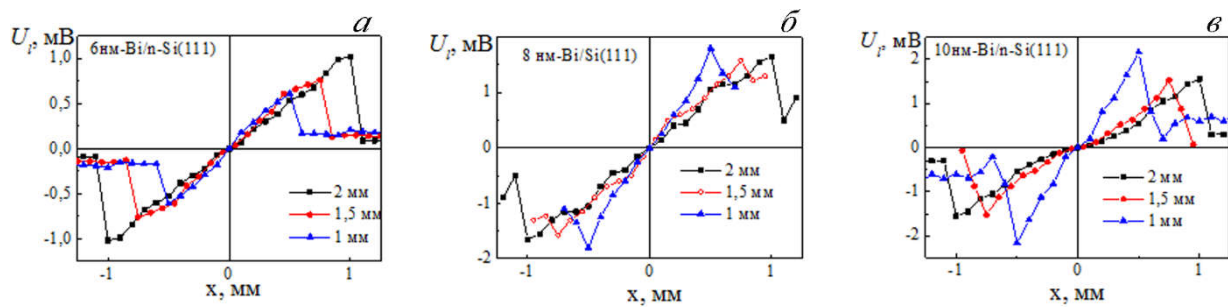


Рис. 1. Зависимости латерального фотонапряжения от положения светового пятна в системе $\text{Bi}/n\text{-Si}(111)$ при разной толщине пленки висмута: а) 6 нм, б) 8 нм, в) 10 нм.

Полученные зависимости $U(x)$ параметризуются двумя характеристиками, рабочими для позиционно-чувствительных детекторов, – это чувствительность и нелинейность ЛФЭ, которые представлены на рис. 2а и 2б.

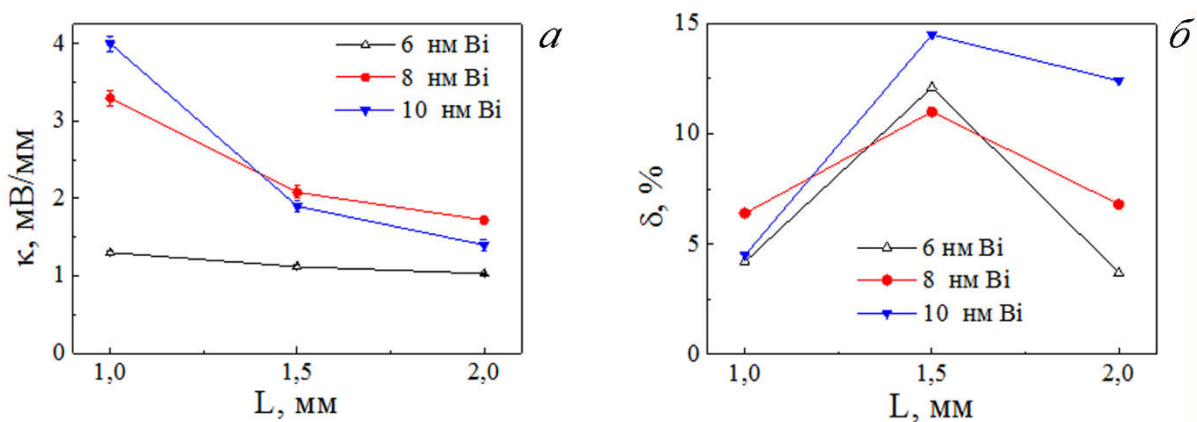


Рис. 2. Рабочие характеристики позиционно-чувствительных детекторов на основе системы $\text{Bi}/n\text{-Si}(111)$, параметризованные толщиной пленки висмута: а) чувствительность ЛФЭ, б) нелинейность ЛФЭ.

Из результатов видно, что при уменьшении расстояния между измерительными контактами чувствительность ЛФЭ увеличивается, тогда как нелинейность ЛФЭ имеет экстремальную зависимость от расстояния между контактами. На представленных на рис. 2 зависимостях можно отметить интересный факт: при расстоянии между контактами 2 мм с увеличением толщины пленки висмута чувствительность ЛФЭ сначала увеличивается, а затем падает, т. е. имеет экстремальная зависимость чувствительности от толщины пленки верхнего покрытия, тогда как с уменьшением расстояния между контактами до 1 мм чувствительность ЛФЭ непрерывно, хотя и нелинейно, возрастает с увеличением толщины пленки висмута. Эти особенности толщинных зависимостей могут быть связаны с тем, что концентрация носителей в висмуте также зависит от толщины пленки, что будет влиять как на величину встроенного поля, так и на рекомбинационные процессы при латеральной диффузии фотоносителей. Скорее всего, конкуренция между этими механизмами и приводит к смене характера толщинной зависимости при изменении расстояния между контактами. Тем не менее, для оценки перспективы использования структуры Bi/n-Si(111) в качестве оптоэлектронных устройств представляет интерес сравнительный анализ толщинных зависимостей ЛФЭ-характеристик при наименьшем расстоянии между контактами. С точки зрения ПЧД при постоянном освещении, оптимальной толщиной обладает структура с толщиной пленки висмута 10 нм.

Для полупроводниковой электроники также весьма важными параметрами являются временные характеристики сигнала фотоотклика. Нами были проведены эксперименты по определению данных характеристик при локальном (вблизи контакта) импульсном освещении системы Bi/Si. Результаты фотоотклика представлены на рис. 3.

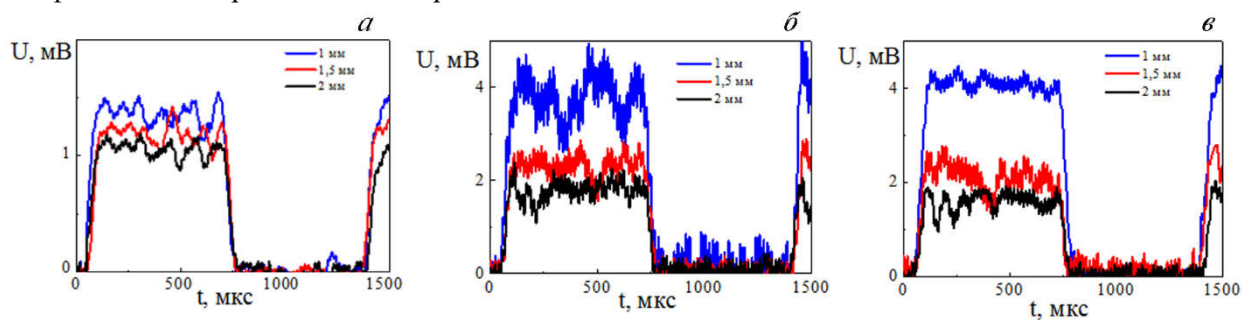


Рис. 3. Временные зависимости латерального фотонапряжения при импульсном освещении в системе Bi/n-Si(111) при разной толщине пленки висмута: а) 6 нм, б) 8 нм, в) 10 нм.

Сигналы фотоотклика были параметризованы временами нарастания и спада (релаксации), полученными аппроксимацией фронтов сигнала латерального фотонапряжения сигмоидальной функцией Больцмана.

Характеристики позиционно-чувствительных детекторов на основе структуры Bi/n-Si(111)

d_{Bi} , нм	L, мм	k, мВ/мм	δ , %	R, кОм	R_{BAH} , кОм	τ_r^{Bs} , мкс	τ_f^{Bs} , мкс
6	1	1,3	3,7	2,1	1,9	15,5	13
	1,5	1,12	12	3,3	3,3	13	11,5
	2	1,03	4,2	4,6	4,5	15,5	12,5
8	1	3,3	6,4	129	117	17,5	16
	1,5	2,08	11	148	174	13,5	14
	2	1,72	6,8	226	256	10	10,5
10	1	4	4,5	11	11	22	21
	1,5	1,9	14,4	16	16,1	19,5	24
	2	1,4	12	21	20,4	17,7	18,5

Из полученных результатов видно, что для каждого образца времена нарастания и спада совпадают в пределах ошибки, при этом с увеличением толщины пленки висмута времена фотоотклика возрастают, что связано с увеличением поперечного сопротивления пленки из-за увеличения ее толщины. Увеличение расстояния между контактами не влияет на времена фотоотклика при малой толщине пленки висмута (6 нм), тогда как увеличение толщины пленки висмута до 8-10 нм приводит к росту времен нарастания и спада сигнала фотоотклика при уменьшении расстояния между контактами. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что при импульсном освещении более выгодными для оптоэлектроники являются структуры Bi/n-Si(111) с толщиной пленки висмута 8 нм.

Таким образом, результаты проведенного нами исследования показали, что ЛФЭ в структуре Bi/n-Si(111) достаточно низкая чувствительность ЛФЭ. Следовательно, в современной оптоэлектронной промышленности эти структуры имеют узкую область применения в качестве позиционно-чувствительных детекторов, в которых не требуется высокая чувствительность. Обнаружено, что наиболее выгодными для оптоэлектронных устройств характеристиками обладают структуры с толщиной слоя висмута 8-10 нм и расстоянием между контактами 1 мм.

-
1. Ponraj J. S., Xu Z. Q., Dhanabalan S. C., Mu H., Wang, Y., Yuan J., ... & Bao Q. Photonics and optoelectronics of two-dimensional materials beyond graphene // *Nanotechnology*. – 2016. – V. 27, №. 46. – P. 462001-33.
 2. Huang H., Ren X., Li Z., Wang H., Huang Z., Qiao H., ... & Zhang H. Two-dimensional bismuth nanosheets as prospective photo-detector with tunable optoelectronic performance // *Nanotechnology*. – 2018. – VT. 29, №. 23. – P. 235201-11.
 3. Koppens F. H. L., Mueller T., Avouris P., Ferrari A. C., Vitiello M. S., & Polini M. Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems // *Nature nanotechnology*. – 2014. – V. 9, №. 10. – P. 780-793.
 4. Dang Z., Wang W., Chen J., Walker E. S., Bank S. R., Akinwande D., ... & Tao L. Vis-NIR photodetector with microsecond response enabled by 2D bismuth/Si (111) heterojunction // *2D Materials*. – 2021. – V. 8, №. 3. – P. 035002-8.
 5. Granqvist C., Claesson T. Superconductivity in ultrathin films I. Transition temperatures of amorphous Bi and Ga // *Phys. Condens. Matter*. – 1974. – V. 18. – P. 79-97.
 6. Aitani M., Hirahara T., Ichinokura S., Hanaduka M., Shin D., Hasegawa S. In situ Magnetotransport Measurements in Ultrathin Bi Films: Evidence for Surface-Bulk Coherent Transport // *Phys. Rev. Lett.* – 2014. – V. 113. – P. 206802.
 7. Yang Y. Progress of lateral photovoltaic effect: theoretical models and materials // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2021. – V. 2044. – P. 012151.
 8. Nagao T., Sadowski J.T., Saito M., Yaginuma S., Fujikawa Y., Kogure T., Ohno T., Hasegawa Y., Hasegawa S., Sakurai T. Nanofilm Allotrope and Phase Transformation of Ultrathin Bi Film on Si(111)-7×7 // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – V. 93. – P. 105501.

Секция 3

Материаловедение

УДК 621.762

ПЕРЕРАБОТКА СПЛАВА Т5К10 ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ ОТХОДОВ В РАЗЛИЧНЫХ ЖИДКОСТЯХ

М.И. Дворник, Е.А. Михайленко, Н.М. Власова, Д.А. Кользун

*Хабаровский федеральный исследовательский центр Институт материаловедения ДВО РАН
(г. Хабаровск)
Maxxxx80@mail.ru*

Электроэрозионным диспергированием (ЭЭД) твердого сплава WC-5TiC-10Co в этиловом спирте, изопропанол и масле получен порошок, а из него – ультрамелкозернистый сплав; изучены микроструктуры и свойства полученных частиц и сплава. Нежелательное изменение содержания углерода в образующемся порошке в результате пиролиза жидкости оказалось пропорционально произведению удельных энергозатрат на разницу мольных долей углерода и кислорода в жидкости. При ЭЭД вольфрам растворяется в кубическом карбиде титана (Ti,W)C, который сохраняется в образованных частицах. При дальнейшей термообработке и спекании из пересыщенного раствора (Ti,W)C вырастают новые пластинчатые сверхмелкие зерна WC. За счет уменьшения среднего диаметра зерен WC с 1,45 мкм до 0,42 мкм и увеличения содержания карбида (Ti,W)C твердость полученных сплавов повышается с 1410 HV в исходном сплаве до 1650 HV в спеченном.

PROCESSING OF T5K10 ALLOY BY ELECTRIC EROSION DISPERSION OF WASTE IN VARIOUS LIQUIDS

M.I. Dvornik, E.A. Mikhailenko, N.M. Vlasova, D.A. Kolzun

*Khabarovsk Federal Research Center Institute of materials science of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, (Khabarovsk)
Maxxxx80@mail.ru*

In this work, a powder was obtained by electroerosive dispersion (EED) of a hard alloy WC-5TiC-10Co in ethanol, isopropanol and oil, an ultrafine-grained alloy was sintered from it, the microstructures and properties of the obtained particles and alloy were studied. An undesirable change in the carbon content in the resulting powder as a result of liquid pyrolysis is proportional to the product of specific energy consumption and the difference in the mole fractions of carbon and oxygen in the liquid. During EED, tungsten dissolves in cubic titanium carbide (Ti,W)C, which is retained in the formed particles. During further heat treatment and sintering, new lamellar superfine WC grains grow from a supersaturated (Ti,W)C solution. By reducing the average grain diameter WC from 1,45 μm to 0,42 μm and increasing the content of carbide (Ti,W)C, the hardness of the resulting alloys increases from 1410 HV in the original alloy to 1650 HV in the sintered alloy.

DOI:10.22250/9785934934195_121

В промышленности для обработки различных сталей и сплавов используют WC-TiC-Co – твердосплавные инструменты, отличающиеся высокой прочностью и износостойкостью. Для получения

ультрамелкозернистых (средний диаметр зерен менее 0,5 мкм) твердых сплавов, обладающих повышенной твердостью и износостойкостью [1; 2], применяют наноструктурные и ультрадисперсные порошки, полученные длительным измельчением или комплексными химическими методами [3; 4]. Альтернативным методом получения твердосплавных ультрамелкозернистых порошков является электроэрозионное диспергирование отходов твердого сплава [5; 6]. Он основан на образовании частиц под действием искрового разряда в диэлектрической жидкости, который приводит к плавлению и кипению исходного материала внутри парового пузыря. В результате быстрого охлаждения возникают наноструктурированные и ультрамелкозернистые частицы преимущественно сферической формы, содержащие высокотемпературные фазы и пересыщенные твердые растворы. В зависимости от используемой диэлектрической жидкости возможны изменения в содержании углерода в получаемом порошке. После корректировки содержания углерода порошки WC-Co, сформированные методом ЭЭД, можно применять для получения ультрамелкозернистых твердых сплавов. Цель работы – получить ультрамелкозернистый твердый сплав WC-TiC-Co с повышенной твердостью и вязкостью разрушения в результате переработки сплава методом ЭЭД в этаноле, изопропанолe и масле.

Методика переработки сплава T5K10 заключается в электроэрозионном диспергировании образцов, в процессе которого образуется избыток углерода, последующем удалении этого избытка, прессовании и спекании образцов. При этом все летучие углеводороды удаляются еще в процессе сушки.

Анализ на углерод показал, что концентрация углерода в полученных диспергированием сплава T5K10 в масле (8,70 %) и изопропанолe (10,20 %) порошках (рис. 1) превышало необходимую стехиометрическую концентрацию ($6,15 \pm 0,1$ %). После термообработки в рассчитанном объеме CO_2 при 1000°C концентрация углерода снижалась до необходимых значений (6,2 % и 6,25 % соответственно).

Фазовый анализ показал, что в порошках, полученных методом ЭЭД, после низкотемпературной сушки обнаружена только фаза (Ti,W)C. Следовательно, при ЭЭД происходит полное растворение WC (85 %) в TiC (5 %). При охлаждении капель, выброшенных из кратера, кристаллизуется фаза (Ti,W)C, имеющая из всех фаз самую высокую температуру плавления (3130°C). Расчет показывает, что концентрация WC в полученном растворе должна быть 94 %, что значительно выше равновесной концентрации. Поэтому образующийся твердый раствор является метастабильным и пересыщенным.

При спекании порошка, полученного в этаноле, образуется $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ (η -фаза). Это связано с тем, что содержание углерода в полученном порошке ниже стехиометрического. В сплавах, спеченных из порошков, полученных ЭЭД в изопропанолe и масле, η -фаза отсутствует. Все полученные порошки (рис. 1, а–в) состоят из сферических частиц диаметром до 200 мкм и наноразмерных частиц диаметром менее 1 мкм. Сферические частицы образовались при кристаллизации жидкой фазы. Исследования показали, что в ЭЭД порошках сферические частицы занимают более 80 % объема. После термической обработки и кратковременного измельчения в шаровой мельнице средний диаметр ультрамелкозернистых частиц уменьшился до 9,7 мкм (рис. 1, г–е). Порошки с частицами такого диаметра пригодны для дальнейшего спекания. Так как измельчение было кратковременным, частицы сохранили свою структуру.

При ЭЭД все фазы исходного сплава (WC, (Ti,W)C и Co) плавятся и снова кристаллизуются. Первой кристаллизуется фаза (Ti,W)C, имеющая самую высокую температуру плавления (3130°C). Весь вольфрам и титан из исходного сплава растворяются в этой фазе. Микроструктуры всех полученных таким образом сферических частиц состоят из зерен (Ti,W)C округлой формы, в пространствах между которыми находится фаза кобальта. При высокотемпературной термообработке полученных порошков из фазы (Ti,W)C частично выделяется избыточный WC.

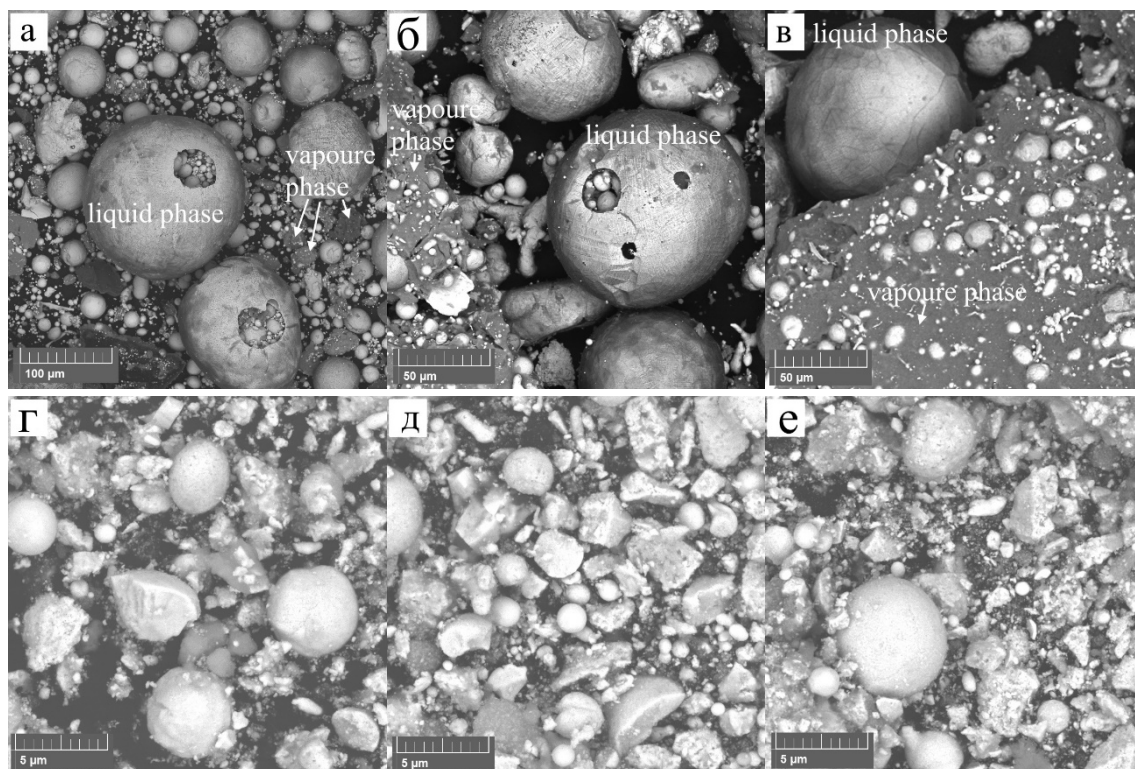


Рис. 1. Порошки, полученные ЭЭД в этаноле (а, г), изопропанолe (б, д), масле (в, е) до (а-в) и после (г-е) термообработки.

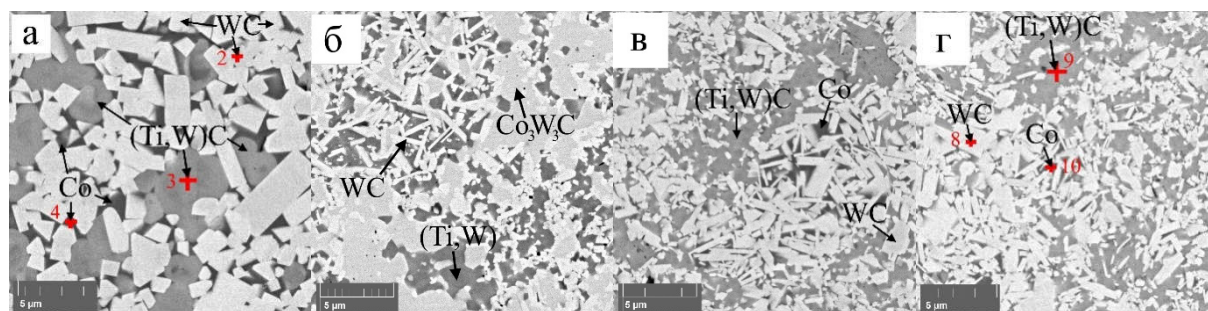


Рис. 2. Микроструктура исходного сплава и сплавов, спеченных из порошков, переработанных (включая термообработку) ЭЭД в этаноле (б), изопропанолe (в) и масле (г).

Исследования показали, что средний диаметр зерен WC и (Ti,W)C составляет 1,45 и 1,7 мкм соответственно (рис. 2, а). Объемная доля (Ti,W)C – 28%. В процессе спекания при температуре 1400°C выделение пластинчатых зерен WC из фазы (Ti,W)C продолжается. В сплаве, спеченном из порошков, полученных в этаноле, из-за недостатка углерода образуется нежелательная η-фаза (рис. 2, б), приводящая к уменьшению концентрации кобальтовой фазы и увеличению пористости. Сплавы, спеченные из порошков, полученных ЭЭД в масле и изопропанолe, состоят из зерен WC, (Ti,W)C и кобальта (рис. 2 в, г). На микроструктурах спеченных сплавов хорошо видно, что средние диаметры зерен WC и (Ti,W)C в 3 – 4 раза меньше, чем в исходном сплаве. Анализ микроструктуры показал, что объемная концентрация (Ti,W)C (33 % – 37 %) остается выше, чем в исходном сплаве (28 %). Это связано с тем, что выделение вольфрама и углерода из фазы (Ti,W)C при спекании происходит не полностью.

Твердость и вязкость разрушения исходного среднезернистого сплава составила 1410 HV и 12,9 МПа·м^{1/2}. Наличие η-фазы и высокая пористость сплава, спеченного из порошка, полученного в этаноле, привела к снижению твердости и вязкости разрушения сплава до 1110 HV и 6,9 МПа·м^{1/2} со-

ответственно. За счет уменьшения диаметра зерна и увеличения концентрации (Ti,W)C твердость переработанных в изопропанол и масле сплавов увеличилась до 1630 HV-1650 HV. При этом вязкость этих сплавов также увеличилась до 13,9 и 14,1 МПа·м^{1/2} соответственно.

В результате переработки твердого сплава WC-5TiC-10Co методом ЭЭД получены образцы ультрамелкозернистого сплава с пластинчатыми зернами WC, повышенным содержанием фазы (Ti,W)C, повышенной твердостью и вязкостью разрушения.

Основным эффектом при ЭЭД является полное растворение WC в (Ti,W)C под действием высокой температуры искрового разряда и образование пересыщенного раствора при быстром охлаждении частиц в жидкости. При термообработке и спекании из пересыщенного твердого раствора (Ti,W)C вырастают пластинчатые зерна WC, средний диаметр которых в несколько раз меньше диаметра зерен в исходном сплаве. Концентрация (Ti,W)C в сплаве после спекания остается выше его концентрации в исходном варианте за счет повышенного содержания в нем вольфрама.

За счет уменьшения среднего диаметра зерен в 3-4 раза и увеличения концентрации (Ti,W)C твердость переработанных сплавов WC-5TiC-10Co возрастает с 1410 HV до 1630-1650 HV. Вязкость разрушения полученных сплавов WC-5TiC-10Co (13,9 и 14,1 МПа·м^{1/2}) оказалась также выше вязкости исходного сплава (12,9 МПа·м^{1/2}). При переработке в этаноле твердость и вязкость снизились из-за недостатка углерода.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-01108-23-01.

-
1. Guo, Z. X., Xiong, J., Yang, M., Dong, G. B., and Wan, W. C. Tool wear mechanism of WC-5TiC-10Co ultrafine cemented carbide during AISI 1045 carbon steel cutting process // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2012. – V. 35. – P. 262-269.
 2. Xiong, Z. X. Guo, M. Yang, Wan, W. C., and Dong, G. B. Tool life and wear of WC-TiC-Co ultrafine cemented carbide during dry cutting of AISI H13 steel // Ceramics International. – 2013. – V. 39. – P. 337-346.
 3. Dvornik, M., Mikhailenko, E., The influence of the rotation frequency of a planetary ball mill on the limiting value of the specific surface area of the WC and Co nanopowders // Advanced Powder Technology. – 2020. – V. 31. – P. 3937-3946.
 4. Zhang, C. C., Wang, Q., Yuan, Q. Q., Yang, Y. F. and Yi, X. L. Preparation of WC-5TiC-10Co nanometer powder and performance study of sintering samples // Advanced Materials Research. – 2012. – V. 465. – P. 220-223.
 5. Dvornik, M. I., Mikhailenko, E. A. and Nikolenko, S. V. Development of a method for producing submicron cemented carbide from a powder obtained by electrical discharge erosion of scrap in oil // Powder Technology. – 2021. – V. 383. – P. 175-182.
 6. Dvornik, M. I. and Mikhailenko, E. A. Production of WC-15Co Ultrafine-Grained Hard Alloy from Powder Obtained by the Electroerosive Dispersion of VK15 Alloy Wastes in Water // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2021. – V.62. – P. 97-106.

АДГЕЗИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МИКРОСФЕР ДИОКСИДА КРЕМНИЯ И ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

А.Е. Воронков, Р.А. Бузиков, П.А. Григорьев

Амурский государственный университет, г. Благовещенск

voron-1998-va@mail.ru

Исследована адгезия покрытий на основе полых частиц диоксида кремния и эпоксидной смолы с концентрацией от 20 до 80 об.% методом надрезов и отрыва. Установлено, что малая концентрация связующего обуславливает высокую адгезию.

ADHESION OF COATINGS BASED ON MICROSPHERES OF SILICON DIOXIDE AND EPOXY RESIN

A.E. Voronkov, R.A. Buzikov, P.A. Grigoriev

Amur State University, Blagoveshchensk

voron-1998-va@mail.ru

The adhesion of coatings based on hollow particles of silicon dioxide and epoxy resin with a concentration of 20 to 80 vol.% by incision and separation was investigated. It was found that a low concentration of binder causes high adhesion.

DOI:10.22250/9785934934195__125

Исследование адгезии покрытий является актуальным и важным направлением, поскольку адгезия играет ключевую роль в эффективности и долговечности различных покрытий. Адгезия определяет стойкость покрытия к механическим нагрузкам, химическим воздействиям, влаге, температурным изменениям и другим воздействиям окружающей среды. Анализ адгезии помогает выявить причины возникновения проблем с адгезией покрытий – отслоения, трещин, деформации и прочих дефектов и разработать способы предотвращения или устранения таких проблем. Микросферы диоксида кремния можно использовать для создания легких и прочных покрытий. Благодаря своей низкой плотности и высокой прочности они могут быть добавлены в покрытие с минимальным увеличением его веса, но с одновременным повышением его механических свойств. Введение их как армирующих добавок укрепляет структуру покрытия и повышает его стойкость к износу, царапинам и другим механическим воздействиям. Это особенно важно для покрытий, применяемых на поверхностях, которые подвержены интенсивному трению или воздействию агрессивной среды.

Целью настоящей работы – проведение исследований адгезионных характеристик покрытий на основе микросфер диоксида кремния и связующих из эпоксидной смолы.

Синтез полых частиц осуществлялся с применением шаблонного метода. В качестве шаблонов использовались полистирольные шарики, для получения которых в 500 мл круглодонную колбу с тремя горлами заливали 300 мл этанола, затем добавляли 30 мл стирола и 0,12 г поливинилпирролидона, раствор смешивали со скоростью 300 об/мин. при температуре 80 °С в течение 30 мин. Затем добавляли водный раствор аммония персульфата в соотношениях: 36 мл деионизированной воды и 2 г

аммония персульфата и получали частицы полистирола микронных размеров. Далее смешивание происходило при температуре 75 °С в течение 3 часов, до образования белого раствора. Раствор был дважды промыт 500 мл этанола, дважды центрифугирован при 2000 об/мин., после каждого этапа раствор подвергался ультразвуковому воздействию.

Чтобы получить полые частицы диоксида кремния, готовили раствор с добавлением полистирольных шариков, этанола, дистиллированной воды, раствора аммиака и тетраэтоксисилана в соотношениях к объему: 5:40:10:5:1. Затем полученный раствор перемешивали в течение 2 часов при температуре 50 °С. После этого раствор трижды промывали этанолом и водой и центрифугировали при 3000 об/мин. после каждого промывания. На последнем этапе его высушивали и подвергали трехстадийной термообработке при температуре 200, 300 и 500 °С. На выходе был получен белый мучнисто-сыпучий порошок.

Для проведения измерений адгезии методом решетчатых надрезов (ГОСТ 31149-2014) и механической отрывной адгезии (ГОСТ 27325) прибором NOVOTEST АЦ-1 были изготовлены образцы покрытий с различным содержанием эпоксидной смолы – 20 до 80 % по объему, толщиной 200-250 нм. Покрытия наносились на пластины из листовой стали марки 08кп размером 60×150 мм и толщиной 1 мм. Устройство для нанесения надрезов типа АД-3 соответствовало ТУ 6-23-9-89. Механический адгезиометр Константа-АЦ предназначен для контроля величины адгезии лакокрасочных и других покрытий с основанием и между слоями, а также когезии материалов. В основу работы прибора положен принцип измерения удельного усилия отрыва покрытия от подложки либо для когезионного разрушения покрытия. Цилиндрический тестовый образец приклеивается к испытуемому покрытию, участок покрытия вокруг образца подрезается до подложки, к образцу присоединяется прибор адгезиометр, и с его помощью образец оттягивается от тестируемой поверхности. Сила, прилагаемая к образцу, увеличивается, пока образец не оторвется вместе с куском покрытия или не будет достигнута заранее установленная величина. Сила, которая потребовалась для отрыва образца, характеризует предел прочности покрытия на разрыв.

Испытания адгезии методом решетчатых надрезов показали, что покрытия с концентрацией от 20 до 60 об.% микросфер диоксида кремния имеют края надрезов полностью гладкие, признаков отслаивания нет ни в одном квадрате решетки, тогда как для покрытий с содержанием полых частиц 80 об.% отмечается незначительное отслаивание покрытия в виде мелких чешуек в местах пересечения линий решетки, нарушение наблюдается не более чем на 5 % поверхности решетки. Предел прочности покрытия на разрыв показал, что в композитах с содержанием 20 об.% микросфер σ равно 53 МПа, добавление микросфер с концентрацией от 40 до 60 об.% приводит к уменьшению предела прочности до 46-48 МПа, а при добавлении 80 об.% полых частиц диоксида кремния значение σ составляет 23 МПа.

Определяющую роль в адгезии играет химическая природа адгезива и субстрата, то есть тип и количество функциональных групп на поверхности адгезива и субстрата и их способность к взаимодействию. Для повышения адгезионной прочности можно проводить модификацию частицами с развитой поверхностью, в результате появляются функциональные группы, способные усилению взаимодействия с субстратом. Активность пигментов зависит от начальных параметров и типа пленкообразующего. Многие покрытия, что предназначаются для получения термоустойчивых композиций, содержат аморфные полимеры в стеклообразном виде. Полимерные покрытия с наполнителями, базирующимися на природных силикатах, обуславливают снижение развития микроскопических трещин в наполненной полимерной матрице и возникновение ориентированных тонких пленок на поверхности наполнителя. Это причины изменения физических и механических свойств композиции из-за наполнителя и пигмента, а также изменению плотности упаковки макромолекул.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Госзадание № 122082600014-6 (FZMU-2022-0007).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИФИКАТОРА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

К.С. Пошарникова, К.А. Драчёв, А.В. Казарбин

Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

007504@pnu.edu.ru

Проведены исследования акустических (скорость и коэффициент затухания продольных волн) и механических (модуль Юнга и предел прочности) свойств образцов из эпоксидных смол ЭД-20, модифицированных пластификаторами ДЭГ-1 и ДБФ. Показано влияние концентрации модификатора на распространение волн, проанализированы изменения физико-механических свойств при наличии модифицирующих добавок.

INVESTIGATING THE EFFECT OF PLASTICISER ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY RESIN

K.S. Posharnikova, K.A. Drachev, A.V. Kazarbin

Pacific State University (Khabarovsk)

007504@pnu.edu.ru

The acoustic (longitudinal wave velocity and damping coefficient) and mechanical (Young's modulus and ultimate strength) properties of ED-20 epoxy resin samples modified with DEG-1 and DBF plasticisers have been investigated. The influence of modifier concentration on wave propagation is shown and the changes in physical and mechanical properties in the presence of modifying additives are analysed.

DOI:10.22250/9785934934195_127

Полимерные композиционные материалы находят все большее применение в различных отраслях промышленности, транспорта, медицины и других сферах. При этом качество и характеристики этих материалов напрямую влияют на их применимость и эффективность использования. Введение пластификаторов является одним из способов улучшения характеристик полимерных материалов, но при этом необходимо определить оптимальные условия и пропорции их добавления, чтобы достичь желаемых свойств материала. Отвержденные эпоксидные связующие имеют сравнительно низкую трещиностойкость, что ограничивает, например, использование эпоксидных углепластиков в нагруженных конструкциях [1; 2]. Для повышения трещиностойкости отвержденных эпоксидных связующих в условиях эксплуатации в их состав вводят гибкоцепные олигомеры и полимеры, способные в процессе отверждения связующего образовывать сетчатый блоксополимер с эпоксидным олигомером и присутствующие в отвержденном связующем в виде самостоятельной эластичной или пластичной фазы [3]. Стеклообразная матрица отвержденного эпоксидного полимера обеспечивает жесткость и теплостойкость, а эластичная или пластичная фаза способствует резкому возрастанию упруго-прочностных показателей отвержденного связующего.

Целью данной работы является исследование влияния пластификатора на физико-механические свойства отвержденной эпоксидной смолы. Объектом исследования являются образцы эпоксидной смолы ЭД-20 с добавлением в соотношении 10:1 отвердителя – полиэтиленполиамина (ПЭПА), а также образцы эпоксидной смолы, модифицированной с помощью диэтиленгликоля (ДЭГ-1)

и дибутилфталата (ДБФ) в различных концентрациях.

Исследования акустических свойств отверждаемых составов проводились для образцов олигомера ЭД-20 с добавлением ПЭПА и пластификатора ДЭГ-15 содержанием 10, 15, 20 % от общей массы смеси, а также пластификатора ДБФ – 1, 5, 10 % от общей массы смеси. Экспериментальные измерения проводились в течение месяца от начала приготовления смеси полимерного состава с переменным интервалом измерений. Изготовление образцов осуществлялось по следующей схеме: эпоксидную смолу ЭД-20 смешивали пластификатором в необходимой концентрации последнего, а затем после перемешивания полученного состава до однородной консистенции – с отвердителем ПЭПА в соотношении 10:1 (оптимальное соотношение для холодного отверждения). Приготовленный состав заливали в формы из полипропилена 24×20×15 мм.

Экспериментальные исследования акустических свойств образцов проведены на автоматизированной многоканальной измерительной системе для изучения акустических свойств различных материалов [4]. Скорость акустических волн определялась на основе измерения времени прохождения ультразвукового импульса от излучателя до приемника. Коэффициент затухания α определялся как относительное уменьшение амплитуды первого прошедшего импульса к амплитуде переотраженного импульса при распространении сигнала по образцу. Для обеспечения постоянства акустического контакта между датчиками и формой образцы не вынимались из формы, и в течение всей серии измерений они находились между датчиками. Соответственно при дальнейшем расчете скорости акустических волн необходимо было учитывать две временные поправки: временную задержку в самой измерительной системе и временную задержку, обусловленную толщиной стенок полипропиленовой формы.

Анализ полученных сигналов позволял определять скорость продольной волны для каждого образца в зависимости от расположения пьезоэлектрических датчиков относительно слоев укладки нитей расплава. Погрешность измерения скорости в экспериментах составляла $\Delta C = \pm 10$ м/с. Более подробные описания методики определения скорости и коэффициента затухания акустических волн можно найти в работе [5].

По результатам обработки акустических сигналов были получены значения скоростей продольной волны на различных стадиях отверждения. Анализируя графики зависимостей скоростей распространения продольной волны в образцах, модифицированных пластификатором ДЭГ-1 (рис. 1), можно сказать, что в жидком состоянии процесс отверждения скорости звука нарастает от минимального значения (1740 – 1840 м/с) до постоянного максимального значения (2750 – 2885 м/с). При этом в первые 6 часов значение скорости возрастает максимально быстро. С течением времени полимеризации от 0 до 168 часов для каждого образца скорость нарастает до максимальной точки и в дальнейшем значение остается практически неизменным.

Аналогичные измерения были проведены и для образцов на основе матрицы, модифицированной добавлением ДБФ в различных концентрациях. В этих образцах наблюдаются изменения в скорости распространения звуковых волн, сходные с рис. 1. Приготовленный материал с добавлением пластификатора ДБФ становится менее гибким и более устойчивым к деформациям и напряжениям, нежели ДЭГ-1. Анализируя графики распространения продольной волны, можно отметить, что вначале скорость звука медленно растет с 1731 – 2364 м/с до постоянного максимума в диапазоне от 2800 – 2826 м/с. Также наблюдается более медленный рост скорости звука при добавлении ДБФ (особенно в первые 6 часов), чем при добавлении ДЭГ-1, это результат более низкой подвижности молекул. Стоит отметить, что спустя 168 часов скорость звука также почти не меняется.

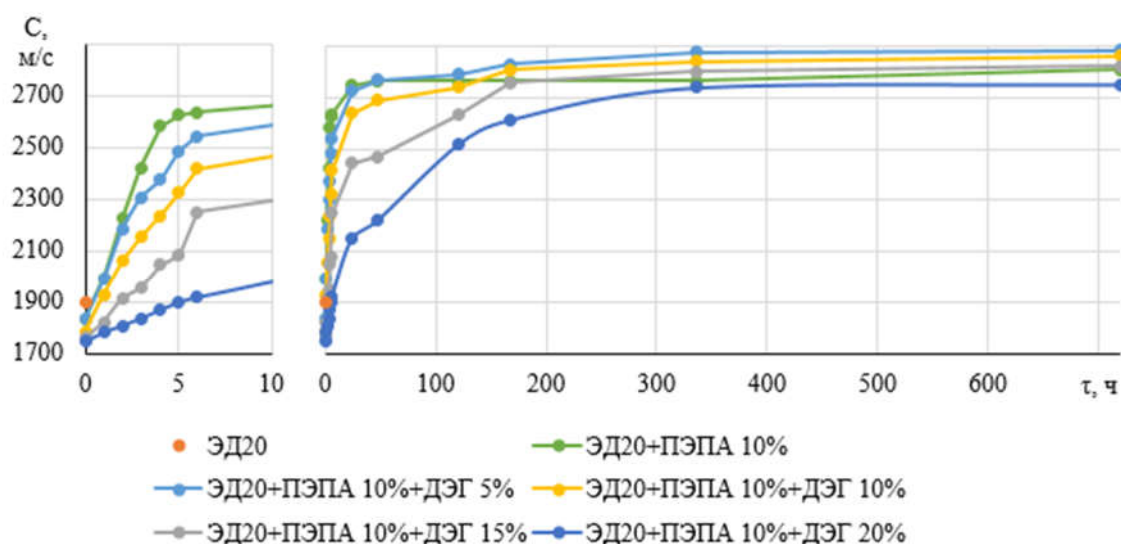


Рис. 1. Зависимость скорости продольной волны от времени отверждения в образцах, модифицированных пластификатором ДЭГ-1.

Зависимости коэффициента затухания (рис. 2) в отличие от зависимостей скорости продольной волны претерпевают значительные изменения в первые два часа. При этом можно наблюдать, что коэффициент затухания сначала растет до максимального значения в первый час, а после интенсивно убывает в периоде времени от 1 до 6 часов. Минимальное значение наблюдается при спаде коэффициента затухания после 48 часов для четырех образцов и в дальнейшем остается практически неизменным. Средняя величина коэффициента затухания в образцах составила в отвержденном состоянии 350 дБ/м.

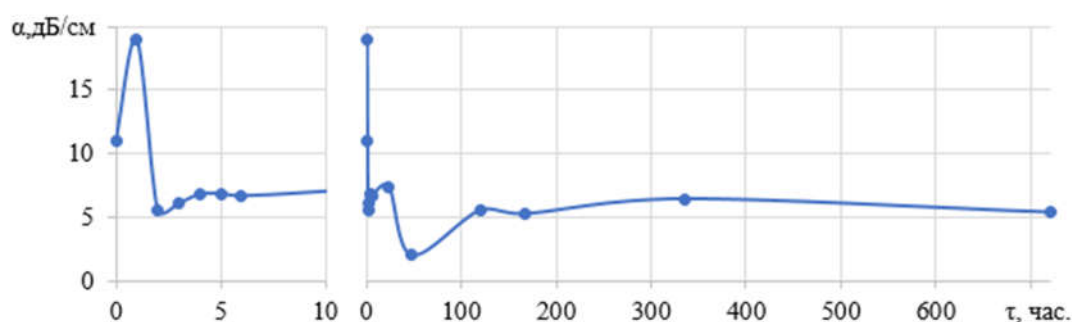


Рис. 2. Типичный вид зависимости коэффициента затухания продольной волны от времени отверждения на примере немодифицированного образца ЭД-20.

Для изучения механических свойств получаемых составов использовались смеси, аналогичные тем, которые применялись в акустических измерениях. Для этого прибегали к методике на одноосное растяжение универсальной испытательной машине Devotrans BP D NU Испытательного центра строительных материалов ФГБОУ ВО ТОГУ. Для получения образцов были созданы специальные металлические формы, дающие образцы, соответствующие ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение». В результате испытаний было установлено, что модифицированные матрицы с добавлением ДЭГ-1 и ДБФ имеют гораздо более высокие показатели прочности и упругости при растяжении, чем немодифицированная матрица с ПЭПА. Для всех образцов полученные зависимости F от Δl линейные и фактически отсутствует область пластической деформации, соответственно образцы находятся в стекловидном, полностью отвержденном состоянии. На основе зависимостей F от Δl для образцов определялись модуль Юнга $E = \sigma / \epsilon$ и предел прочности как $\sigma_{np} = F_{max} / S$, где F_{max} и S – значения силы и сечение при разрушении образцов. Значения E и σ_{np} приведены в таблице.

Результаты испытаний на растяжение образцов полимера

Концентрация пластификатора, %	Время отверждения, сутки	F_{max} , Н	Δl_{max} , мм	σ_{np} , Н/мм ²	E Н/мм ² (МПа)
ЭД20+ПЭПА					
0	1	556	1,73	13,9	804,8
	7	668	1,97	17,2	874,9
ЭД20+ПЭПА+ДЭГ-1					
5	1	692	2,15	17,3	814,3
	7	1432	2,36	35,8	815,7
10	1	737	3,38	18,4	820,5
	7	1546	3,46	38,6	820,7
15	1	878	4,12	21,9	832,6
	7	1528	3,69	38,2	842,5
20	1	1060	4,23	26,5	788,3
	7	1536	4,48	38,3	793,4
ЭД20+ПЭПА+ДФФ					
1	1	823	2,53	20,6	850,4
	7	826	2,61	20,7	905,9
5	1	1386	4,75	34,6	801,1
	7	1395	4,68	34,9	807,6
10	1	1428	5,81	35,7	801,6
	7	1415	6,15	35,4	806,3

Таким образом, проведенные исследования показывают, что физико-механические свойства образцов эпоксидных составов незначительно зависят от концентрации в них пластификатора в отвержденном состоянии. В первые двое-трое суток полимеризации в акустических характеристиках образцов происходят значительные изменения. Полученные данные позволяют контролировать процесс полимеризации эпоксидных составов на основе акустических методов контроля. Необходимо также производить дополнительные исследования как прочностных, так и деформационных свойств данных составов.

-
1. Бабаевский П. Г. Трещиностойкость отвержденных полимерных композиций. – М. : Химия, 1991. – 230 с.
 2. Тростянская Е. Б. Связующие на основе эпоксидных смол: учебное пособие. / Е. Б. Тростянская, Ю. А. Михайлин. – М. : МАТИ, 1993. – 101 с.
 3. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – 822 с.
 4. Драчев К. А. Автоматизированная измерительная система для проведения акустических измерений / К.А. Драчев, В.И. Римлянд, В.В. Савченко // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2017. – № 1(44). – С. 13-20.
 5. Драчев К. А. Измерения акустических параметров с использованием радиоимпульса / К. А. Драчев, В. И. Римлянд // Измерительная техника. – 2017. – № 6. – С. 60-64.

УСИЛЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ НИКЕЛЯ ИЗ РАСТВОРА ДИХЛОРИДА НИКЕЛЯ

Н.Г. Галкин,¹ Д.Т. Ян², К.Н. Галкин¹

¹Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН (г. Владивосток)

²Дальневосточный государственный университет путей сообщения (г. Хабаровск)

Представлены результаты сравнительного исследования композитов, полученных в результате погружения пористого кремния в водные растворы солей лития, железа и никеля. Установлено, что в этих растворах происходит образование связей кремния с атомами металлов, которое обеспечивает стабилизацию поверхностных связей и последующий рост фотолюминесценции. Приведена количественная оценка концентрации металла в структуре пористого кремния

ENHANCEMENT OF THE LUMINESCENT PROPERTIES OF POROUS SILICON AFTER THE ELECTRODEPOSITION OF NICKEL FROM A SOLUTION OF NICKEL DICHLORIDE

N.G. Galkin¹, D.T. Yan², K.N. Galkin¹

¹Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

(Vladivostok)

²Far Eastern State Transport University (Khabarovsk)

The results of a comparative study of composites obtained by immersing porous silicon in aqueous solutions of lithium, iron, and nickel salts are presented. It has been established that silicon bonds with metal atoms are formed in solutions, which ensures the stabilization of surface bonds and the subsequent growth of photoluminescence. A quantitative estimate of the metal concentration in the structure of porous silicon is given.

DOI:10.22250/9785934934195_131

Введение

Одним из перспективных методов для улучшения излучающих свойств и стабилизации поверхности ПК является введение внутрь пор кремния других элементов при погружении в водные растворы, – например, солей металлов [1; 2]. Основным преимуществом этого метода является постепенное изменение поверхности и структуры пористого кремния по мере проникновения металла внутрь пор.

Соли бромид лития (LiBr) и нитрата железа (Fe(NO₃)₃) характеризуются значительной степенью диссоциации в водных растворах и высокой реакционной способностью. Взаимодействие пористого кремния с водными растворами LiBr и Fe(NO₃)₃ приводит к проникновению ионов металла внутрь пор в кремнии, формированию металлических покрытий различной толщины и к последующему увеличению интенсивности фотолюминесценции (ФЛ) пористого кремния (ПК) [3; 4], что является необходимым условием для создания оптоэлектронных приборов на основе пористого кремния.

В последнее время значительный научный интерес проявляется к никелю в связи с его использованием во многих современных технологических устройствах. Например, в [5] в качестве оксида переходного металла использовалась пленка оксида никеля р-типа (NiO) с шириной запрещенной зоны 3,71 эВ. NiO можно использовать во многих областях [6; 7], – например, в магнитных материалах, солнечных элементах и сенсорах.

В данной работе представлены результаты комплексных исследований нанокompозитов никель/пористый кремний, полученных электродным осаждением и последующим отжигом с целью увеличения интенсивности фотолюминесценции.

Эксперимент

Методика получения мезопористого кремния (мезо-ПК) описана в работах [3; 4] и по ней было подготовлено 7 образцов. Электроосаждение никеля (ЭО Ni) проводили на четырех свежеподготовленных образцах мезо-ПК из 0,1 М водного раствора NiCl_2 в режиме обратного смещения при плотности тока $0,6 \text{ мА/см}^2$ в течение 5 (№4-1), 6 (№ 4-2), 7 (№4-3) и 8 (№4-4) мин. Один из полученных образцов мезо-ПК (№ 4-0) использовали в качестве эталона. Изображения поверхности и поперечных сечений получали с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения (СЭМ) Hitachi S 3400N с энергией потока электронов 10 – 30 кэВ и увеличением до 300 000, оснащенного рентгеновским спектрометром (ЭДС) Thermo Ultra Dry (США). Морфологию и поперечный скол образцов исследовали с помощью СЭМ и ЭДС как сразу после никелирования, так и после отжига при температуре 450°C в течение 20 мин. в атмосфере аргона ($P = 0,1\text{--}0,2 \text{ Торр}$). Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) и фотолюминесценции (ФЛ) регистрировали при комнатной температуре на установке NTEGRA Spectra II с длинами волн возбуждения 473 и 632,8 нм для КРС и 402 и 473 нм – для ФЛ, после хранения образцов на воздухе не более одних суток и сразу после отжига образцов мезо-ПК на кремнии в специальной температурной ячейке Linkam THM600 в аргоне, совмещенной с установкой NTEGRA Spectra II.

Результаты

После анодного травления все образцы со слоями мезо-ПК, кроме одного (контрольный), подвергали электроосаждению (ЭО Ni) при комнатной температуре. Для записи СЭМ-изображений были отобраны три образца из четвертой серии: №4-0 (эталон) и образцы, подвергнутые электроосаждению в водном растворе NiCl_2 : №4-1 (5 мин.), №4-2 (6 мин.) №4-3 (7 мин.) и №4-4 (8 мин.) как до, так и после отжига в аргоне. Для образца № 4-4 с максимальным временем анодирования (8 мин.) были проведены исследования СЭМ и ЭДС до и после отжига в аргоне и определены изменения концентрации никеля в поверхностном и приповерхностном слое мезо-ПК (таблица).

Концентрация никеля для различных значений глубины проникновения в поры кремния до и после термического окисления

Образец №4-4	Глубина проникновения никеля, мкм			
	1,0-1,5	2,5-3,0	7,5	12
До отжига	6,56 %	9,5 %	35,83 %	0
После отжига	0,55 %	0	14,9 %	-

Структурно-фазовое состояние композитов ПК/Ni исследовали с помощью спектроскопии КРС ($\lambda = 473 \text{ нм}$) для эталонных образцов и образцов, покрытых Ni (ЭО Ni - 5,6,7 и 8 мин.).

До отжига, по данным КРС, в образцах мезо-ПК/Ni было обнаружено наличие пика при 630 см^{-1} , связанного с субоксидами никеля (NiO_x) [7], интенсивность которого увеличивалась пропорционально продолжительности ЭО Ni (рис.1, а). Кроме того, при продолжительности 7 и 8 мин. обнаружено увеличение уширенного пика при $150 - 154 \text{ см}^{-1}$ и образование плеча при $420 - 500 \text{ см}^{-1}$, связанное, соответственно, с образованием скоплений аморфного силицида никеля [8; 9] и аморфизацией мезо-ПК [7], что не наблюдалось при малых временах (5 и 6 мин.) ЭО Ni. В результате ЭО Ni с различной продолжительностью отмечается уширенный пик в области $930 - 980 \text{ см}^{-1}$, что соответствует сохранению после ЭО Ni колебаний связей Si–OH в мезо-ПК [10].

Спектры КРС ($\lambda = 473 \text{ нм}$) после отжига для указанных выше образцов сильно различаются (рис. 1, б). Для образца с ЭО Ni в течение 5 мин. и отжигом при $T = 450^\circ\text{C}$ появляются узкие пики при 152 и 222 см^{-1} , небольшой уширенный пик с положением около 113 см^{-1} , а также слабый пик при

302 cm^{-1} , который относится к возбуждению 2ТА-мультифонона в кремнии [11].

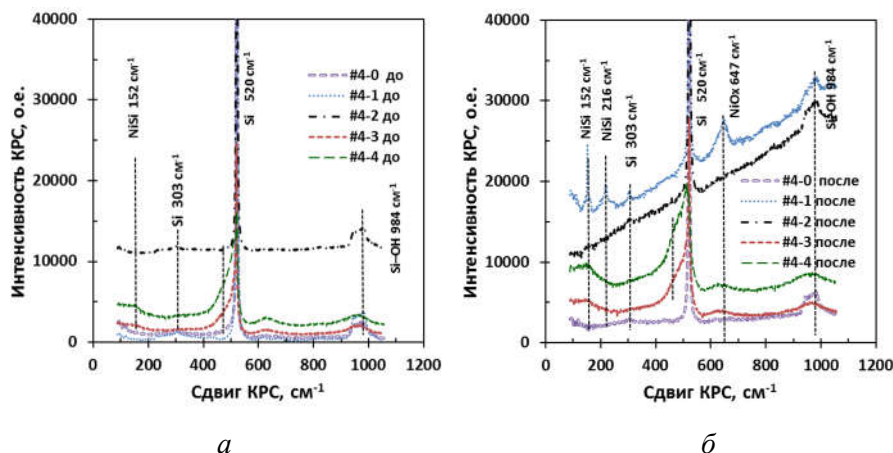


Рис.1. Спектры КРС композитов мезо-ПК/Ni, снятые при лазерном возбуждении с $\lambda = 473$ нм до (а) и после (б) отжига в аргоне при 450 °С.

Первая группа пиков относительно близка к характерным для моносилицида никеля (NiSi) пикам при 100, 140 и 215 cm^{-1} [8; 9], но с заметным «голубым» сдвигом, который может быть обусловлен квантоворазмерным эффектом на нанозернах (пластинки или чешуйки) образовавшегося NiSi. Характерным отличием спектра КРС – появление интенсивного и уширенного пика (590 – 690 cm^{-1}) с максимумом при 647 cm^{-1} , что соответствует образованию широкого спектра квазидвумерных оксидов никеля (NiO) и субоксидов (NiO_x) [7] в приповерхностной области мезо-ПК. При этом в образце после 6 мин. электроосаждения никеля (ЭО Ni) наблюдаются очень слабый пик КРС при 160 – 162 cm^{-1} и пик при 308 cm^{-1} , а пик около 630 cm^{-1} становится практически незаметным. Для образцов с 5 и 6 мин. ЭО Ni после отжига уширенный пик в области 930 – 980 cm^{-1} остается неизменным, что свидетельствует о сохранении связей Si–OH [10] в мезо-ПК после отжига. В образцах с 7 и 8 мин. ЭО Ni и последующим отжигом не наблюдается дополнительного уширения пика от максимума около 520 cm^{-1} , что свидетельствует о сохранении доли аморфизации в слое мезо-ПК.

Отличительной особенностью обоих спектров КРС является уширение и уменьшение амплитуды пиков с максимумами при 154 – 159, 646 – 652 и 958 – 962 cm^{-1} , уменьшение плотности связей Ni–O [10, 11] на границе с мезо-ПК (пик 646 – 652 cm^{-1}) и снижение плотности связей Si–OH (пик 958 – 962 cm^{-1}). Таким образом, в спектрах КРС наблюдается образование как NiO_x, так и NiSi, фазовое и кристаллическое состояние которых зависит от толщины ЭО Ni и плотности связей Si–OH.

Основными параметрами, представляющими интерес для технологического применения мезопористого кремния (мезо-ПК), являются спектральный состав и интенсивность ФЛ, чувствительные, как к зонной структуре ПК [1], так и к изменению связей на его поверхности после анодирования, химической обработки и хранения [2]. Обычно спектры ФЛ регистрировали для ПК на одной длине волны [2; 4]. Но так как мы проводили ЭО Ni и по данным ЭДС наблюдается резкое распределение по глубине, то спектры ФЛ регистрировались на двух линиях лазерного возбуждения: 405 нм и 473 нм.

Регистрация спектров ФЛ до отжига при длине волны лазера 405 нм показала, что при ЭО Ni 5 мин. (образец №4-1) и 6 мин. (образец №4-2) наблюдается широкий пик ФЛ с несколькими максимумами, а также «голубой» сдвиг на 0,20 – 0,40 эВ и уменьшение амплитуды ФЛ по сравнению с эталонным образцом мезо-ПК № 4-0 (рис. 2, а). Для образца с 7-минутной ЭО Ni (№4-3) сдвиг пика ФЛ отсутствует, а для образца с 8-минутным электроосаждением Ni (№4-4) наблюдается «красный» сдвиг на 0,14 эВ при сохранении формы пика ФЛ, характерной для мезо-ПК. При этом увеличение интенсивности ФЛ варьирует от 2 раз в течение 7 мин. ЭО Ni до 18 раз в течение 8 мин. ЭО Ni по сравнению с эталонным образцом.

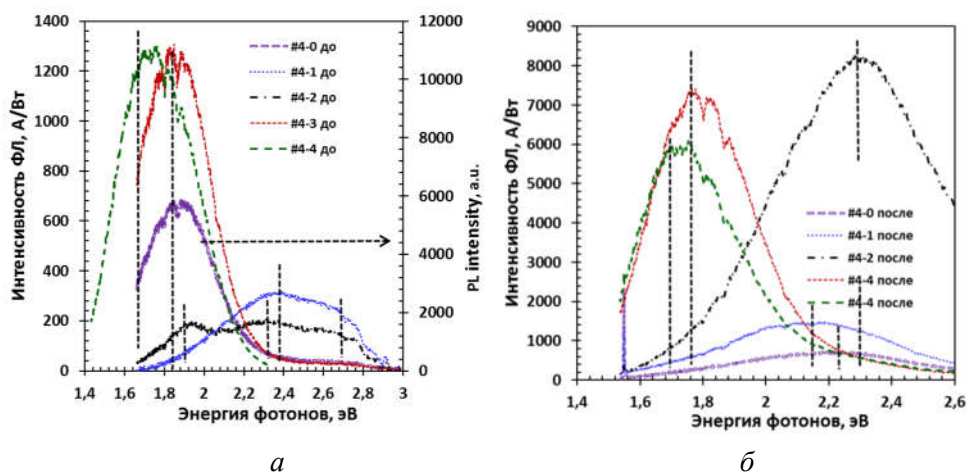


Рис.2. Спектры ФЛ композитов мезо-ПК/Ni, снятые при лазерном возбуждении с $\lambda = 405$ нм (4 мкВт) до (а) и после отжига (б) в аргоне при 450 °С.

После отжига слоя мезо-ПК образцов с разной длительностью ЭО Ni при $T = 450$ °С (рис. 2, б) наблюдается резкое увеличение положения пика ФЛ на 0,32 эВ («синее» смещение) для эталонного образца мезо-ПК и примерно такие же амплитуды ФЛ при $\lambda = 405$ нм, что свидетельствует о перестройке структуры мезо-ПК и уменьшении среднего размера нанокристаллов в матрице [1]. Также отмечается резкое перераспределение интенсивностей с небольшим смещением максимумов ФЛ для образцов с 5 и 6 мин. ЭО Ni. Максимальное увеличение интенсивности ФЛ (в 42 раза) и «синий» сдвиг примерно на 0,15 эВ (по сравнению с отожженным эталонным мезо-ПК) у образца с 6-минутным ЭО Ni. У образца с 5-минутным ЭО Ni примерно трехкратное увеличение амплитуды пика ФЛ и «красный» сдвиг на 0,06 эВ (по сравнению с отожженным мезо-ПК). Для образцов с 7 и 8 мин. ЭО Ni и отжигом при 450 °С наблюдается разнонаправленное изменение амплитуды ФЛ без изменения энергетического положения максимумов ФЛ. Для образца с 8-минутной ЭО Ni обнаружено снижение амплитуды ФЛ в 2 раза, а для образца с 7-минутной ЭО Ni – увеличение интенсивности ФЛ в 5,7 раза.

Заключение

Представлены результаты комплексных исследований мезопористых кремний-никелевых (мезо-ПК-Ni) нанокомпозитов, сформированных методом анодного травления с последующим электроосаждением (ЭО) Ni из 0,1 М водного раствора NiCl_2 . Исследованы морфология, поперечный скол образцов и распределение в них Ni, спектры КРС и ФЛ до и после отжига при $T = 450$ °С в течение 20 мин. в атмосфере аргона ($P = 0,2$ Торр). Анализ данных спектроскопии КРС ($\lambda = 473$ нм) для всех времен ЭО до и после отжига показал наличие пика $630 - 690 \text{ см}^{-1}$, связанного с субоксидами никеля (NiO_x), что было подтверждено данными СЭМ и ЭДС. До отжига пики ФЛ при $\lambda = 405$ нм и 473 нм сильно увеличивались по сравнению с образцами мезо-ПК без отжига для 7 и 8 мин. ЭО Ni с небольшим «красным» сдвигом 0,03 – 0,15 эВ и уменьшались по амплитуде с большим «синим» сдвигом на 0,2 – 0,9 эВ за 5 и 6 минут ЭО Ni. Комплексный анализ данных показал, что «красный» сдвиг обусловлен образованием центров излучательной рекомбинации в виде ионов Ni в матрице мезо-ПК, а «синий» связан с образованием нанокристаллов NiO_x , являющихся прямозонными полупроводниками с сильной ФЛ. После отжига образцов при всех длительностях ЭО Ni отмечено многократное увеличение амплитуд пиков ФЛ при $\lambda = 405$ нм и 473 нм для продолжительности ЭО 6 и 7 мин. с небольшим изменением их положения, а также сильный «синий» сдвиг (0,38 эВ) пика ФЛ мезо-ПК (405 нм), связанный с уменьшением среднего размера нанокристаллов кремния в результате отжига в аргоне.

1. Chen Q., Zhu D.L., Zhang Y.H. Strong and stable ultraviolet luminescence in porous silicon in situ passivated by manganese// *Applied Physics Letters*. – 2000. – V.77. – Is.6. – 854-856.
2. Rahmani M., Moadhen A., Zaïbi M.-A., Elhouichet H., Oueslati M. Photoluminescence enhancement and stabilization of porous silicon passivated by iron// *Journal of Luminescence*. – 2008. – V. 128. – Is.11. – 1763-1766.
3. Galkin N.G., Yan D.T., Galkin K.N., Chusovitina S.V. Relationship between the photoluminescence spectra and IR spectroscopy of mesoporous silicon samples during long-term storage: the effect of immersion in an aqueous LiBr solutions// *Solid State Phenomena*. – 2020. – V. 312. – 38-44.
4. Galkin N.G., Yan D.T., Galkin K.N., Chusovitina S.V. Relationship between the photoluminescence spectra and IR spectroscopy of mesoporous silicon samples during long-term storage: the effect of immersion in an aqueous $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ solutions// *Solid State Phenomena*. – 2020. – V. 312. – 54-61.
5. Subramanian B., Mohammed I.M., Murali K.R., Vidhya V.S., Sanjeeviraja C., Jayachandran M. Structural, optoelectronic and electrochemical properties of nickel oxide films // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2009. – V.20. – P. 953-957.
6. Rahman M., Chou S.L. Zhong C., Wang J.Z., Wexler D., Liu H.K. Spray pyrolyzed NiO-C nanocomposite as an anode material for lithium-ion battery with enhanced capacity retention // *Solid State Ionics*. – 2010. – V. 180. – Is. 40. – P. 1646-1651.
7. Manikandan A., Vijaya J.J., Kennedy L.J. Comparative investigation of NiO nano- and microstructures for structural, optical and magnetic properties // *Physica E*. – 2013. – V.49. – 117-123.
8. Grekov I.A., Yanushkevich K.O., Chubenko E.B., Bondarenko V.P. Formation and electrochemical properties of films of nickel and cobalt oxides // *Report of BSUIR*. – 2022. – V.20. – Is.3. – 5-12.
9. Lee P.S., Mangelinck D., Pey K.L., Shen X., Ding J., Osipowicz T., See A. Micro-Raman spectroscopy investigation of nickel silicides and nickel (platinum) silicides // *Electrochemical and Solid-State Letters*. – 2000. V.3. – P. 153-155.
10. Галкин Н.Г., Ян Д.Т., Галкин К.Н., Чусовитина С.В. Влияние типа поверхностных связей в мезопористом кремнии на кинетику его фотолюминесценции при длительном хранении // *Химическая физика и мезоскопия*. – 2020. – Т.22, №2. – С. 143-154.
11. Temple P.A., Hathaway C.E. Multiphonon Raman spectrum of silicon // *Phys. Rev. B*. – 1973. – V.7. – P.3685-3697.

УДК 544.526.5

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ АНИОНОВ Cl^- , HCO_3^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-} НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ РАЗНОИМЕННО ЗАРЯЖЕННЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ

А.В. Зайцев

*Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН,
Институт водных и экологических проблем ДВО РАН (г. Хабаровск)
alex-im@mail.ru*

Представлены результаты снижения эффективности фотокаталитического окисления модельных органических загрязнителей при использовании эталонного фотокатализатора P25 (TiO_2) в растворах разных концентраций натриевых солей со следующим анионным составом: Cl^- , HCO_3^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-} . Рассмотрено прикладное значение влияния качественных и количественных показателей анионного состава очищаемых промышленных или природных вод на эффективность процесса фотокаталитической водоочистки.

EFFECT OF THE CONCENTRATION OF ANIONS Cl^- , HCO_3^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-} ON THE EFFICIENCY OF PHOTOCATALYTIC OXIDATION OF OPPOSITELY CHARGED ORGANIC DYES

A. V. Zaitsev

*Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Water and Ecology problems FEB RAS (Khabarovsk)
alex-im@mail.ru*

Results are presented on the decrease in the efficiency of photocatalytic oxidation of model organic pollutants using the reference photocatalyst P25 (TiO_2) in solutions of different concentrations of sodium salts with the following anionic composition: Cl^- , HCO_3^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-} . The applied significance of the influence of qualitative and quantitative indicators of the anionic composition of purified industrial or natural waters on the efficiency of the photocatalytic water treatment process is considered.

DOI:10.22250/9785934934195_135

Введение

Современное развитие метода фотокаталитической водоочистки концентрируется в большей степени на синтезе новых фотокаталитических материалов (сенситизированных к видимому свету) и исследовании их свойств в модельных условиях водоочистки (дистиллированная вода) [1 – 3]. На практике, в бытовых и промышленных приложениях, до сих пор основным фотокаталитическим материалом для водо- и воздухоочистки остается оксид титана [4], несмотря на большое разнообразие синтезированных фотокатализаторов, работающих, по заявлениям авторов [5], лучше оксида титана. Широкое применение как оксида титана, так и новых фотокатализаторов в условиях промышленных и бытовых водоочистных сооружений сдерживается малой изученностью фотокаталитических процессов в присутствии растворенных в загрязненных водах разнообразных примесей органической и неорганической природы. Именно по этой причине на сегодняшний день фотокаталитическая стадия водоочистки является финишной стадией в различных системах водоподготовки. На основании многолетних исследований гидрохимических показателей различных вод, испытывающих антропогенную нагрузку (г. Хабаровск), было показано, что наиболее распространенными ионными соединениями, растворенными в воде, являются катионы: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} и анионы: Cl^- , HCO_3^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-} [6 – 10]. Цель этого исследования – определение качественных и количественных показателей растворенных в воде анионных примесей, влияющих (замедляющих/индифферентных/ускоряющих) на фотокаталитические процессы применительно к реальным условиям водоочистки.

Методика

Определение диапазонов концентраций исследуемых ионов было основано на данных ИВЭП ДВО РАН за 1999–2019 г.г. по основным гидрохимическим показателям крупных и малых рек территории г. Хабаровска [6 – 10]. Фотокаталитическая активность исследовалась с использованием органических красителей: метиленовый синий (МС) - ТУ 2463-044-05015207-97; метиловый оранжевый (МО) - ТУ 6-09-5171-84; а также фотокатализатора – оксида титана марки Aeroxide® P25, Acros Organics. Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-} ионы вносились в фотокаталитический раствор посредством растворения соответствующих кристаллических солей: хлорида натрия (ГОСТ 4233-77), гидрокарбоната натрия (ГОСТ 4201-79), нитрита натрия (ГОСТ 4197-74), нитрата натрия (ГОСТ 4168-66), сульфата натрия (4166-76), гидрофосфата натрия (ГОСТ 4172-76) для достижения концентраций по кристал-

лическому веществу: 0, 1, 10, 100, 1000, 10000 мг/л. Установление сорбционно-десорбционного равновесия осуществлялось перед каждым фотокаталитическим экспериментом в течение 1 часа для каждого органического красителя. Устойчивость молекул органических красителей в присутствии исследуемых ионов разных концентраций подтверждалась отсутствием изменений спектров поглощения МС и МО в диапазоне 200-1000 нм после 12-часовой выдержки красителей в растворах солей в темноте. Исходная молярная концентрация органических красителей составляла 40 мкмоль/л, что соответствовало массовой концентрации (ω): $\omega_{\text{МС}} = 12,8$ мг/л; $\omega_{\text{МО}} = 13,1$ мг/л. Объем исследуемого фотокаталитического раствора составлял 100 мл, а масса порошка фотокатализатора 5 мг. Перемешивание исследуемого раствора осуществлялось с помощью магнитной мешалки (200 об/мин.). Исследование спектров красителей, темновой/сорбционной, световой стадий фотоокисления, а также саморазложения органических красителей осуществлялось с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-1240, при длинах волн: МС – 664 нм; МО – 464 нм. Световая фотокаталитическая стадия проводилась под излучением в диапазоне 320-850 нм со средней плотностью мощности 800 Вт/м², при использовании лампы Aqua Arc Osram, Sylvania. Фотокаталитический эксперимент проводился в шестикюветной вращающейся под источником излучения установке, что позволяло осуществлять 3-кратную повторность для каждого красителя при указанных концентрациях исследуемых ионов с минимальной погрешностью.

Гидрохимические исследования

Выбор интервалов концентраций исследуемых ионов для фотокаталитических экспериментов основывался на исследовании ионного состава и гидрохимических показателей рек, испытывающих урбанистическое влияние (Россия, г. Хабаровск, 1999-2019 гг.). Данные исследования проводились на более чем десяти реках, дренирующих территорию города в разные сезоны и периоды водности, а также при разной степени антропогенного загрязнения исследуемых вод [6 – 10]. Анализ накопленных данных показал, что минимальные значения концентраций ионов составляют: Na^+ – 1,5 мг/л; Cl^- – 1,2 мг/л; HCO_3^- – 13,6 мг/л; NO_2^- – <0,03 мг/л; NO_3^- – 0,04 мг/л; SO_4^{2-} – 1,5 мг/л; HPO_4^{2-} – 0,03 мг/л. Максимальные значения концентраций: Na^+ – 180 мг/л; Cl^- – 366 мг/л; HCO_3^- – 423 мг/л; NO_2^- – 0,73 мг/л; NO_3^- – 15,3 мг/л; SO_4^{2-} – 55 мг/л; HPO_4^{2-} – 17,1 мг/л.

Фотокаталитические исследования

В связи с невозможностью изучить влияние на фотокаталитический процесс перечисленных анионов по отдельности, в работе, при описании экспериментальных данных, подразумевается совместное влияние исследуемого аниона с его противоионом – (Na^+). Приведенные в работе концентрации исследуемых анионов обозначаются в соответствии с концентрациями их кристаллических натриевых солей. Анализируя эффективность фотодеструкции исследуемых модельных органических красителей (рис. 1), можно констатировать, что: 1) при концентрации исследуемых анионов – 1 мг/л (что в ≈ 10 раз меньше концентрации модельных органических красителей) влияния на эффективность фотоокисления красителей не наблюдается; 2) катионный органический краситель разрушается при фотокаталитическом воздействии быстрее анионного в присутствии всех исследуемых анионов; 3) хлорид и нитрат анионы не влияют на эффективность фотоокисления МС в диапазоне концентраций 1-10 мг/л и не влияют на эффективность фотоокисления МО в диапазоне концентраций 1-100 мг/л; 4) нитрит анион оказывает сильный замедляющий эффект на эффективность фотоокисления обоих модельных органических красителей в диапазоне концентраций 100-10000 мг/л; 5) сульфат анион практически не оказывает воздействия на эффективность фотоокисления обоих красителей в диапазоне концентраций 10-10000 мг/л; 6) повторные эксперименты подтверждают наличие алогичного эффекта по увеличению эффективности фотоокисления МС в присутствии гидрофосфат аниона в диапазоне концентраций 100-10000 мг/л; 7) нитрат анион замедляет эффективность фотоокисления МС, начиная с концентрации в 100 мг/л, и не оказывает существенного замедляющего эффекта на фотоокисление МО во всех исследуемых диапазонах концентраций; 8) гидрокарбонат анион оказывает замедляющий эффект

на эффективность фотоокисления обоих красителей в диапазоне концентраций 100-10000 мг/л. На основании проведенных исследований (рис. 1) можно выделить три группы анионов (в исследуемых диапазонах концентраций) по степени их влияния на эффективность фотоокисления катионного и анионного модельных органических красителей в условиях водоочистки реальных водных стоков (таблица): практически не влияющие анионы, анионы среднего влияния, сильно влияющие анионы.

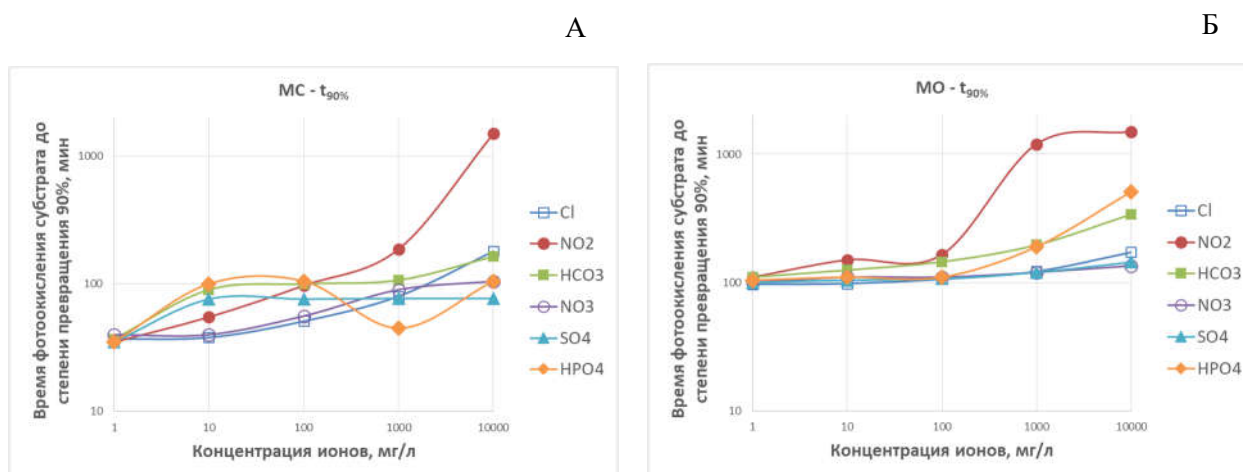


Рис. 1. Время фотодеструкции красителей при степени превращения 90 % для: MC – (А) и MO - (Б) в присутствии исследуемых ионов при различных концентрациях.

Степень влияния анионов на эффективность фотоокисления красителей

Краситель	Практически не влияющие анионы	Анионы среднего влияния	Сильно влияющие анионы
Катионный - MC	SO_4^{2-}	HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , HPO_4^{2-}	NO_2^-
Анионный - MO	NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-	HCO_3^- , HPO_4^{2-}	NO_2^-

Заключение

В результате исследований показаны различные зависимости влияния как ионов, так и их концентраций на эффективность фотоокисления катионного (MC) и анионного (MO) модельных органических красителей. Начиная с концентрации 10 мг/л (по кристаллическому веществу), анионы HCO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-} оказывают замедляющий эффект на фотоокисление катионного красителя. Существенный замедляющий эффект на фотоокисление анионного красителя все исследуемые анионы начинают оказывать при концентрациях от 100 мг/л. Проведенные исследования показали также наличие дополнительных эффектов при добавлении исследуемых анионов (NO_2^- , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-}) в фотокаталитический раствор при концентрациях в диапазоне от 100 до 10000 мг/л, что требует дополнительных экспериментальных проверок и обоснований.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-00244, <https://rscf.ru/project/23-24-00244/>.

Спектрофотометрические исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования ИВЭП ДВО РАН - «Центр экологического мониторинга».

1. Krishna K. J., Swapnamoy D., Ishita B., Cheryl B. P., Ram K. S., Himadri T. D., Swati D., Vinod K. Impact of aquatic microplastics and nanoplastics pollution on ecological systems and sustainable remediation strategies of biodegradation and photodegradation // Science of The Total Environment. – 2022. –V. 806. –Part 3. – P. 151358.

2. Zaitsev A.V., Astapov I.A. Prospects for creating regenerated photocatalytic materials for solar water treatment units // Materials Letters. –2022. –V. 310. –P. 131509.

3. Parul Kamalpreet K., Rahul B., Prit P. S., Sandeep K. Photodegradation of organic pollutants using heterojunctions: A review // Journal of Environmental Chemical Engineering. –2020. –V. 8. –Is. 2. –P. 103666.
4. Karthikeyan C., Prabhakarn A., Ramachandran K., Abdullah M. A., Karuppuchamy S. Recent advances in semiconductor metal oxides with enhanced methods for solar photocatalytic applications // Journal of Alloys and Compounds. –2020. –V. 828. –P. 154281.
5. Junhua Y., Yaozu G., Rui G., Xuanwen L. A review of visible light-active photocatalysts for water disinfection: Features and prospects // Chemical Engineering Journal. –2019. –V. 373. –P. 624-641.
6. Шестеркин В.П., Афанасьева М.И., Шестеркина Н.М. Особенности качества воды малых рек Хабаровска в зимний период // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. –2019. –№ 3. – С. 42-51.
7. Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М., Шамов В.В. Загрязнение малых рек Хабаровска и его окрестностей // Историко-культурное и природное наследие Дальнего Востока на рубеже веков: проблемы изучения и сохранения. Материалы вторых Гродековских чтений. Хабаровский краевой краеведческий музей им. Н.И. Гродекова; Дальневосточная государственная научная библиотека; Хабаровский государственный педагогический университет; Приамурское географическое общество: Отв. Ред. Н.И. Рубан, – 1999. – С. 328-330.
8. Морина О.М., Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М., Иванова Е.Г. Проблемы качества воды малых рек г. Хабаровск и его окрестностей // Города Дальнего Востока: экология и жизнь человека. Материалы конференции (Дружининские чтения), –2003. –С. 104-106.
9. Шестеркин В.П., Афанасьева М.И., Шестеркина Н.М. Проблемы качества вод малых рек Хабаровска во время весеннего половодья // Экология и безопасность жизнедеятельности городов: проблемы и решения. Материалы 19-й Междунар. конф. городов-побратимов «Формирование и управление экологической политикой городов» и 6-й Всероссийской научно-практ. конф. с международным участием, –2019. – С. 255-258.
10. Петин А.Н., Лебедева М.Г., Крымская О.В. Анализ и оценка качества поверхностных вод: учебное пособие. – Белгород: Изд-во БелГУ, – 2006. – С.252

УДК 621.762

ПОЛУЧЕНИЕ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН ИЗ ТВЕРДОГО СПЛАВА T5K10 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕСС-ФОРМ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ АДДИТИВНЫМ МЕТОДОМ ИЗ PLA И ABS

М.И. Дворник, Е.А. Михайленко, А.А. Бурков, Д.А. Кользун

*Хабаровский федеральный исследовательский центр Институт материаловедения ДВО РАН
(г. Хабаровск)
Maxxxx80@mail.ru*

В работе исследованы свойства режущих пластин из сплава T5K10, изготовленных с применением пресс-форм, напечатанных на 3D-принтере из PLA и ABS. Показано, что относительная плотность режущей пластины при использовании PLA соответствуют требованиям существующего стандарта и обеспечивает удовлетворительную твердость (1400 HV). При использовании ABS-пластика свойства готового изделия уступают свойствам коммерческой пластины и пластины, изготовленной с применением пресс-формы из PLA.

OBTAINING WC-5TiC-10Co CEMENTED CARBIDE CUTTING INSERTS USING MOLDS MADE BY THE ADDITIVE METHOD FROM PLA AND ABS

M.I. Dvornik, E.A. Mikhailenko, A.A. Burkov, D.A. Kolzun

*Khabarovsk Federal Research Center Institute of materials science of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Khabarovsk)
Maxxxx80@mail.ru*

The paper investigates the properties of cutting inserts made of T5K10 alloy, made using molds printed on a 3D-printer from PLA and ABS. It is shown that the relative density of the cutting insert when using PLA meets the requirements of the existing standard and provides a satisfactory hardness (1400HV). When using ABS-plastic, the properties of the finished product are inferior to those of a commercial plate and a plate made using a PLA mold.

DOI:10.22250/9785934934195_139

Твёрдые сплавы WC-TiC-Co широко применяются для обработки резанием сталей [1]. В промышленности твердосплавные изделия получают спеканием после холодного прессования порошковых смесей и пластификатора. В массовом производстве порошковых изделий используют пресс-формы из закаленной стали или из твердого сплава, которые за счет своей твердости, жесткости и износостойкости обеспечивают высокую точность и необходимую плотность при высокой производительности и большом ресурсе. Недостатки таких пресс-форм – высокая цена и ограничение формы изделий.

Исследования показали, что твердосплавные изделия сложной формы можно изготавливать с помощью аддитивных технологий [2], часто используемых для создания изделий из конструкционных материалов. Определено, что твердосплавные изделия, полученные методом селективного лазерного спекания, обладают низкой твердостью из-за высокой пористости и изменений химического состава. В результате отсутствия давления плотность заготовок и спеченных образцов, полученных с использованием струйной 3D-печати растворами [3-5], экструзии [6] или гелевой 3D-печати [7], ниже, чем плотность заготовок и образцов, получаемых по обычной технологии. Пластиковые формы используют для шликерного литья заготовок твердосплавных и керамических изделий, которые затем спекают обычным методом [8; 9]. Мы предлагаем упростить данный подход и использовать изготовленные экструзией пластиковые пресс-формы для прессования в них гранулированной смеси твердого сплава и связующего материала. Из-за низкой прочности и высокой адгезии пластика к заготовкам возможны проблемы с сохранением формы, плотностью, структурой и свойствами получаемых изделий. Цель работы – исследование возможности изготовления многогранной неперетачиваемой пластины сложной формы с применением пресс-формы, созданной методом экструзии пластика.

Разработанная технологическая схема состоит из четырех этапов: разработка пресс-формы, изготовление пресс-формы, прессование смеси порошка и пластификатора и спекание. Образцы твердого сплава готовили из порошковой смеси WC-5TiC-10Co. Пресс-формы для прессования заготовок многогранных неперетачиваемых пластин были получены методом послойного наплавления с помощью 3D-принтера Flash Forge Dreamer из полилактида (PLA) и акрил-бутадиен-стирола (ABS) компании Bestfilament. Моделью для 3D-печати была выбрана квадратная многогранная неперетачиваемая пластина SNUM-120408, отличающаяся от коммерческих пластин наличием канавок (рис. 1а). Условия печати должны обеспечить наибольшую твердость, прочность, жесткость и точность деталей пресс-формы при минимальных затратах времени на изготовление. Заполнение было стопроцентным, толщина слоев 0,1 мм. Температура печати – 205 °C. Были получены матрицы с квадратным отверстием, нижний пуансон, прямоугольный толкатель и верхний пуансон. Толщина одноразового пуансона, прилегающего к заготовке, составила 2 мм (рис. 1, б). Площадь пуансонов – 179,8 мм. В конструкции пресс-формы использованы стальные детали для передачи усилия от пресса к пластиковому толкателю (стальной толкатель) и для повышения жесткости пресс-формы (стальная оболочка) (рис. 1, в). Добавленные детали не формообразующие.

Испытания и прессование проводили с помощью испытательного пресса ИП-250М. Максимальное усилие прессования составило 20,5 кН. Было изготовлено по два образца в каждой партии

(PLA и ABS). Первые отделяли от одноразовых пуансонов и определяли плотности заготовок гидростатическим взвешиванием. Вторые спекали в вакуумной печи Carbolite STF при максимальной температуре 1450 °С и выдержке 60 мин. Одноразовые тонкие пуансоны испарялись при нагревании на начальной стадии спекания, без нарушения целостности получаемых изделий. Микроструктуру образцов исследовали с помощью растрового микроскопа Tescan Vega. Твердость по Виккерсу, и вязкость разрушения определяли с помощью твердомера HVS-50 при нагрузке $P = 294 \text{ Н}$ (30 кгс) по стандартным методиками (ISO 6507 и ISO 28079). Результаты сравнивали с коммерческим аналогом (SNUM 120408 T5K10).

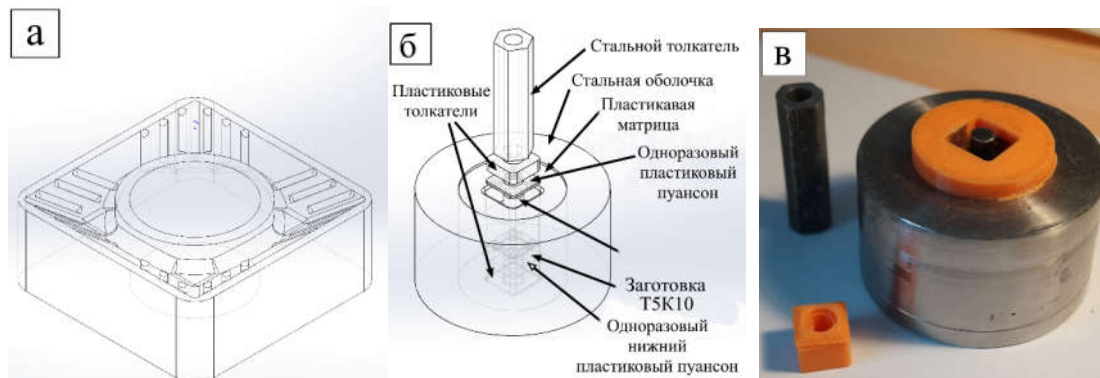


Рис.1. 3D-модель резца (а), схема пресс-формы (б), пресс-форма из PLA(в).

Испытания показали, что пластиковый пуансон из PLA выдерживает давление 70 МПа, из ABS - 73 МПа. Способность пуансонов выдерживать давление больше их пределов прочности (100 МПа) объясняется тем, что под такой нагрузкой согласно, критерию Мизеса, результирующее эквивалентное напряжение уменьшается из-за наличия второго и третьего главных напряжений. С другой стороны, давление на стенки матрицы пуансона и толкателя приводит к появлению силы трения, снижающей давление на заготовку. Максимальное значение силы трения, определенное при выпрессовке заготовок после прессования под нагрузкой 20,50 кН, составило 2,9 кН (14,1 % от приложенной нагрузки) для пресс-формы из PLA и 3,1 (15,1 % от приложенной нагрузки) – для пресс-формы из ABS. Результирующие усилия при прессовании, действовавшие непосредственно на заготовки, составили 17,6 кН (97,9 МПа) при использовании PLA и 17,4 кН (96,8 МПа) – при использовании ABS. Такая небольшая разница в давлении (1,1 МПа, или 1,1 %) не оказывает заметного влияния на получаемый при прессовании результат. Зависимости плотности заготовок от давления при прессовании в пресс-формах из ABS и PLA мало отличаются друг от друга (рис. 2).

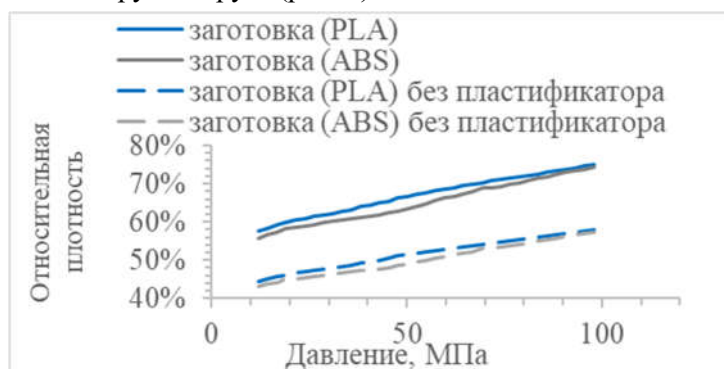


Рис. 2. Зависимость плотности заготовок до и после удаления пластификатора от давления.

Образцы, спеченные после прессования в пластиковых пресс-формах, имеют форму, соответствующую заданному чертежу (рис. 3). Они отличаются от коммерческой режущей пластины наличием канавок и характерными оттисками слоев, полученными при 3D-печати, на поверхности и сколами возле отверстия, не влияющими на режущую способность.

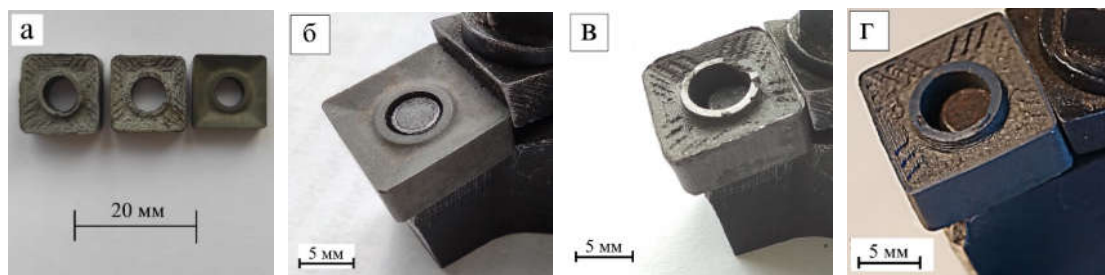


Рис. 3. Фотографии режущих пластин (а), коммерческой пластины (б), пластины, полученной после прессования в пресс-форме из ABS (в) и PLA (г).

Плотность спеченного образца, полученного с использованием пластиковой пресс-формы из PLA, составила 96,6 % ($12,65 \text{ г/см}^3$). Это значение удовлетворяет требованиям ГОСТ 3882-74 ($12,5\text{--}13,1 \text{ г/см}^3$). Плотность образца, спеченного после прессования в пресс-форме из ABS, составила 95 % ($12,45 \text{ г/см}^3$). Полученные резцы отличаются по плотности от коммерческого резца на 1,7 % (98,3 % ($12,88 \text{ г/см}^3$)) из-за уменьшенного давления прессования и относительно низкой жесткости пресс-формы. Вероятно, причиной уменьшения плотности образца, спрессованного в форме из ABS, является частичное разрушение поверхности расплавом пуансона, смешанного с продуктами разложения каучука.

Исследования микроструктуры показали (рис. 4), что спеченные пластины имеют больший средний диаметр зерен WC (2,1 мкм для ABS и 2,2 мкм для PLA) по сравнению с коммерческой режущей пластиной (1,5 мкм). Твердость образца ($1400 \text{ HV} \pm 20$), спеченного после прессования в матрице PLA, оказалась выше твердости образца ($1370 \text{ HV} \pm 30$), спеченного после прессования в матрице ABS, из-за большей пористости последнего.

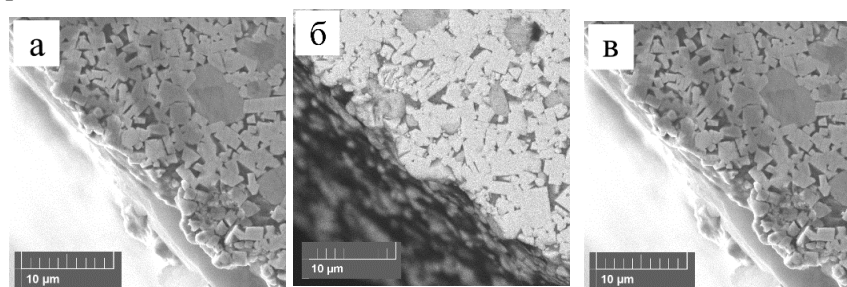


Рис. 4. Микроструктура кромки коммерческой режущей пластины SNUM 120408 T5K10 (а), микроструктуры режущих кромок пластин, спеченных после прессования в пресс-формах из ABS (б) и PLA (в).

Использование пластиковых пресс-форм позволило изготовить заготовки квадратных режущих твердосплавных пластин с плотностью при давлении 100 МПа. Относительная плотность режущей пластины (96,6 %) при использовании PLA удовлетворяет требованиям существующего стандарта и обеспечивает удовлетворительную твердость (1400 HV). Использование ABS в качестве материала пресс-формы для изготовления пластины приводит к снижению плотности до 95 % и твердости 1370 HV получаемого изделия из-за смешивания с пластификатором (каучуком) в процессе спекания. В дальнейшем методика может быть применена для получения отдельных твердосплавных изделий заданной формы. Однако необходимы дальнейшие исследования путей повышения плотности изделий, чтобы повысить физико-механические характеристики изделий до уровня коммерческих аналогов.

Работа выполнена при поддержке гранта № 23-29-00063 Российского научного фонда.

2. Aramian A., Razavi S. M. J., Sadeghian Z., Berto F. A review of additive manufacturing of cermets // Additive Manufacturing. – 2020. – Т. 33.
3. Mostafaei A., De Vecchis P. R., Kimes K. A., Elhassid D., Chmielus M. Effect of binder saturation and drying time on microstructure and resulting properties of sinter-HIP binder-jet 3D-printed WC-Co composites // Additive Manufacturing. – 2021. – Т. 46.
4. Xu Z. K., Meenashisundaram G. K., Ng F. L. High-density WC-45Cr-18Ni cemented hard metal fabricated with binder jetting additive manufacturing // Virtual and Physical Prototyping. – 2022. – Т. 17, № 1. – С. 92-104.
5. Mariani M., Goncharov I., Mariani D., De Gaudenzi G. P., Popovich A., Lecis N., Vedani M. Mechanical and microstructural characterization of WC-Co consolidated by binder jetting additive manufacturing // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. – 2021. – Т. 100.
6. Lengauer W., Duretek I., Fuerst M., Schwarz V., Gonzalez-Gutierrez J., Schuschnigg S., Kukla C., Kitzmantel M., Neubauer E., Lieberwirth C., Morrison V. Fabrication and properties of extrusion-based 3D-printed hardmetal and cermet components // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. – 2019. – Т. 82. – С. 141-149.
7. Carreno-Morelli E., Alveen P., Moseley S., Rodriguez-Arbaizar M., Cardoso K. Three-dimensional printing of hard materials // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. – 2020. – Т. 87.
8. Kim H., Kim J. I., Ryu S. S., Jeong H. Cast WC-Co alloy-based tool manufacturing using a polymeric mold prepared via digital light processing 3D printing // Materials Letters. – 2022. – Т. 306.
9. Chen F. J., Liu K., Sun H. J., Shui Z. H., Liu C., Chen J. Q., Shi Y. S. Fabrication of complicated silicon carbide ceramic components using combined 3D printing with gelcasting // Ceramics International. – 2018. – Т. 44, № 1. – С. 254-260.

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМОПЛАСТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТГЛИКОЛЯ

О.А. Одинокова, К.А. Драчёв

*Тихоокеанский государственный университет, (г. Хабаровск),
007504@pnu.edu.ru*

В статье описываются акустические свойства и механические испытания полиэтилентерефталатгликоля, которые показывают, как различные параметры изготовления конечных изделий аддитивной технологии влияют на механические свойства изделий. При анализе полученных данных можно прогнозировать механические и прочностные свойства конечных изделий, получаемых при различных режимах 3D-печати.

STUDY OF THE MECHANICAL AND ACOUSTIC PROPERTIES OF THERMOPLASTICS ON THE BASIS OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE GLYCOL

O.A. Odinkova, K.A. Drachev

*Pacific State University, (Khabarovsk)
007504@pnu.edu.ru*

The article describes the acoustic properties and mechanical tests of polyethylene terephthalate glycol, which show how different manufacturing parameters of additive technology end products affect the mechanical properties of the products. By analysing the data obtained, it is possible to predict the mechanical and strength properties of final products produced by different types of 3D printing.

В настоящее время для получения изделий из полимерных материалов все большую популярность набирает применение различных аддитивных технологий. Такие технологии хорошо подходят для быстрого прототипирования, для изготовления тестовых образцов различных подвижных и стационарных конструкций. Существует несколько видов аддитивных технологий, каждая из которых используется для решения разных производственных задач. Благодаря им стало возможным получать объекты любой степени сложности и геометрии, при этом в разы сократить промежуток времени от идеи до конкретного изделия, и существенно сократить трудоемкость, материалоемкость и энергоемкость, а также обеспечить экологически чистое производство. Одна из распространенных и доступных технологий является 3D-печать. Ввиду широкого распространения она стала популярна у исследователей. Это прежде всего изучение свойств изделий, полученных данным методом, возможность быстро создать рабочий прототип и посмотреть на его функциональные характеристики [1-3]. В большинстве работ, посвященных свойствам изделий из термополимеров, исследования ведутся с готовыми изделиями, без расчета того, что параметры печати могут оказывать влияние на конечные свойства изделий. Вследствие изучения влияния параметров печати на свойства изделия можно изготавливать объекты с необходимыми характеристиками для выполнения определенных задач.

Для наших исследований использовался 3D-принтер Creality Ender 3 Pro [4]. Подающий механизм принтера выполнен по технологии «Direct»: материал подается напрямую в нагревательный блок, что позволяет печатать широким спектром термопластиков. Формообразование из термопластов с помощью 3D-принтера заключается в том, что прутковый материал в специальной камере нагревают до температуры размягчения и продавливают через печатающее сопло необходимого диаметра (в нашем случае – 0,4 мм).

Печатающая головка перемещается в горизонтальной плоскости по заданной программе, нанося новые слои материала на предыдущие. Точность изготовления по такой технологии зависит от ориентирования конечного изделия в рабочем поле 3D-принтера и варьирует от 0,1 до 0,3 мм. Прочность связи между слоями всегда ниже, чем начальная прочность материала. Из этого следует, что изделия анизотропны: их прочность по оси Z всегда меньше, чем в плоскостях X и Y. Поэтому при проектировании необходимо учитывать ориентацию изделий.

В качестве материала для исследования и последующего изготовления образцов использовался популярный в 3D-печати термопластик полиэтилентерефталатгликоль (PETG). Он представляет собой модификацию полиэтилентерефталата. Натуральный PETG – это прозрачный аморфный материал. Для исследований были напечатаны образцы кубической формы с ребром 25 мм, с использованием заводских рекомендаций по параметрам печати изделий.

Экспериментальные исследования акустических свойств образцов проведены на автоматизированной многоканальной измерительной системе для изучения акустических свойств различных материалов [5]. Более подробно методики исследования акустических свойств термопласта (определения скорости и коэффициента затухания акустических волн) описаны в работе [6]. Распространение акустических волн в образцах исследовалось по двум основным направлениям: вдоль слоев, формирующих образец при печати, и поперек слоев (пьезопреобразователи устанавливались на противоположных сторонах образцов). Такой метод измерения был выбран в связи с тем, что образцы имеют неизотропную структуру вследствие послойного их формирования.

Проведенные измерения показали, что на величину скорости продольной волны влияет направление ее распространения относительно формирующих слоев укладки термопластика. При распространении вдоль слоев скорость распространения выше, чем при распространении поперек слоев. Данный

эффект наблюдается на всех исследованных образцах (табл. 1). При «концентрическом» способе укладки слоев возникающая разница в скоростях меньше, чем при «перекрестном» способе.

Таблица 1)

Величина скорости и коэффициента затухания продольной волны в образцах				
Способ укладки нитей в формируемом слое	Скорость продольной волны, м/с		Коэффициент затухания продольной волны, дБ/м	
	Поперек слоев	Вдоль слоев	Поперек слоев	Вдоль слоев
Перекрестный	1660	1843	779	700
Концентрический	1741	1783	582	554

Коэффициент α для продольной волны практически не зависит (в пределах погрешности) от направления распространения волны относительно слоев укладки термопластика (табл. 1). Однако наблюдается зависимость от режима укладки нитей расплава термопластика в процессе печати. При использовании «перекрестной» схемы укладки нитей коэффициент затухания волны выше, чем при использовании «концентрической» схемы. Средняя величина коэффициента затухания в образцах термопластиков составила 500-800 дБ/м.

Для исследования термопласта PETG в режиме ползучести испытывали образцы $d = 12$ мм (рис. 1) силой $F = 1,5$ кН, размерной базы 40 мм, площадь образца $A = 113,04$ мм², температура испытаний 21 °С, напряжение $\sigma = 13,87$ МПа. Образцы испытывались в установке, содержащей реверсор специальной конструкции [7], создающий идентичные условия при испытаниях на растяжение и сжатие.

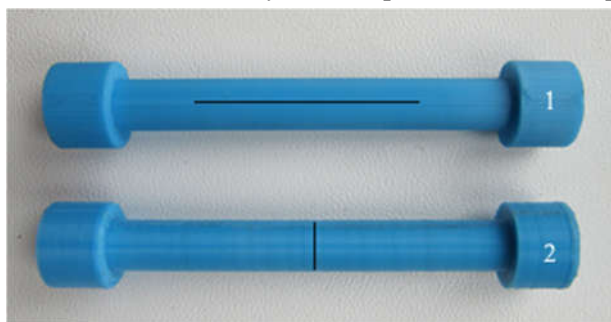


Рис. 1. Образцы для испытания на ползучесть (линия указывает на направление укладки слоев при печати образцов).

Функция разномодульности $R = \varepsilon^+ / \varepsilon^-$ практически не зависит от времени и равна для образца №1 ($\alpha=0$) $R = 2,47$ (const). Для образца №2 ($\alpha=90^\circ$) временной характер деформации и функции разномодульности имеет слабовыраженный характер.

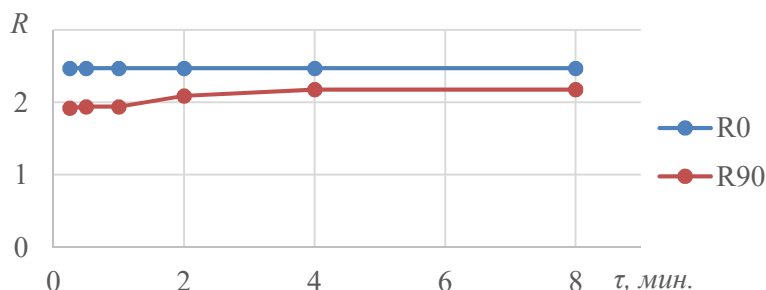


Рис. 2. Кривые ползучести для образцов с продольным и поперечным расположением нитей.

Кривые ползучести для обоих образцов носят монотонный характер, без аномальных точек (максимума или перегиба). Это свидетельствует об отсутствии в заданном диапазоне испытания опасных напряжений при сжатии или растяжении [8]. Тем не менее, значение функции разномодульности

весьма значительная для обоих образцов и этот фактор в обязательном порядке должен учитываться при расчетах на прочность в условиях сложного напряженного состояния.

Испытания на прочность в условиях растяжения проводились согласно ГОСТ 112 62-2017 и сведены в табл. 2. Использовались плоские образцы (лопатки) с плотностью заполнения 100 % и укладкой слоев пластика вдоль оси образца, поперек и под 45°. Определение прочности проводилось при скорости перемещения подвижного захвата разрывной машины, 50 мм/мин.

Таблица 2)

Испытание на растяжение образцов со 100 % плотностью заполнения

№ образца	Расположение нитей расплава	Макс. сила, Н	Макс. напряжение, Н/мм ²	Макс. удлинение, мм	Макс. деформация, %	Модуль упругости, Н/мм ²
1.5	Продольное $\alpha=0$	2124,79	55,91	2,92	3,65	2069,07
1.3		2105,83	55,42	2,90	3,63	1887,16
Средние значения		2115,31	55,67	2,91	3,64	1978,16
1.2	Поперечное $\alpha=90^\circ$	2431,04	63,97	2,85	3,56	2508,77
1.6		2395,31	63,03	2,86	3,57	2230,87
Средние значения		2413,75	63,50	2,86	3,57	2369,82
1.1	Крест-накрест $\alpha=45^\circ$	2134,52	56,17	2,79	3,49	1999,59
1.4		2303,84	60,63	2,92	3,65	2280,70
Средние значения		2219,18	58,40	2,86	3,57	2140,15

Анализ результатов показал явную зависимость механических характеристик полиэтилентерефталата от расположения нитей расплава в образце. Так $\sigma_{\max}$ при разрыве и модуль упругости образцов при $\alpha = 90^\circ$ выше, чем при $\alpha = 0$, а при $\alpha = 45^\circ$ занимает промежуточное положение. Это свидетельствует о том, что поперечное расположение нитей расплава для полиэтилентерефталата делает конечное изделие из него прочнее, чем продольное.

В табл. 3 приведены значения механических характеристик полиэтилентерефталата при различной плотности заполнения материала образцов. Как и следовало ожидать, снижение плотности заполнения привело к снижению прочностных и к увеличению деформационных характеристик.

Таблица 3)

**Испытание на растяжение образцов с различной плотностью заполнения
(продольное расположение волокон)**

№ образца	Плотность заполнения %	Макс. сила, Н	Макс. напряжение, Н/мм ²	Макс. удлинение, мм	Макс. деформация, %	Модуль упругости, Н/мм ²
1.3, 1.5	100	2115,31	55,666	2,9105	3,639	1978,16
1.90	90	1312,57	34,5414	3,66084	4,576	1110,08
1.80	80	1155,26	30,4015	3,74398	4,67997	998,88
1.70	70	1126,49	29,5644	3,60231	4,50289	1017,13
1.60	60	1125,77	29,6256	4,26063	5,32578	862,06
1.50	50	989,72	26,0451	3,87730	4,84663	805,80
1.20	20	939,49	24,7234	4,15230	5,19038	716,02

Таким образом, проведенные исследования показывают, что акустические свойства образцов из термопластиков зависят от примененной схемы укладки слоев при печати на 3D-принтере. Однако необходимо провести дополнительные экспериментальные и теоретические исследования в этом вопросе с целью выявить другие технологические режимы и степень заполнения внутреннего пространства изделий (образцов) для неразрушающего контроля таких изделий.

2. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № 5. – С. 405-419. – DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-5-405-419.
3. Павлюк Б. Основные направления в области разработки полимерных функциональных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № 5. – С. 388-392.
4. Обзор 3D-принтера CREALITY Ender 3 Pro. URL: <https://top3dshop.ru/blog/3d-printer-creality-ender-3-pro-review.html>.
5. Драчев, К. А. Автоматизированная измерительная система для проведения акустических измерений / К.А. Драчев, В.И. Римлянд, В.В. Савченко // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. – 2017. – № 1(44). – С. 13-20.
6. Драчев К. А. Измерения акустических параметров с использованием радиоимпульса / К. А. Драчев, В. И. Римлянд // *Измерительная техника*. – 2017. – № 6. – С. 60-64.
7. А. с. 356511 СССР, МКИ G 01 N 3/02. Универсальный реверсор для испытаний на растяжение - сжатие / О. А. Одиноква, В. В. Одиноква, П. В. Мелентьев (СССР), 1972. – . № 32. – 3 с.
8. Одиноква О.М. Расчеты на прочность элементов конструкций с учетом разномодульности и ползучести материалов. – Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2015.

УДК 539.216

ЗАЩИТНО-ДЕКОРАТИВНЫЕ СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИЕ НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА АЛЮМИНИИ

К.В. Степанова, Н.М. Яковлева, А.Н. Кокатев, Е.А. Хомякова

Петрозаводский государственный университет (г. Петрозаводск)

lady.cristin4ik@yandex.ru

Представлены результаты получения пористых анодных оксидов алюминия в растворе 15 % H₂SO₄ в гальваностатическом режиме при $j_a = 20$ мА/см² в течение 40 мин. Определены оптимальные условия модификации сформированной матрицы серебром методом электрохимического окрашивания. На разных стадиях получения нанокompозитного покрытия был выполнен анализ строения методом атомно-силовой микроскопии, а также изучены электрофизические свойства исследуемых образцов методом электрохимической импедансной спектроскопии.

PROTECTIVE AND DECORATIVE SILVER-CONTAINING NANOCOMPOSITE COATINGS ON ALUMINUM

K.V .Stepanova, N.M. Yakovleva, A.N. Kokatev, E.A. Homyakova

Petrozavodsk state university (Petrozavodsk)

lady.cristin4ik@yandex.ru

The results of obtaining porous anodic aluminum oxides in a solution of 15 % H₂SO₄ in galvanostatic mode at $j_a = 20$ mA/cm² for 40 minutes are presented. Optimal conditions for modification of the formed matrix with silver nanoparticles by electrochemical coloring have been determined. At different stages of obtaining a nanocomposite coating, the structure was analyzed by atomic force microscopy, and various electrophysical properties of the samples were studied by electrochemical impedance spectroscopy.

DOI:10.22250/9785934934195_147

Для создания нанокомпозитных материалов на основе упорядоченной пористой матрицы весьма перспективны самоорганизованные нанопористые анодные оксиды алюминия (АОА). Актуальность темы обусловлена тем, что введение наночастиц серебра в поры матрицы уже сформированных пористых АОА является эффективным способом повышения коррозионно-защитных свойств, обеспечивает большое разнообразие привлекательных цветов, которые могут быть успешно использованы в декоративных целях, в сочетании с выраженным антибактериальным эффектом [1]. Наночастицы серебра (НЧ Ag) – многообещающие кандидаты для эффективного применения в фармацевтике и биомедицинских областях, изготовления различных косметических средств и упаковок для пищевых продуктов. С целью получения серебросодержащих нанокомпозитных покрытий на алюминии могут быть использованы следующие методы модификации серебром: химическое осаждение из газовой фазы, электроосаждение (электрохимическое окрашивание – ЭХО), физическое осаждение из газовой фазы, химическое осаждение из водных растворов, фотохимический синтез [2]. Целью нашей работы – изучение процесса получения серебросодержащих нанокомпозитных покрытий (НКП) на алюминии методом ЭХО, анализ их строения и электрофизических свойств.

Объектами исследования являлись образцы алюминиевой фольги (А5М) размером 2×2 см. Анодирование предварительно химически очищенных образцов проводилось при комнатной температуре в водном растворе 15 % H_2SO_4 в гальваностатическом режиме при $j_a = 20 \text{ мА/см}^2$ в течение 40 мин. (стадия 1) на автоматизированной установке, включающей электронный самописец Эрбий-7115 для регистрации зависимостей $U_a(t)$. Далее анодированные образцы подвергали модификации НЧ Ag с применением метода электрохимического окрашивания, осуществляемого переменным током (50 Гц) при $U = 20 \text{ В}$ в электролите 1,51 г/л $\text{AgNO}_3 + \text{H}_3\text{BO}_3$ в течение 15 мин. (стадия 2) [3]. На завершающем этапе выполнялась гидротермальная обработка (ГТО) в дистиллированной воде при температуре $T = (90-100)^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. (стадия 3). Дополнительно были получены анодированные образцы, подвергнутые ГТО. Изучение электрофизических свойств исследуемых образцов выполнено методом электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС) с помощью измерителя иммитанса Е7-20 в диапазоне частот от 25 Гц до 100 кГц. Исследование рельефа поверхности образцов проводилось с применением полуконтактной методики на сканирующем зондовом микроскопе «Солвер-Некст» (ЗАО «НТ МДТ»). Для обработки и анализа АСМ-изображений, получения количественной информации о рельефе поверхности применялся пакет программ Image Analysis P9 [4]. В работе использованы три метода: измерение расстояния между точками (Line), анализ шероховатости профильным методом (Roughness 2D) и анализ частиц (Grain Analysis).

На первом этапе изучались особенности роста анодно-оксидных покрытий (АОП) на Al в сернокислом электролите. Установлено, что вид зависимостей $U_a(t)$ типичен для формирования пористых оксидов алюминия [2]. Оценка размерных параметров АОП по величине стационарного напряжения показала, что диаметр ячейки имеет значение – 40 – 44 нм, диаметр пор – 13 – 15 нм. Согласно [2], толщина пористого оксида составляет 10 – 12 мкм.

Для выбора оптимальных условий метода ЭХО была проведена модификация сформированных АОА-матриц НЧ Ag в течение 1 и 15 мин. Установлено, что в процессе осаждения серебра образцы изменяли цвет на черный. Интенсивность окраски зависела от длительности окрашивания, при 15 мин. она более насыщенная и однородная. Из ранее полученных значений диаметра пор и ячеек была рассчитана масса серебра, осаждающегося в поры образца площадью 1 см^2 за 15 мин. (при полном заполнении поры): $m_{\text{Ag}} = 0,12 \text{ г}$, что значительно превышает массу серебра, установленную в работе [3], которая для данных условий ЭХО составляет $\approx 200 \text{ мкг}$. Это объясняется тем, что расчет массы НЧ Ag в работе [3] производился отличным от представленного выше способа и не предполагал полного заполнения пор наночастицами. В дальнейшем модификация образцов Ag проводилась при длительности, равной 15 мин.

Далее было выполнено изучение электрофизических характеристик окрашенных в течение различного времени образцов.

Из частотных зависимостей $C_s(\lg f)$ для исследуемых образцов на разных стадиях обработки, представленных на рис. 1 а, видно, что для пористых АОП наблюдается сначала медленный спад емкости, а начиная с частоты $f = 20$ кГц, – резкий спад. Для образцов, подвергнутых ГТО или ЭХО, а также той и другой операции, отличается заметное уменьшение емкости для $f = 1000$ Гц ($C_{s2} = 111$ нФ, $C_{s3} = 1098$ нФ, $C_{s4} = 388$ нФ) по сравнению с характерными для пористого АОП ($C_{s1} = 3797$ нФ) значениями и плавный ход зависимости во всем исследуемом диапазоне частот. Данный факт может быть обусловлен эффектом как заполнения пор наночастицами Ag или Ag_2O (в процессе ЭХО), так и образованием оксигидроксида алюминия (в процессе ГТО). Повышение сопротивления (рис. 1 б) модифицированного ЭХО-образца по сравнению с анодированным образцом указывает на факт заполнения пор НЧ Ag ($R_{s1} = 22$ Ом, $R_{s3} = 41$ Ом для $f = 1000$ Гц). Увеличение сопротивления гидратированных образцов по сравнению с образцами, не подвергавшихся ГТО, объясняется образованием бемита в процессе гидротермальной обработки, приводящему к росту толщины оксидной пленки в целом ($R_{s1} = 22$ Ом и $R_{s2} = 1432$ Ом, $R_{s3} = 41$ Ом и $R_{s4} = 334$ Ом для $f = 1000$ Гц).

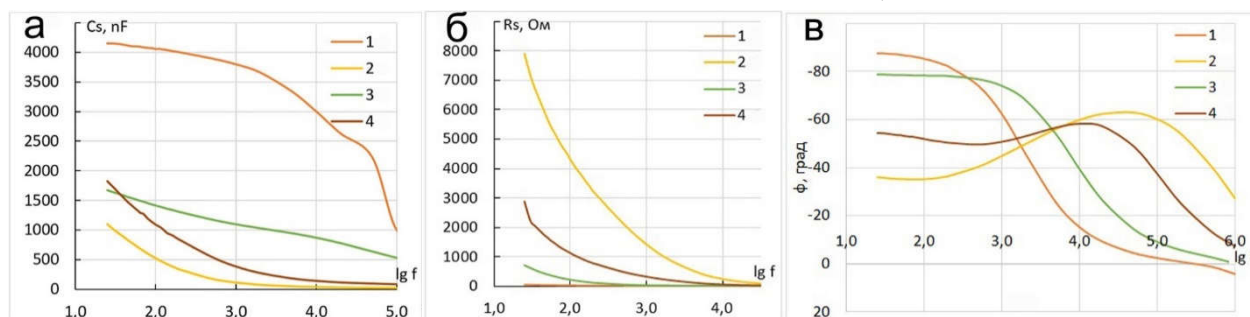


Рис. 1. Частотные зависимости емкости $C_s(\lg f)$, сопротивления $R_s(\lg f)$ и фазового угла $\phi(\lg f)$ для образцов на разных стадиях обработки: 1 – анодирование; 2 – анодирование + ГТО; 3 – анодирование + ЭХО; 4 – анодирование + ЭХО + ГТО.

Из рис. 1 в видно, что имеет место уменьшение максимального значения $-\phi_m$ для анодированных образцов после ГТО и ЭХО+ГТО. Кроме того, наблюдается сдвиг максимума в сторону больших частот. Меньшие значения максимума фазового угла представляют поверхность морфологически более развитой. Изменения фазового угла могут быть объяснены тем, что в процессе гидротермальной обработки на поверхности формируется рыхлый слой оксигидроксида алюминия.

Далее для образцов после каждой стадии обработки были получены АСМ-изображения (рис. 2). Видно, что после анодирования регулярно наблюдается пористый рельеф. Установлено, что диаметр ячеек имеет значение $D_{я} = 38 \pm 8$ нм, близкое к значению, полученному из эмпирической зависимости диаметра ячейки от стационарного напряжения (40–44 нм). После ЭХО диаметр ячеек практически не изменяется ($D_{я} = 44 \pm 3$ нм), дополнительно на поверхности появляются светлые образования, возможно, соответствующие наночастицам Ag/ Ag_2O (30–45 нм), а также кластеры с диаметром порядка 100–300 нм.

На рис. 2 в, г приведены АСМ-изображения образцов, дополнительно подвергнутых ГТО. На поверхности неупорядоченная сетка волокон толщиной порядка 93 ± 13 нм, по всей видимости, соответствующая образовавшемуся в процессе кипячения оксигидроксиду алюминия. Установлено, что предварительное ЭХО незначительно влияет на развитие волокнистой структуры.

Таким образом, были получены пористые АОА в сернокислом растворе и определены оптимальные условия модификации АОА-матрицы серебром методом ЭХО. На разных стадиях получения НКП были выполнены анализ строения методом АСМ, а также изучены электрофизические свойства

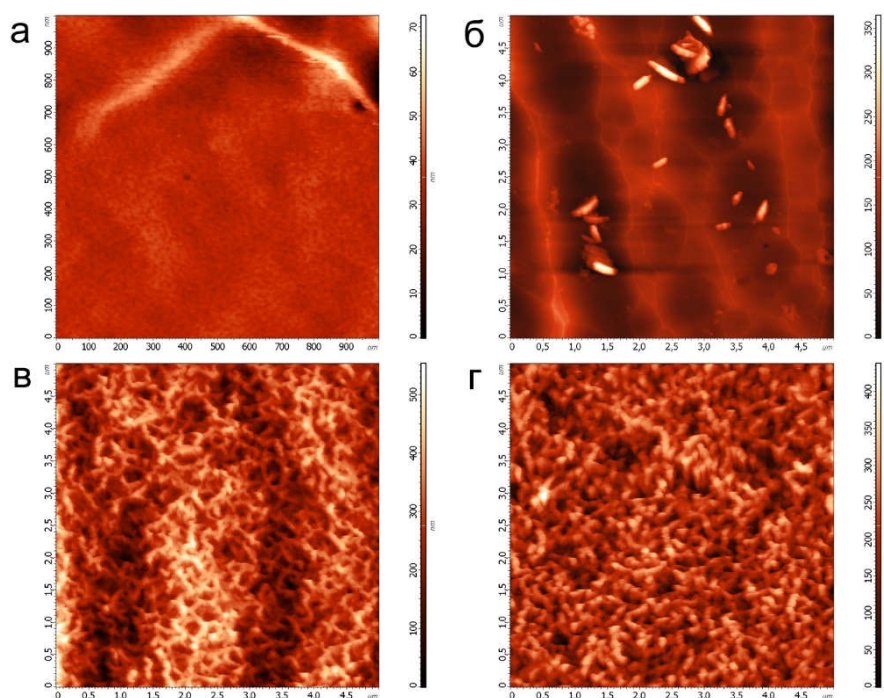


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности образца алюминиевой фольги (А5М):
а – после анодирования; б – АОА + ЭХО; в – АОА + ГТО; г – АОА + ЭХО + ГТО.

методом ЭИС. Полученные НКП могут быть использованы в декоративных целях в сочетании с выраженным антимикробным эффектом, а также в устройствах для защиты окружающей среды – в частности для катализаторов разложения озона и летучих органических соединений.

1. Effects of Local Application of Nano-silver on Osteomyelitis and Soft Tissue Infections: An Experimental Study in Rats / B. Kemah, G. Uzer, Y. Turhan, B. Ozturan, B. Kılıç, B.S. Gültepe, A.B. Ceyran, S. Ertürk, B. Aksoylu, O. Senaydın, K. Ozkan // *Journal of Bone and Joint Infection*. – 2018. – V. 3. – P. 43–49.

2. Нанокompозитные материалы на основе самоорганизованных анодно-оксидных матриц : учебное пособие / Н. М. Яковлева, А. Н. Кокатев, К. В. Степанова, А. М. Шульга. – Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2022. – 91 с.

3. Girginov Ch., Kozhukharov S., Kiradzhyska D., Mancheva R. Characterization of porous anodic alumina with AC-incorporated silver // *Electrochimica Acta*. – 2018. – V. 292. – P. 614–627.

4. Модуль обработки изображений Image Analysis P9. Справочное руководство. — М, 2011. – 206 с.

АНИЗОТРОПИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ЛЕНТ $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ ПРИ ПОЭТАПНОМ ТРАВЛЕНИИ

А.М. Фролов, Г.С. Крайнова, В.С. Плотников, С.В. Должиков

Дальневосточный федеральный университет (г. Владивосток)

froloff5@yandex.ru

Представлены результаты исследования анизотропии распределения морфонеоднородностей быстро-закаленных сплавов $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$, полученных при разных скоростях спиннингования расплава. Показан характер изменения анизотропии морфологических дефектов лент $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$, при поэтапном травлении. Установлено, что скорость травления лент зависит от характера структурного упорядочения.

ANISOTROPY OF MORPHOLOGICAL INHOMOGENEITIES OF $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ RIBBONS DURING STEPWISE ETCHING

A.M. Frolov, G.S. Kraynova, V.S. Plotnikov, S.V. Dolzhikov

¹Far Eastern Federal University, (Vladivostok)

froloff5@yandex.ru

The paper presents the results of a study of the anisotropy of the distribution of morphological inhomogeneities in rapidly quenched $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ alloys obtained at different melt spinning rates. The nature of the change in the anisotropy of the morphological defects of the $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ tapes during gradual etching is shown. It is established that the etching rate of the tapes depends on the nature of the structural ordering.

DOI:10.22250/9785934934195_151

Один из хорошо отработанных и широко применяемых методов получения аморфных металлических сплавов – одновалковое спиннингование расплава. Специфической особенностью данной технологии является получение конечной продукции в виде лент, обладающих двумя поверхностями раздела – контактной к вращающемуся с большой скоростью холодильнику и свободной от его влияния. Морфологическая структура этих поверхностей, зависящая от технологических режимов получения [1; 2] и элементного состава лент, крайне сложна и существенно отличается по типу характера дефектов, анизотропии их распределения [2; 3]; в некоторых случаях по ней можно судить о фазовых превращениях в спиннингованных сплавах [4; 5]. Существенно, что для быстрозакаленных лент, полученных в значительно неравновесных условиях, ярко выражена стратификация – изменение характера, типа структуры по толщине образца [1; 6; 8].

Цель данной работы – проследить изменение анизотропии структурных неоднородностей микрорельефа лент, полученных быстрой закалкой из расплава при поэтапном травлении.

В работе исследовались образцы $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$, полученные методом одновалкового спиннингования при различных скоростях вращения охлаждающего барабана ($v = 10, 20, 30, 45$, м/с). Рентгеноструктурный анализ показал, что лента, полученная при скорости $v = 10$ м/с, находится в кристаллическом состоянии, а ленты, полученные при других режимах, – рентгеноаморфны. Все образцы были подвергнуты травлению в 50%-ном растворе азотной кислоты одновременно с двух поверхностей раздела.

Исходные толщины лент $h_{v,t}$ (t – время травления) составляли: $h_{10,0} = 90$ мкм, $h_{20,0} = 38$ мкм, $h_{30,0} = 30$ мкм, $h_{45,0} = 27$ мкм; время травления $t = 40, 60, 80$ мин. Были рассчитаны скорости травления каждого этапа $u_{v,t}$ и средняя скорость травления $\langle u_v \rangle$ лент для каждого режима спиннингования. Так, для ленты, полученной при скорости вращения охлаждающего барабана $v = 10$ м/с, $u_{10,40} = 0,5$ мкм/мин, $u_{10,60} = 0,42$ мкм/мин, $u_{10,80} = 0,56$ мкм/мин, $\langle u_{10} \rangle = 0,5$ мкм/мин. Для режима при $v = 20$ м/с, $u_{20,40} = 0,05$ мкм/мин, $u_{20,60} = 0,12$ мкм/мин, $u_{20,80} = 0,14$ мкм/мин, $\langle u_{20} \rangle = 0,1$ мкм/мин. Для режима при $v = 30$ м/с, $u_{30,40} = 0,15$ мкм/мин, $u_{30,60} = 0,13$ мкм/мин, $u_{30,80} = 0,16$ мкм/мин, $\langle u_{30} \rangle = 0,14$ мкм/мин. Для режима при $v = 45$ м/с, $u_{45,40} = 0,15$ мкм/мин, $u_{45,60} = 0,13$ мкм/мин, $u_{45,80} = 0,16$ мкм/мин, $\langle u_{45} \rangle = 0,14$ мкм/мин.

Для фиксации эффектов вертикальной стратификации на морфологическом уровне проводились микроскопические исследования поверхностей лент на каждом этапе травления. Показано: травление лент $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ обнажает исходный рельеф, но не формирует его. Изменение общего вида морфологии свободной поверхности аморфных лент при поэтапном травлении – на рис. 1.

Свободная от контакта с барабаном поверхность фольги обладает мягким бугорковым рельефом [1; 5; 7]. Процесс травления (рис.1) приводит к декорированию морфоструктуры: более отчетливо проявляются бугорки, соединенные в систему анизотропно распределенных протяженных строчек (рис.1 а) Углубление процесса травления приводит к образованию сеточной структуры на свободной поверхности (рис.1 б).

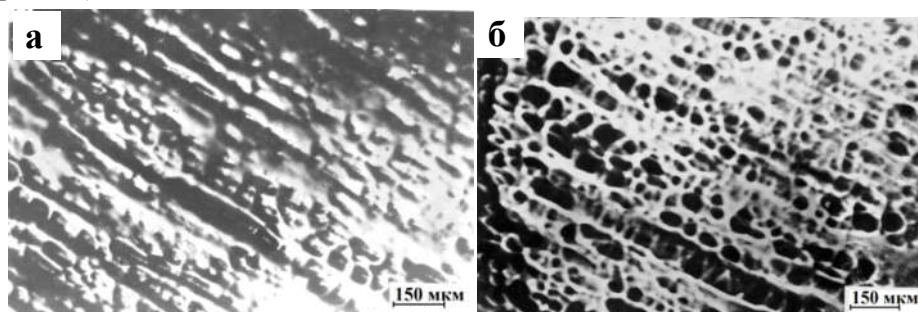


Рис. 1. Микрофотографии свободной поверхности спиннингованной ленты при поэтапном травлении: а) $t = 20$ мин, б) а) $t = 60$ мин.

На всех этапах исследования в соответствии с методикой [2; 9] получены спектральные оценки пространственных морфонеоднородностей – дифракционные картины Фраунгофера (ДКФ), рис.2 а, интегральные частотные характеристики (ИЧХ), рис. 2 б, интегральные пространственные характеристики (ИПХ), рис. 2 в. Проанализированы четыре частотных поддиапазона: I – (72,27-14,45) мкм; II – (14,45-8,26) мкм; III – (8,26-6,02) мкм; IV – (6,02-4,82) мкм. Нумерация пространственных поддиапазонов идет от центра к периферии ИПХ (рис.2).

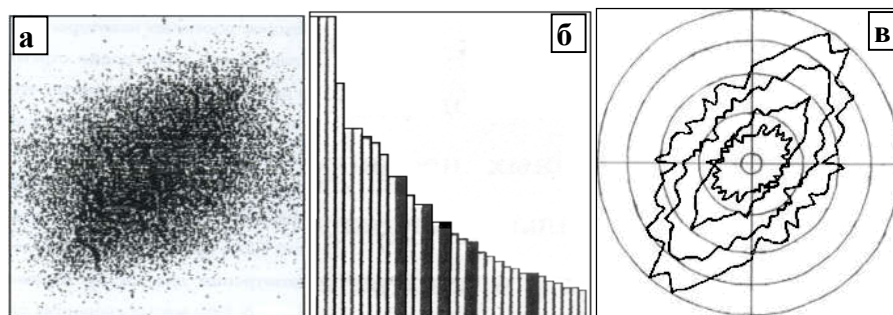


Рис. 2. а) Пример спектрального представления микрорельефа ленты $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$; б) интегральная частотная характеристика (ИЧХ); в) интегральная пространственная характеристика (ИПХ).

На каждом этапе травления для четырех выделенных поддиапазонов пространственных размеров на ИПХ от контактной и свободной поверхностей определен коэффициент анизотропии γ (рис. 3).

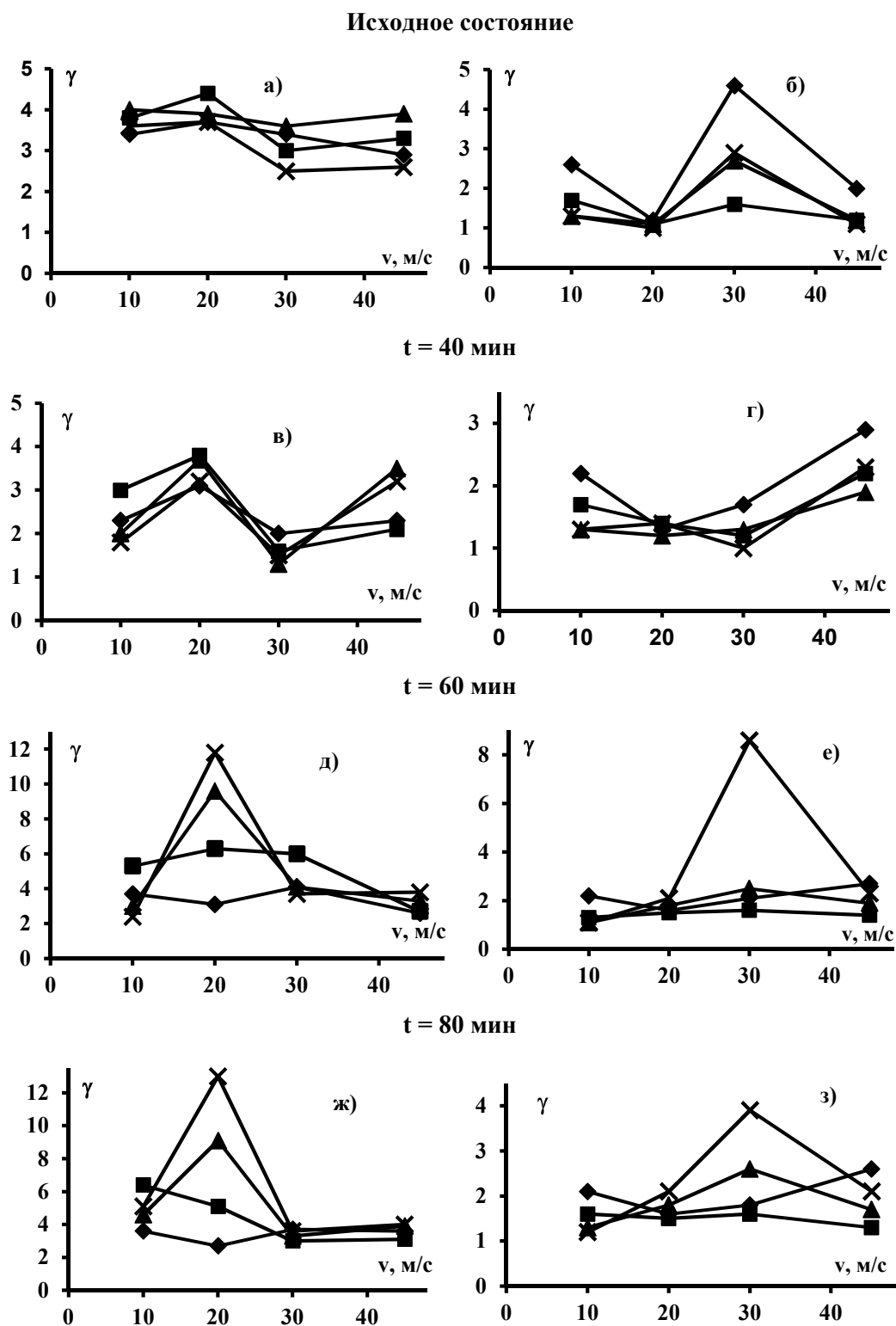


Рис.3. Динамика коэффициента анизотропии γ как функция скорости вращения барабана для различных диапазонов размеров неоднородностей: а), в), д), ж) – контактная поверхность; б), г), е), з) – свободная поверхность; —♦— – I поддиапазон; —■— – II поддиапазон; —▲— – III поддиапазон; —×— – IV поддиапазон.

На рис. 3 а, б приведены графики зависимости парциального коэффициента анизотропии γ (для каждого диапазона размеров) в зависимости от скорости вращения охлаждающего барабана для лент в исходном состоянии. Размеры (14,45-8,26) мкм для свободной поверхности спиннингованных лент $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ имеют наиболее изотропный характер распределения ($\gamma \cong 1,5$) независимо от значения v

(рис. 3 б). Функция $\gamma(v)$ для остальных трех диапазонов свободной поверхности имеет максимум при $v = 30$ м/с. При других режимах распределение периодичностей отличается малой анизотропией на всех диапазонах. Для контактной поверхности (рис. 3 а), характерна выраженная анизотропия распределения структурных неоднородностей на всех пространственных диапазонах для всех скоростей вращения барабана-холодильника. Такое поведение $\gamma(v)$ является отражением технологии спиннингования и ее влияния на структуру изучаемых объектов [1-3].

На первом этапе травления ($t = 40$ мин.) для контактных поверхностей лент значение γ уменьшается во всех режимах спиннингования и поддиапазонах пространственных размеров (рис. 3 в), что связано с откликом микрорельефа, образованного в результате влияния поверхности охлаждающего барабана. Для свободной поверхности, при тех же временах травления, следуя зависимости $\gamma(v)$, пропадает максимум анизотропии: поддиапазоны I – III практически изотропны, но возрастает коэффициенты анизотропии γ для лент, спиннингованных при $v = 45$ м/с (рис. 3 г).

На следующих этапах травления ($t = 60$ и 80 мин.) для контактной поверхности наблюдается существенное увеличение коэффициента анизотропии γ для режима при $v = 20$ м/с, для размеров (8,26 – 6,02) мкм и (6,02 – 4,82) мкм. Для свободной поверхности также отличается увеличение γ для размеров (6,02 – 4,82) мкм, но для режима при $v = 30$ м/с.

Таким образом, анизотропия распределения морфонеоднородностей зависит от скорости спиннингования расплава. По поведению коэффициента анизотропии γ выделяются режимы $v = 30$ м/с для свободной поверхности и $v = 20$ м/с – для контактной. В результате поэтапного травления установлено, что скорость травления лент зависит от режима их получения и, соответственно, характера структурного упорядочения, масштаба неоднородностей. Поведение коэффициента анизотропии при поэтапном травлении подтверждает факт сильной стратификации спиннингованных лент по толщине.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда ДВФУ, проект №22-02-03-005.

-
1. Фролов А.М. Многомасштабные структурно-морфологические неоднородности металлических сплавов, полученных быстрой закалкой из расплава. – Автореф. соискание уч. степени. д.ф.-м.н. – Владивосток. – 2022. – 36 с.
 2. Фролов А.М., Крайнова Г.С., Должиков С.В. Анизотропия структурных неоднородностей быстрозакаленных сплавов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2018. – № 4. – С. 84–90.
 3. Frolov A.M., Krainova G.S., Dolzhikov S.V. Informo-dynamics functionals in the study of fields of anisotropy of a microrelief spinning tapes // Advanced Materials Research. – 2014. – V. 1037. – P. 428-431.
 4. Фролов А.М., Крайнова Г.С., Должиков С.В. РЭМ-идентификация аморфного состояния лент Fe–B // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2017. – № 3. – С. 66–69.
 5. Юдин В.В., Крайнова Г.С., Фролов А.М., Невмержицкий В.И. Диагностика наноструктурного упорядочения спиннингованных лент по морфологии микрорельефа. // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т.53, №3/2. – С. 211 – 214.
 6. Фролов А.М., Крайнова Г.С., Должиков С.В., Ткачев В.В. Особенности стратификационного эффекта в лентах из сплавов Fe–B и Fe–Cr–B, полученных методом спиннингования // Деформация и разрушение материалов. – 2019. – № 5. – С. 2–5.
 7. Фролов А.М., Крайнова Г.С., Агеенко А.Г., Юдин В.В. Стратификационный фазовый переход в спиннингованных лентах Fe₇₀Cr₁₅B₁₅. // Материаловедение. – 2001. – №11. – С.37–41.
 8. Чухрий Н.И., Юдина Л.А., Фролов А.М., Юдин В.В. Корреляция морфологии поверхностей быстрозакаленных лент и атомного разупорядочения в процессах спиннингования. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 1999. – №4. – С.55–65.
 9. Frolov A.M., Dolzhikov S.V., Krainova G.S. Analysis methods of images surface of fast tempered alloys // Advanced Materials Research. – 2013. – V. 718–720. – P. 1140–1145.

Секция 4

Общая и техническая физика, оптика

УДК 614.872.5, 53.08, 629.78, 53.

РАСЧЕТ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ПОВОРОТНОГО ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ИТПК

А.Е. Голых, Д.В. Фомин

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

toksikccc@gmail.com

В работе представлен результат исследования поворотного основания имитатора транспортно-пускового контейнера для спутников стандарта CubeSat 1U-3U (ИТПК). Данная конструкция исследовалась в программе САПР SolidWorks. По результатам работы сделаны выводы: максимальная деформация боковых стенок поворотного основания составила 0,1423; максимальная деформация поворотных полуосей составила 0,1741. Представленные значения деформации лежат в пределах допусков для элементов конструкции, испытывающих вибрации до 2000 Гц, в соответствии ИСО 4866:2010. Для всей конструкции были определены пятнадцать резонансных частот (в диапазоне от 0 до 2000 Гц), не превышающих допустимых пределов 0,05 % погрешностей согласно ГОСТ Р 8.736-2011.

CALCULATION OF NATURAL FREQUENCIES OF OSCILLATIONS OF THE ROTATING BASE FOR IPTK

A.E. Golukh, D.V. Fomin

Amur State University (Blagoveshchensk)

toksikccc@gmail.com

This paper presents the result of a study of the rotary base of the simulator of the transport-launch container for satellites of the CubeSat 1U-3U standard (IPTK). This design was studied in the SolidWorks CAD program. Based on the results of the work, the following conclusions were drawn: the maximum deformation of the side walls of the rotary base was 0.1423; the maximum deformation of the rotary semi-axes was 0.1741. The deformation values presented are within the tolerances for structural members subjected to vibrations up to 2000 Hz in accordance with ISO 4866:2010. For the entire structure, 15 resonant frequencies were determined (in the range from 0 to 2000 Hz) not exceeding the permissible error limits of 0.05% according to GOST R 8.736-2011.

DOI:10.22250/9785934934195_155

Космические аппараты должны проходить обязательные вибродинамические испытания перед запуском ракет-носителей (РН). Для проведения таких испытаний применяют вибростенды, генерирующие механическую волну, воздействующую на спутники. В зависимости от количества направлений воздействия на исследуемый объект стоимость таких стендов существенно различается. На сегодняшний день одним из самых распространенных является студенческий формат спутников CubeSat. Образова-

тельное учреждение, занимающееся созданием таких спутников, должно иметь трехкомпонентный вибростенд для проведения их исследований. Но с учетом ограниченных финансовых возможностей образовательных учреждений, не являющихся специализированными центрами по проектированию космических аппаратов, покупка вибростенда, создающего вибрацию в трех плоскостях – сложная задача. Поэтому актуальная цель данной работы – разработка и исследование устройства, которое позволяет использовать недорогие однонаправленные вибростенды (воздействующие на исследуемый объект только в одном направлении) для проведения испытаний в трех плоскостях.

Для достижения поставленной цели в НОЦ АмГУ им. К.Э. Циолковского было разработано поворотное основание (рис. 1) для ИТПК спутников стандарта CubeSat 1U-3U [1], позволяющее проводить испытания в трех плоскостях на однокомпонентных стендах. Спроектированное поворотное основание включает: нижнюю плиту, боковые стенки с ребрами жесткости, представляющие собой облегченные пластины металла, поскольку одной из задач, для достижения поставленной цели являлось облегчение конструкции в соответствии с ГОСТ 30630.0.0-99 [1; 2; 3].

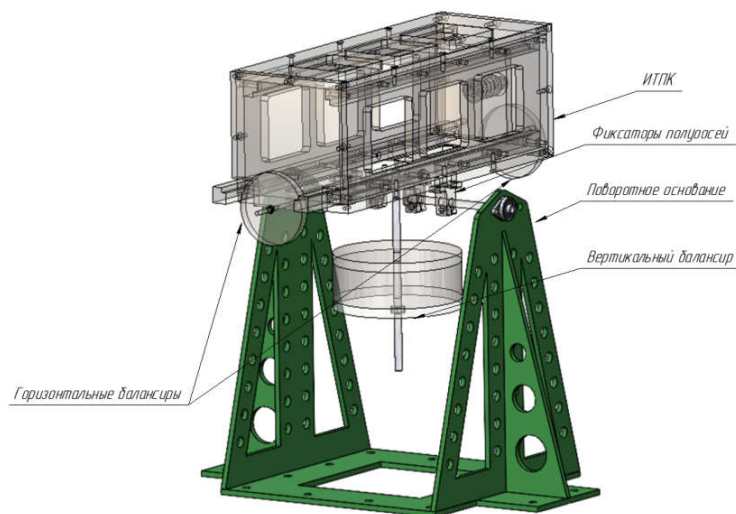


Рис. 1. Вид поворотного основания с ИТПК для спутников стандарта CubeSat 1U-3U на этапе проектирования.

Для закрепления на поворотном основании (рис. 2б) имитатора транспортно-пускового контейнера (рис. 2а) основание последнего было модернизировано. Модернизация заключалась в изменении геометрических размеров нижней плиты устройства, размещении на ней фиксаторов полуосей и горизонтальных, а также вертикального балансиров. [3; 4].

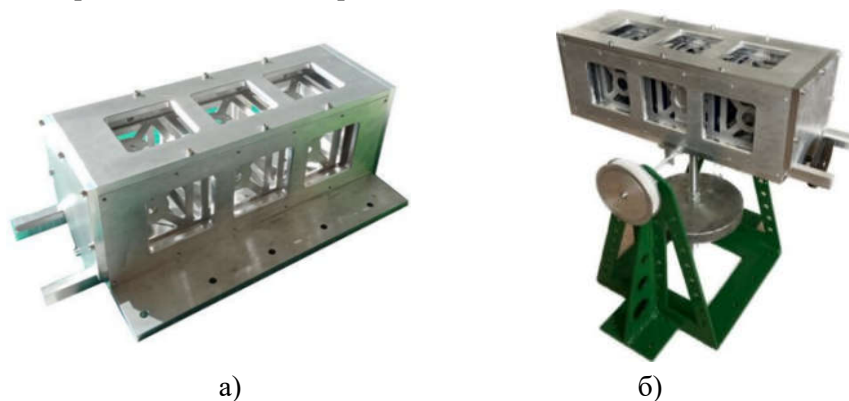


Рис. 2. Фотографии разработанных в НОЦ им. К.Э. Циолковского АмГУ ИТПК: а) жесткофиксируемый ИТПК, б) ИТПК, установленный на поворотное основание.

Анализ конструкции поворотного основания проводился в САПР SolidWorks, с жестким закреплением его нижней плиты. Масса нагружения на поворотное основание задавалась с учетом максимально возможной суммарной массы спутника CubeSat 3U и массы оснастки, результат – 11,44 кг. Диапазон частот задавался в соответствии с частотами вибраций, создаваемых ракетой-носителем «Союз 2.1б». Для исследования была использована функция возбуждения механической волны стола вибростенда, с учетом вибрации в вертикальном направлении (1) [5 – 8]:

$$F(t) = A \sin[\omega(t - t_0)]u(t - t_0), \quad (1)$$

где A – амплитуда воздействующих колебаний; $u(t - t_0)$ – функция единичного шага аргумента $t - t_0$; t – время воздействия; t_0 – время отклика; ω – частота воздействующих колебаний.

Для построения графика отклика конструкции на воздействующие колебания, а также определения собственных частот и деформаций, была использована следующая функция (2) [5 – 8]:

$$\frac{m_{eq}\omega_n^2 x(t)}{A} = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{1}{\omega/\omega_n - 1} \right) [\sin \omega(t - t_0) - \sin \omega_n(t - t_0)] - \left(\frac{1}{\omega/\omega_n + 1} \right) [\sin \omega(t - t_0) - \sin \omega_n(t - t_0)] \right\} u(t - t_0), \quad (2)$$

где m_{eq} – эквивалентная масса конструкции; ω_n – собственная частота конструкции; $x(t)$ – деформация элементов конструкции, зависящая от времени.

В ходе проведенного модельного исследования в САПР SolidWorks с помощью функций (1) и (2), было установлено, что максимальная деформация боковых вертикальных стенок с подшипниками составила 0,1423 мм (рис. 3а). Деформация полуосей, устанавливающихся в подшипники – 0,1741 мм (рис. 3б). Представленные значения деформации лежат в пределах допусков для элементов конструкции, испытывающих вибрации до 2000 Гц, в соответствии ИСО 4866:2010.

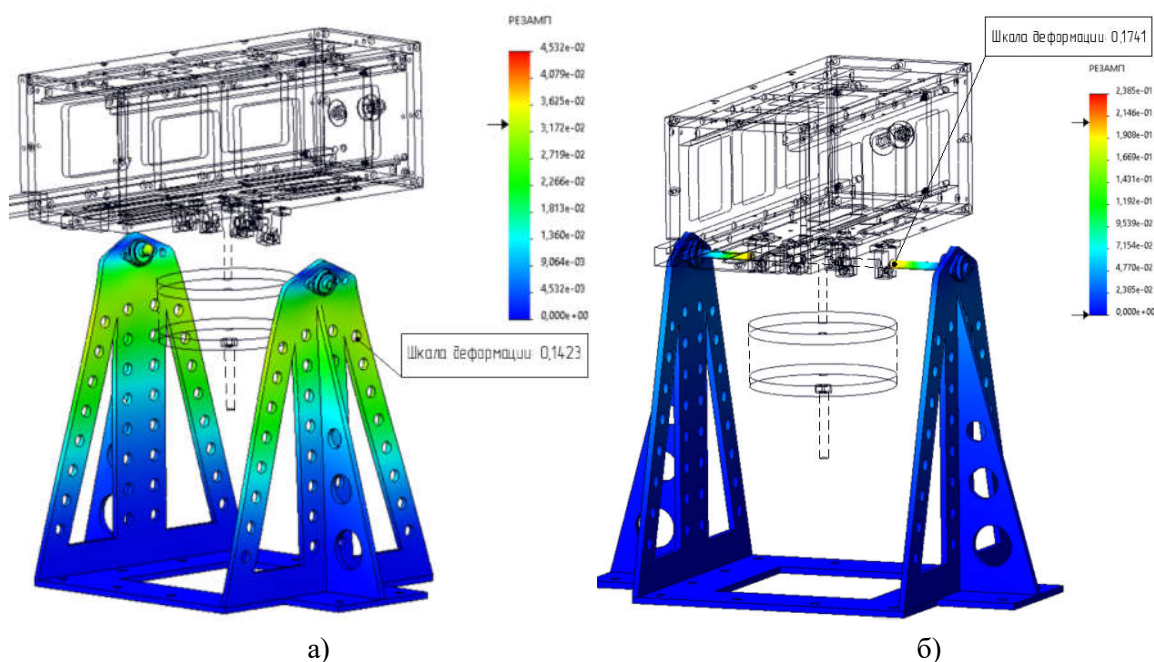


Рис. 3. Вид деформированной трехмерной модели поворотного основания, полученной в САПР SolidWorks: а) деформация боковых стенок; б) деформация полуосей.

Для отображения изменения отклика конструкции на механические возбуждения был построен график на основании полученных результатов модельного исследования (рис 4.) в диапазоне вибраций, возникающих в РН «Союз 2.1б»: от 0 до 2000 Гц.

Данная кривая отображает процентное количество резонирующей массы конструкции в зависимости от ее собственной частоты колебаний. Анализируя представленную зависимость, можно утверждать, что на всем диапазоне частот резонанс не наступит, так как максимальное значение результирующего коэффициента массового участия 0,048 % не превышает 0,05 % (согласно ГОСТ Р 8.736-2011).

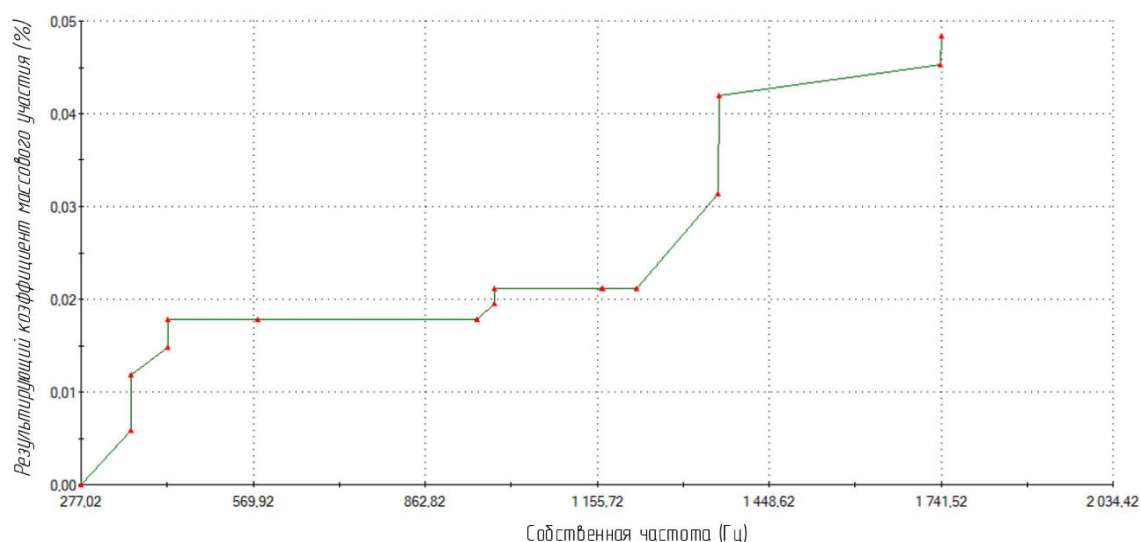


Рис. 4. График зависимости результирующего коэффициента массового участия от собственной частоты колебаний конструкции.

Таким образом, в результате проведенных в САПР SolidWorks исследований путем моделирования вибродинамической нагрузки на поворотное основание в плоскости Y с использованием формул (1) и (2) было определено, что самыми нагруженными элементами конструкции являются боковые стенки и полуоси. Так, максимальная деформация боковых стенок составила 0,1423, а максимальная деформация полуосей – 0,1741. Полученные значения деформации лежат в пределах допусков для элементов конструкции, испытывающих вибрации до 2000 Гц, в соответствии ИСО 4866:2010. Для всей конструкции были определены 15 резонансных частот в диапазоне от 0 до 2000, на всем диапазоне резонанс не наступит, так как максимальное значение результирующего коэффициента массового участия 0,048 % не превышает согласно ГОСТ Р 8.736-2011 0,05 %.

1. Патент изобретения № 2796176 Российская Федерация, МПК В64G 7/00. Поворотное устройство имитатора транспортно-пускового контейнера спутника CubeSat 1-3U: № 2022134380: заявл. 27.12.2022; опубл. 17.05.2023/ Д. В. Фомин, А. Е. Голых.
2. Патент на полезную модель № 211274 U1. Российская Федерация, МПК В64G 7/00. Имитатор транспортно-пускового контейнера для поведения вибродинамических испытаний спутников стандарта CubeSat 1U-3U : № 2021139634 : заявл. 29.12.2021 : опубл. 30.05.2022 / Д. В. Фомин, А. Е. Голых.
3. Голых А. Е., Фомин Д. В. Поворотный комплекс для проведения вибродинамических испытаний наноспутников // Изв. вузов. Приборостроение. – 2023. – Т. 66, № 6. С. 5-15. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-5-166.
4. Danilin A. N. Simulation of a Multi-Frequency Stockbridge Vibration Damper Oscilations with Energy Scattering Hysteresis / A. N. Danilin, A. S. Kurbatov, S. I. Zhavoronok // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2020. – Vol. 16, No. 4. – P. 29-37. – DOI 10.22337/2587-9618-2020-16-4-29-37.
5. Kelly S. Graham. Mechanics vibration. Theory and Application to Structural Dynamics, 3rd Edition. 2015.- 616 с.: ил. SBN 978-1-118-90020-8.
6. Srikant Bhawe. Mechanical Vibrations Theory and Practice, 2010. – 359 с.: ил. ISBN 978-8131732489.
7. Лаврова А.С. Совершенствование методов расчета перфорированных балок с круглыми вырезами с помощью конечно-элементного анализа и моделирования: диссерт. канд. техн. наук по спец-ти 05.23.01. Калининград, 2018. – С.167.
8. Малинин Г.В. Методики расчета ребристых пластин на прочность и устойчивость // Труды МАИ. –2021. – № 121. DOI: 10.34759/trd-2021-121-08.

ИЗМЕНЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ, ВЫЗВАННОЕ ДЕКОЙ СТОЛА И ФИКСИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

Н.А. Дроботя^{1,2}, И.В. Верхотурова¹

¹Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

²ГАУЗ АО «Амурский областной онкологический диспансер» (г. Благовещенск)

rusia@mail.ru

В работе приведены результаты исследования влияния деки терапевтического стола ускорителя Electa Synergy и фиксирующего устройства для грудной клетки на распределение поглощенной дозы на поверхности кожи и доставку дозы до локализации опухоли.

CHANGES IN THE ABSORBED DOSE CAUSED BY THE TABLE DECK AND FIXING DEVICE

N.A Drobotya^{1,2}, I.V. Verkhoturova¹

¹Amur State University (Blagoveshchensk)

²Amur Regional Oncological Dispensary (Blagoveshchensk)

rusia@mail.ru

This paper presents the results of studying the effect of the deck of the therapeutic table of the Electa Synergy accelerator and the fixation device for the chest on the distribution of the absorbed dose on the surface of the skin and the delivery of the dose to the localization of the tumor.

DOI:10.22250/9785934934195_159

Пучки высокоэнергичных фотонов и электронов используются в лучевой терапии онкологических заболеваний. Для увеличения эффективности облучения злокачественной опухоли (мишени) широкое распространение получили методы ее облучения с разных сторон, –например, применение встречных пучков, многопольного облучения с подведением поля с нижнего сектора и др. [1]. При реализации плана лучевой терапии необходимо учитывать влияние на распределение поглощенной дозы излучения в мишени таких факторов как дека терапевтического стола и фиксирующие устройства. Эти устройства, внешние по отношению к пациенту, оказывают влияние на поглощенную дозу, которое состоит в сложном сочетании уменьшения дозы в опухоли, изменения распределения дозы и возрастания кожной дозы [2].

В данной работе приведены результаты исследования влияния деки терапевтического стола ускорителя Electa Synergy и фиксирующего устройства для грудной клетки (отделение радиотерапии ГАУЗ АО «Амурский областной онкологический диспансер») на распределение дозы на поверхности кожи и доставку дозы до локализации опухоли (мишень). Для этого определяли поглощенную дозу в фантоме при наличии деки стола и фиксирующего устройства (ФУ) и их отсутствии, определяли величину дозы, формируемой на поверхности кожи, и рассчитали величину погрешности дозы, доставляемой к мишени.

В библиотеку программы планирования лучевой терапии необходимо включить характеристики стола и фиксирующих устройств. Планирующая система использует эти данные для расчета поглощенной дозы при многополярном планировании с использованием полей, направленных с нижнего

сектора. Если этих данных не будет в планирующей системе, то она произведет расчет поля большее по мониторным единицам, что может привести к ожогам кожи пациента и увеличению погрешности доставляемой к мишени дозы. Для подтверждения правильности расчета планирующей системой значения поглощенной дозы необходимо непосредственное измерение дозы в фантоме. Это позволит учитывать при планировании лучевой терапии правильное распределение дозы в мишени и на поверхности кожи при реализации многополярного плана.

Для исследования поглощения излучения декой стола линейного ускорителя Elekta synergy и фиксирующим устройством использовали 7 пластин эквивалента твердотельного фантома «белая вода», а для исследования поглощения излучения на поверхности кожи – одну пластину. Измерение поглощенной дозы проводили с помощью ионизационной камеры FC-65 G, помещенной в фантом. Процедура определения поглощенной дозы пучков электронов и фотонов высоких энергий в тканеэквивалентных фантомах проводили в соответствии с протоколом TRS-398.

Фантом устанавливали на терапевтическом столе и осуществляли центрирование и позиционирование фантома в горизонтальной плоскости с помощью встроенной системы позиционирования (рис. 1). Ионизационную камеру помещали в фантом и регулировали его высоту таким образом, чтобы центр камеры находился в изоцентре аппарата (рис. 1). Ионизационную камеру подключали к электрометру, на котором настраивали необходимый диапазон единиц измерения дозы в грях, полярность и рабочее напряжение – на дозиметре. В настройках линейного ускорителя Elekta Synergy выставляли размер поля 10×10 см. Далее отпускали 200 мониторных единиц (МЕ), чтобы предварительно облучить ионизационную камеру. Затем обнуляли значение на электрометре и проводили компенсацию темнового тока электрометра (компенсацию «фона»).

Исследование проводили при энергии фотонов 6 МэВ, для поля 10×10 см со 100 МЕ при расстоянии источник-поверхность (РИП), равно 100 см. Значения заряда на электрометре измеряли с помощью ионизационной камеры, по три раза. Измерения заряда осуществлялись: в фантоме – при отсутствии деки стола и ФУ (рис. 1); в фантоме при наличии деки стола (рис. 2); в фантоме, который являлся аналогом кожи (рис. 3); в фантоме при наличии фиксирующего устройства (рис. 4).

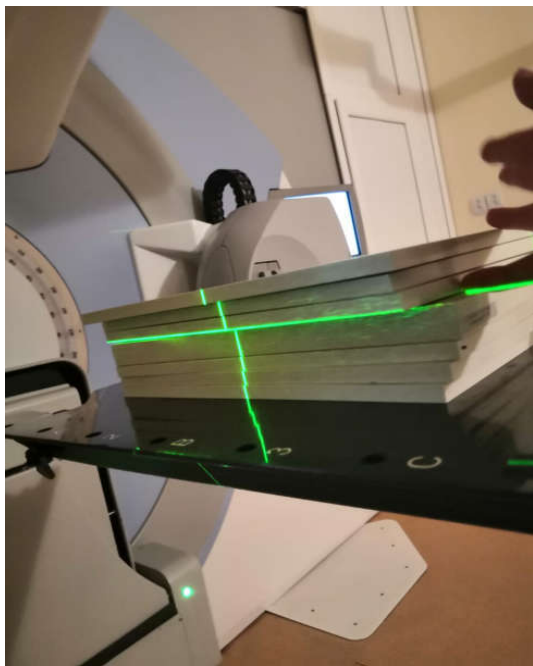


Рис. 1. Измерение заряда M_{raw} в фантоме при отсутствии деки стола и ФУ.



Рис. 2. Измерение заряда M_{raw} в фантоме при наличии деки стола.

Используя полученные результаты измерения заряда в электрометре (таблица 1), проводили расчет поглощенной дозы по формуле [3]:

$$D_W^Q = M_{raw} \cdot P_{ion} \cdot K_{TP} \cdot P_{elec} \cdot P_{pol} \cdot k_Q \cdot N_{D,W}, \quad (1)$$

где M_{raw} – измеренное значение заряда, Кл; P_{ion} – поправочный коэффициент, учитывающий эффективность сбора ионов с учетом рекомбинации; K_{TP} – поправочный коэффициент, учитывающий влияние температуры и давления окружающей среды; P_{elec} – поправочный коэффициент, учитывающий калибровку электрометра, при условии, что ионизационная камера и электрометр калибровались отдельно (в случае, когда ионизационная камера и электрометр калибруются вместе, данный коэффициент равен единице); P_{pol} – поправочный коэффициент, учитывающий влияние потенциалов противоположной полярности; k_Q – поправочный коэффициент, учитывающей качества пучка; $N_{D,W}$ – опорное излучение, указывается в паспорте камеры.

Результаты измерения заряда в электрометре M_{raw} и расчет поглощенной дозы D_W^Q , представлены в табл. 1 и 2.

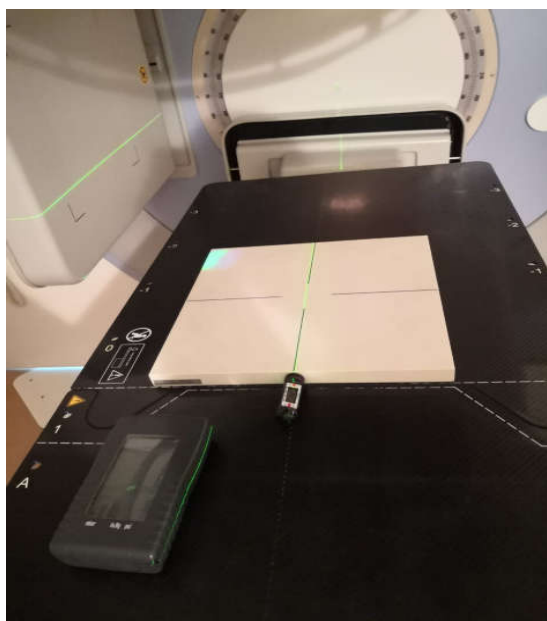


Рис. 3 Измерение заряда M_{raw} на поверхности кожи.



Рис. 4 Измерение заряда M_{raw} в фантоме при наличии ФУ.

Таблица 1)

Измеряемые и рассчитываемые параметры

Измеряемые и рассчитываемые параметры	Без деки стола		С декой стола	
	на поверхности кожи РИП = 100 см	в фантоме (толщина 8 см) РИП = 100 см	на поверхности кожи РИП = 100 см	в фантоме (толщина 8 см) РИП = 100 см
Среднее значение измеряемого заряда на электрометре M_{raw} , Кл	18,96	19,68	20,26	19,27
Поглощенная доза D_W^Q , Гр	1	1	1,07	0,98
Отклонение от установленной дозы, %	0	0	+6,85 %	-2,13 %

По полученным результатам (табл. 1) видно, что поглощённая доза в фантоме с учетом деки стола равна 0,98 Гр. Это означает, что дека стола поглотила дозу 2,13 % от установленной в 1 Гр. На поверхности кожи с учетом деки стола доза составляет 1,07 Гр, что дает отклонение от установленной дозы 6,85 %.

Таблица 2)

Измеряемые и рассчитываемые параметры с фиксирующим устройством (ФУ)

Измеряемые и рассчитываемые параметры	Без ФУ		С ФУ	
	на поверхности кожи РИП = 100 см	в фантоме (толщина 8 см) РИП = 100 см	на поверхности кожи РИП = 100 см	в фантоме (толщина 8 см) РИП = 100 см
Среднее значение измеряемого заряда на электрометре M_{raw} , Кл	18,96	19,68	20,35	18,83
Поглощенная доза D_W^Q , Гр	1	1	1,08	0,98
Отклонение от установленной дозы, %	0	0	+6,95 %	-2,13 %

Из табл. 2 видно, что поглощенная доза в фантоме с учетом ФУ равна 0,98 Гр. Это означает, что ФУ поглотило дозу 2,13 % от установленной дозы в 1 Гр. На поверхности кожи с учетом ФУ доза составляет 1,08 Гр, что дает отклонение от установленной дозы в 6,95 %.

Также стоит учесть, что ФУ находится на деке стола и сумма отклонения поглощенной дозы суммируется. То есть при реализации многополярного плана с использованием полей, направленных с нижнего сектора, общая доза не полностью подведена к мишени и будет образовываться пережог кожи.

В результате исследования установлено значение поглощенной дозы с учетом деки стола и фиксирующего устройства. Показано, что на поверхности кожи с учетом деки стола и фиксирующего устройства для грудной клетки поглощенная доза возрастает. Показано, что при реализации многополярного плана с использованием полей, направленных с нижнего сектора, общая доза не полностью подведена к мишени и будет образовываться пережог кожи, поскольку фиксирующее устройство находится на деке стола и сумма отклонения поглощенной дозы суммируется. Полученные результаты позволяют составить базу данных по значениям поглощенной дозы с учетом разных материалов деки стола и фиксирующих устройств для учета при лучевом планировании.

1. Климанов В. А. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование лучевой и радионуклидной терапии: учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ. – Часть 1. Радиобиологические основы лучевой терапии. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование дистанционной лучевой терапии пучками тормозного и гамма-излучения и элек., 2011. – 500 с. – ISBN 978-5-7262-1490-0. – Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/75875>

2. Сатункин Д.С. Влияние фиксирующих устройств фирмы Klarity на доставку дозы при лучевой терапии / Д.С. Сатункин, А.Н. Моисеев // Медицинская физика. – 2018. – №4. – С.24-29.

3. Лебеденко И.М. Анализаторы дозного поля. Рекомендации по комплектности и тестированию / И.М. Лебеденко, А.Ю. Смыслов, В.Г. Румянцев // Медицинская физика. – 2004. – №2(22). – С 41-51.

ВЫСОКОТОЧНЫЙ ЕМКОСТНЫЙ ПРИЕМНИК АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ

И.Ю. Рассказов, А.В. Горбунов, Н.А. Леоненко, В.А. Луговой

*Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук (г. Хабаровск)
igd@igd.khv.ru*

В статье представлен емкостный приемник с тонкопленочным диэлектриком для регистрации акустических сигналов в конденсированных средах. Диэлектрический слой формируется на поверхности алюминиевого электрода при анодировании. Оксидные пленки, полученные таким путем, эластичны, износостойки, механически и электрически прочны и составляют с электродом одно целое. Технология получения этих пленок хорошо изучена, проста и доступна. Даны технические характеристики емкостного приемника. Описаны варианты приемника для регистрации ультракоротких сигналов и сигналов поверхностных акустических волн (ПАВ).

HIGH PRECISION CAPACITIVE RECEIVER IN ACOUSTIC SIGNALS IN CONDENSED MEDIA

I.Y. Rasskazov Igor Yurievich, A.V. Gorbunov, N.A. Leonenko, V.A. Lugovoi

*Institute of Mining of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Khabarovsk)
igd@igd.khv.ru*

The article presents a capacitive receiver with a thin-film dielectric for registration of acoustic signals in condensed media. A dielectric layer is formed on the surface of the aluminum electrode during anodization. Oxide films obtained in this way are elastic, wear-resistant, mechanically and electrically strong and form a single whole with the electrode. The technology for obtaining these films is well studied, simple and accessible. The technical characteristics of the capacitive receiver are given. Receiver variants for registration of ultrashort signals and signals of surface acoustic waves (SAW) are described.

DOI:10.22250/9785934934195_163

Емкостный приемный преобразователь акустических сигналов измеряет два параметра в акустической волне – смещение и колебательную скорость.

Из выражения для коэффициента передачи емкостного приемника [1] следует, что модуль коэффициента передачи по смещению $|\dot{K}^{A\sim}(j\omega)|$ описывается выражением

$$|\dot{K}^{A\sim}(j\omega)| = \eta^{A\sim} \sqrt{\frac{1}{1+1/(RC_d \cdot \omega)^2}}, \quad (1)$$

а модуль коэффициента передачи по скорости равен $|\dot{K}^{V\sim}(j\omega)|$

$$|\dot{K}^{V\sim}(j\omega)| = \eta^{V\sim} \sqrt{\frac{1}{(RC_d \cdot \omega)^2 + 1}}, \quad (2)$$

где $\eta^{A\sim}$, $\eta^{V\sim}$ – чувствительности по смещению и по скорости соответственно; C_d – статическая емкость преобразователя; R – входное сопротивление предусилителя, на которое нагружен датчик; ω – круговая частота.

Из выражений (1) и (2) видно, что при выполнении условия $(RC_d \cdot \omega)^2 \geq 10$ $|\dot{K}^{A\sim}(j\omega)|$ приближается к $\eta^{A\sim}$, а $|\dot{K}^{V\sim}(j\omega)|$ к нулю и, следовательно, датчик в диапазоне частот $\omega \geq 3/RC_d$ работает в режиме

измерения смещения. И, наоборот, как следует из тех же выражений: при выполнении условия $(RC_d \cdot \omega)^2 \leq 10^{-1}$, $|\dot{K}^V(j\omega)|$ приближается η^V , $|\dot{K}^A(j\omega)|$ к нулю и, значит, в диапазоне частот $\omega \leq 1/3RC_d$ датчик измеряет колебательную скорость. Кроме того, существует область частот $1/3RC_d \leq \omega \leq 3/RC_d$, где емкостный приемник измеряет одновременно смещение и колебательную скорость в акустической волне. При значениях $C_d = 10^{-11}$ Ф, $R = 10^5$ Ом, в области частот до 50 кГц датчик измеряет колебательную скорость, от 50 до 500 кГц – суперпозицию колебательной скорости и смещения, а в области частот свыше 500 кГц – смещение.

Различные типы емкостных преобразователей для регистрации смещения и скорости известны давно и широко описаны в литературе [1]. Как правило, они представляют собой два электрода, между которыми находится либо воздушный промежуток, либо диэлектрические пластины из различных материалов (слюда, фторопласт и т.д.).

К недостаткам емкостных преобразователей с воздушным зазором можно отнести невысокую чувствительность, которая, как правило, не превышает 10^6 В/м и определяется низкой электропрочностью воздушного промежутка [1], сложностью конструкции, которая возникает из-за необходимости точного выставления и поддержания величины воздушного зазора в самых разных условиях эксплуатации этих датчиков.

В ультразвуковых измерениях емкостные преобразователи с диэлектрическими пластинами (например, из слюды или фторопласта) находят преимущественное применение, поскольку обладают большей чувствительностью и более удобны в эксплуатации. Однако чувствительность этих преобразователей существенно меняется со временем в результате накопления объемного заряда (из-за миграционной поляризации), создающего обратное поле в диэлектрике [1]. Так, чувствительность преобразователя со слюдяной пластиной уменьшается в 20 раз в течение 30 мин. И в дальнейшем монотонно убывает, что не позволяет проводить долговременные измерения. Аналогичные результаты получаются при использовании фторопластовых пленок. Различные методы по предварительной подготовке слюдяных пластинок

Для устранения отмеченного недостатка желательно в качестве диэлектрика использовать химически чистый материал с несложной структурой. Этим требованиям в полной мере соответствует диэлектрический слой, который получается при анодировании на поверхности алюминия или его сплавов. Оксидные пленки, полученные таким путем, эластичны, износостойки, механически и электрически прочны и составляют с электродом одно целое. Технология получения этих пленок хорошо изучена, проста и доступна.

Использование оксидных пленок в качестве диэлектрика емкостного преобразователя позволило создать датчик акустических сигналов, обладающий высокими техническими и эксплуатационными характеристиками. При этом электрод преобразователя изготавливался из алюминия или его сплавов, диэлектрический слой получался анодированием этого электрода, а вторым электродом служил исследуемый объект.

На рис.1 приведена схема емкостного преобразователя, состоящего из электрода 1 (объект исследования) и электрода 3 с диэлектрической пленкой 2. Как показывают акустические опыты и измерения электрической емкости преобразователя, между электродом 1 и диэлектрическим слоем 2 отсутствуют акустический контакт и всегда имеется некоторый воздушный зазор 4, величина которого лежит в пределах от 0,3 до 0,5 мкм. Напряжение источника питания U_0 берется близким к напряжению пробоя диэлектрического слоя, сопротивление $R_0 \gg R$, а емкость $C_d \ll C$, где C_d – статическая емкость преобразователя (рис. 1). При регистрации акустических сигналов емкость преобразователя C_d изменяется из-за модуляции воздушного зазора, и на выходе датчика формируется переменное напряжение $U_{\sim}$, величина которого пропорциональна либо смещению, либо колебательной скорости в акустической волне.

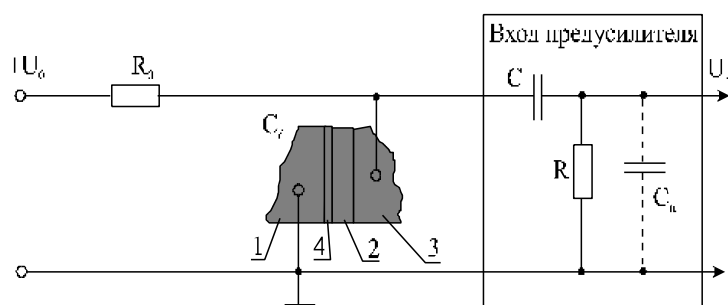


Рис. 1. Схема емкостного преобразователя акустических сигналов.

1 – объект исследования; 2 – диэлектрическая пленка; 3 – электрод; 4 – воздушный зазор;
 U_0 – напряжение источника питания; R_0 – зарядное сопротивление.

Представим результаты расчета технических характеристик емкостного датчика (имеющие экспериментальное подтверждение): рабочей полосы частот, чувствительности, порога чувствительности, динамического диапазона.

1. Полоса рабочих частот, Гц	$0-10^{12}$
2. Чувствительность, В/м	$2 \cdot 10^8$
3. Порог чувствительности, мВ/Гц ^{1/2}	$2 \cdot 10^{-19}$
4. Динамическая диапазон, дБ	120

Для регистрации акустических ультракоротких сигналов наносекундной длительности плоскую форму электрода следует заменить на сферическую, причем радиус сферы рассчитывается из соотношения

$$R \leq \frac{2zc}{2,89d_o} \Delta t_{\phi p}, \quad (3)$$

где z – расстояние между точкой возбуждения и приема; c – скорость распространения акустической волны в образце; d_o – толщина анодной пленки; $\Delta t_{\phi p}$ – допустимое затягивание фронта акустического импульса.

Необходимо отметить существенную особенность емкостного датчика, позволяющую использовать его для регистрации ПАВ в широком диапазоне частот: при работе с емкостным приемником легко организовать точечный прием без потери чувствительности, поскольку последняя не зависит от диаметра электрода. Поэтому при регистрации ПАВ особенно перспективно применение емкостных датчиков со сферическим электродом.

Расчеты показывают, что верхнюю граничную частоту диапазона исследования ПАВ с помощью подобного датчика можно оценить по формуле

$$F_{\overline{m}} = \frac{C_R}{2K} \left(\frac{10E_{np}d_2R}{h} \right)^{-1/2}, \quad (4)$$

где C_R – скорость распространения ПАВ; η – чувствительность емкостного приемника; E_{np} , d_2 – электропрочность и толщина анодной пленки; R – радиус электрода; $K = 1,8$.

При $R = 2$ мм, $\eta = 10^8$ В/м, $E_{np} = 30$ В/мкм, $d_2 = 20$ мкм, $C_R = 3 \cdot 10^6$ мм верхняя граничная частота составит $F_{\overline{m}} = 2,4 \cdot 10^6$ Гц.

1. Гитис М.Б. Определение некоторых параметров датчиков ультразвуковых дефектоскопов / М.Б. Гитис, В.М. Добромислов, В.В. Сажин // Дефектоскопия. – 1970. - №1. – С.51-57.

ПРЕИМУЩЕСТВА И ОСОБЕННОСТИ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO

С.В. Миклашевич, В.В. Насыров

Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

000612@pnu.edu.ru

В статье рассматривается аппаратно-программная платформа Arduino, преимущества и особенности ее применения при создании различных технических систем.

BENEFITS AND FEATURES OF THE ARDUINO PLATFORM

S.V. Miklashevich, V.V. Nasyrov

Pacific National University (Khabarovsk)

000612@pnu.edu.ru

This article discusses the Arduino hardware and software platform, the advantages and peculiarities of its application when creating various technical systems.

DOI:10.22250/9785934934195_166

Arduino была создана итальянским преподавателем проектного института Interaction Design Institute Ivrea Massimo Banzi в 2005 г. Во всей линейке аппаратно-программных комплексов, выпускающихся под брендом Arduino, основой аппаратной части является печатная плата с микроконтроллером. Функционал основной платы может дополняться картами расширения (шилды). Благодаря им Arduino способна принимать различные цифровые и аналоговые данные широкого класса устройств, имеет возможность управлять различными исполнительными модулями. С помощью электромеханических разъемов к контроллеру можно подключить, например, Ethernet Shield, XBee Shield, MicroSD Shield, MP3 Shield. [1]. Не все платы одинаковы, хоть и имеют единый форм-фактор. Платы могут различаться по количеству встроенной флеш-памяти, тактовой частоте процессора, размерам и т.д. В табл. представлены технические характеристики плат Arduino Nano, Arduino Uno и Arduino Due.

Плата Arduino Uno построена на микроконтроллере ATmega328. На плате доступно 6 аналоговых входов, 14 цифровых выводов, которые могут работать как на вход, так на выход, кварцевый генератор на 16 МГц [3]. Плата может питаться либо через встроенный USB-разъем, либо через подключение разъема питания к источнику с напряжением от 7 до 12 В. Также плату можно запитать с помощью батареи типа Крона через переходник питания.

Основные характеристики Arduino Nano, Arduino Uno, Arduino Due

Название платы	Микроконтроллер	Флеш-память	ОЗУ	Рабочее напряжение	Тактовая частота	Размеры
Arduino	Вид	Кбайт	Кбайт	В	МГц	мм
Nano	ATmega168/32	16/32	1/2	5	16	43×18
Uno	ATmega328	32	2	5	16	66,8×53,3
Due	AT91SAM3X8	512	96	3.3	84	101,6×53,3

Внешний вид платы Arduino Uno представлен на рис. 1, а на рис. 2 – ее принципиальная схема.

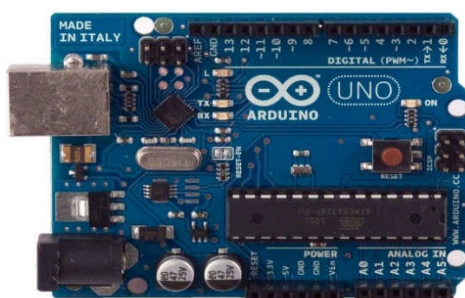


Рис. 1. Плата Arduino Uno.

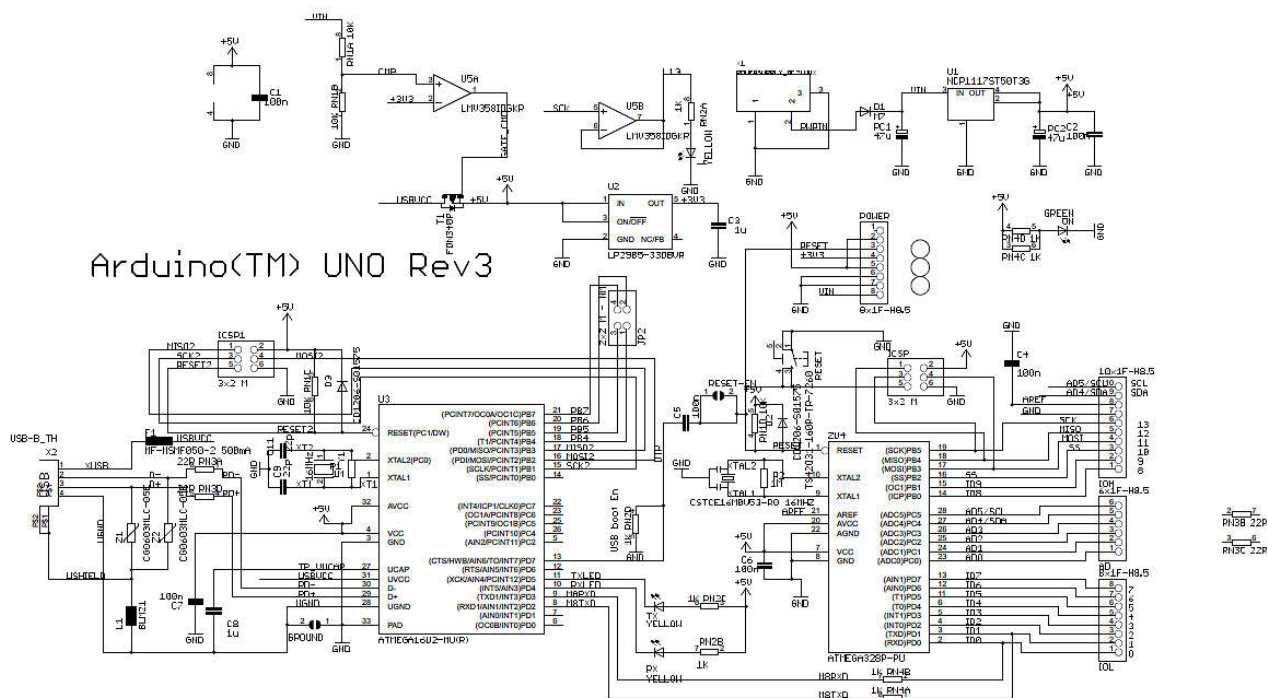


Рис. 2. Принципиальная схема Arduino Uno.

В программной части, базирующейся на бесплатной среде разработки Arduino IDE, заключается уникальность платформы. Для использования ее нужно владеть только базовыми навыками программирования. Arduino язык программирования является наследником открытого языка Processing и Wiring и имеет упрощенный синтаксис, относительно простой в освоении [2]. Программная оболочка Arduino IDE содержит текстовый редактор, менеджер проектов, компилятор и инструменты для загрузки программы в контроллер.

Основные функции для управления цифровыми контактами платы Arduino UNO:

PinMode() используется для задания режима работы контакта (вход или выход). В функции указывается номер контакта, с которым производится работа;

DigitalRead() считывает текущее значение с заданного контакта – его значение может быть HIGH или LOW;

DigitalWrite() передает определенное значение на заданный контакт – оно может быть HIGH или LOW.

Для аналоговых контактов A0, A1, A2, A3, A4, A5 существуют функции *analogRead()* и *analogWrite()*. Первая считывает данные с указанного контакта, вторая позволяет передавать значения.

Платформа Arduino имеет ряд существенных преимуществ: платы имеют относительно невысокую стоимость, низкий порог вхождения для использования, но важнейшая особенность платформы – полностью открытая архитектура как с аппаратной, так и программной, точки зрения, что позволяет

не ограничиваться официальной продукцией компании, а либо самостоятельно изменять или дополнять функционал плат на свой лад, по своему усмотрению использовать разработки большого сообщества платформы.

-
1. Аппаратная платформа Arduino [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://arduino.ru/Hardware> (дата обращения 11.07.23).
 2. Курс «Arduino для начинающих» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://edurobots.ru/kurs-arduino-dlya-nachinayushhix> (дата обращения 11.07.23).
 3. Плата Arduino Uno – описание, схема, распиновка [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://votiq.ru/wiki/arduino-uno-review/> (дата обращения 03.05.23).

УДК 535.214; 544.77

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СЕДИМЕНТАЦИЮ ЧАСТИЦ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

И.А. Касьянов, В.М. Петкевич, С.А. Пячин

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (г. Хабаровск)
ikasghbdet@yandex.ru

Представлены результаты сравнительного исследования осаждения субмикронных частиц оксида кремния в воде в гравитационном поле в условиях, когда дисперсная среда не облучалась или получала мощное лазерное облучение. Частицы имели диаметр от 0,2 до 1 мкм. Показано, что воздействие лазерного потока мощностью 300 мВт на суспензию увеличивает скорость седиментации частиц, а это приводит к снижению их относительной концентрации на 40 % за 50 минут.

EFFECT OF LASER IRRADIATION ON SEDIMENTATION OF PARTICLES IN LIQUID

I.A. Kasyanov, V.M. Petkevich, S.A. Pyachin

Far Eastern State Transport University (Khabarovsk)
ikasghbdet@yandex.ru

The results of a comparative study of the deposition of submicron silicon oxide particles in water in a gravitational field under conditions when the dispersed medium was not irradiated or irradiated by powerful laser irradiation are presented. The particles had a diameter of 0.2 to 1 microns. It was found that the effect of a 300 MW laser beam on the suspension increases the sedimentation rate of particles, which leads to a decrease in their relative concentration by 40 % in 50 minutes.

DOI:10.22250/9785934934195_168

Осаждение твердых частиц в жидкости в гравитационном поле является широко распространенным методом сепарации и гранулометрического анализа полидисперсных систем [1; 2]. Этот метод характеризуется простотой и отсутствием необходимости в сложном оборудовании. Контроль над осаждением вещества производят взвешиванием осадка или измерением оптической плотности жидкой

среды [3]. Суспензия в процессе седиментации частиц освещается, что легко зарегистрировать с помощью фотометрических приборов. Однако метод седиментации имеет некоторые недостатки: прежде всего – низкие скорости осаждения частиц, размеры которых меньше 1 мкм. Это объясняется тем, что на движение субмикронных частиц ко дну кюветы начинают оказывать влияние броуновское движение и обратное диффузионное перемещение в сторону меньших концентраций. Увеличить скорость осаждения можно с помощью центрифугирования. Другой способ заключается в использовании силы светового давления, вынуждающего частицы двигаться преимущественно вдоль направления распространения лазерного луча, а не поперек к направлению пучка [4].

В работах [5; 6] рассмотрена математическая модель разделения наночастиц по размерам в условиях воздействия мощного лазерного излучения на прозрачную, т.е. непоглощающую жидкую среду. Показано, что скорость осаждения под действием лазерного излучения зависит от радиуса частицы как степенная функция 5-й степени. Это утверждение может быть положено в основу развития лазерного метода разделения частиц разного диаметра внутри полидисперсной системы. Однако для практической реализации данной методики требуется подтверждение опытным путем. Цель нашей работы – исследование осаждения субмикронных частиц в жидкости в гравитационном поле при условии, что она подвержена воздействию мощного лазерного потока. Направленное перемещение частиц в суспензии под действием силы светового давления контролировалось по изменению оптической плотности среды на разных высотах кюветы.

Установка для исследований

Опыты проводили с помощью лазерной установки, схема которой представлена на рис. 1. Кварцевую кювету с размерами 40×10×10 мм закрепляли неподвижно на платформе. В кювету наливали суспензию, содержащую частицы с известными размерами. Высота уровня суспензии в кювете равнялась 30 мм. Были проведены сравнительные опыты по осаждению частиц в отсутствие и при наличии мощного светового потока. В качестве источника облучения использовали полупроводниковый лазер LSR532NL-300 с длиной волны 532 нм и переменной выходной мощностью до 350 мВт. Такой источник позволял достичь предельной плотности светового потока около $2 \cdot 10^7$ Вт/м².

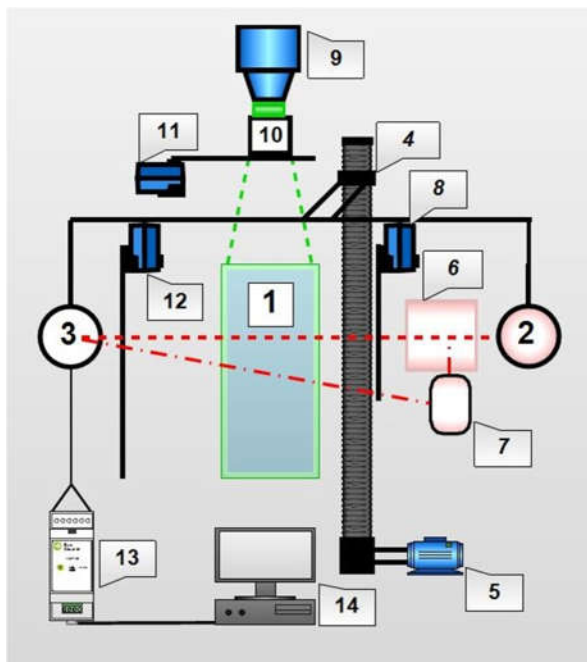


Рис. 1. Схема лазерной установки для изучения осаждения частиц:

1 – кювета с жидкостью и частицами; 2 – лазер-зонд; 3 – фотодиод; 4 – вал с резьбой; 5 – шаговый двигатель; 6 – светоразделительная призма; 7 – зеркало; 8, 11, 12 – заслонки; 9 – полупроводниковый лазер LSR532NL-300; 10 – линза; 13 – АЦП; 14 – устройство сбора и хранения данных.

Оптическую плотность суспензии определяли на основе измерения интенсивности прошедшего через дисперсную среду излучения лазерного луча – зонда мощностью 5 мВт. В качестве датчика использовали фотодиод ФД-24К. Лазер-зонд и фотоприемник одновременно поднимались и опускались с постоянной скоростью, что давало возможность измерять оптическую плотность жидкости на разной высоте кюветы через 6,5 мин. Регистрация сигнала фотодиода происходила через каждые 3 мм передвижения, при этом штанга с лазером-зондом и фотодатчиком останавливалась и мощный световой поток перекрывался заслонкой, чтобы не было дополнительной засветки при измерении. Кроме того, была учтена корректировка на возможное временное изменение интенсивности зондирующего лазерного луча. Для этого луч зонда с помощью специальной призмы был разделен на два: один обходил кювету с помощью системы зеркал и попадал на фотодатчик, а второй луч проходил сквозь кювету со суспензией и попадал на тот же фотодиод. Таким образом, с течением времени регистрировали попеременно основной световой сигнал $I_1(t)$ и сигнал $I_2(h,t)$ от луча, прошедшего через жидкость с частицами.

В экспериментах использовали суспензию, основой которой была дистиллированная вода, а наполнителем служили частицы диоксида кремния, полученные механическим измельчением с последующим отсеиванием крупных микрочастиц. Размеры частиц были определены методом лазерной дифракции с помощью анализатора Nanotrac. Плотность распределения частиц SiO_2 по размерам показана на рис. 2, на котором видно, что диаметры частиц лежат в диапазоне от 200 до 1000 нм. Наибольшую долю в полидисперсной суспензии составляют частицы диаметром 400 нм.

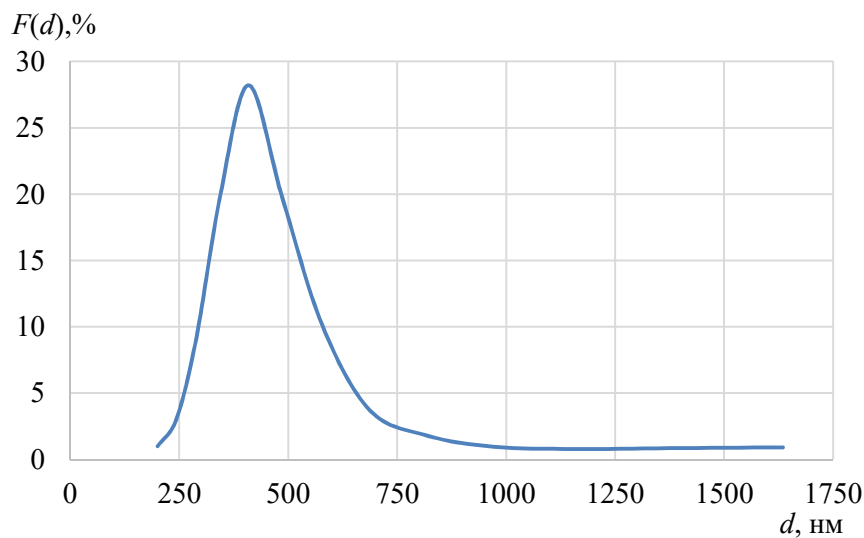


Рис. 2. Плотность распределения частиц диоксида кремния по размерам.

Кинетику изменения концентрации частиц на разных глубинах оценивали по оптической плотности

$$D(h, t) = C(h, t)\alpha x = \ln \frac{I_{02}(t)}{I_2(h, t)}, \quad (1)$$

где x – ширина кюветы ($x = 10$ мм); α – показатель поглощения дисперсной системы, который зависит от материала частиц и длины волны излучения; $I_{02}(t)$ – интенсивность лазерного луча-зонда, который попадает на стенку кюветы после прохождения через светоразделяющую призму.

Между $I_{02}(t)$ и интенсивностью основного луча $I_1(t)$ существует прямая зависимость

$$I_{02}(t) = \kappa I_1(t), \quad (2)$$

поэтому выражение (1) можно переписать как

$$C(h, t) = \frac{1}{\alpha x} \ln \frac{\kappa I_1(t)}{I_2(h, t)}. \quad (3)$$

Поскольку величина α неизвестна, относительное изменение концентрации частиц определяли как отношение значения концентрации в данный момент времени на определенной высоте к начальной концентрации, которая при хорошем исходном перемешивании суспензии, являлась величиной постоянной C_0 :

$$\omega(h, t) = \frac{C(h, t)}{C_0} = \frac{\ln I_1(t) - \ln I_2(h, t)}{\ln I_1(0) - \ln I_2(0)}. \quad (4)$$

Предполагается, что в начальный момент времени прошедший сигнал I_2 не зависит от высоты, и поэтому $\omega(h, 0) = 1$. Когда относительная концентрация частиц снижается, то суспензия осветляется, а при увеличении концентрации оптическая плотность суспензии возрастает.

Результаты экспериментальных работ

Результаты опытов показали, что скорость осаждения частиц без лазерного воздействия отличается от режима, когда такое воздействие было применено. На рис. 3 показаны графики относительной концентрации частиц в зависимости от высоты слоя суспензии для двух разных условий проведения экспериментов. Верхняя поверхность жидкости, которая подвергалась облучению, соответствует $h = 30$ мм, а дно кюветы – $h = 0$.

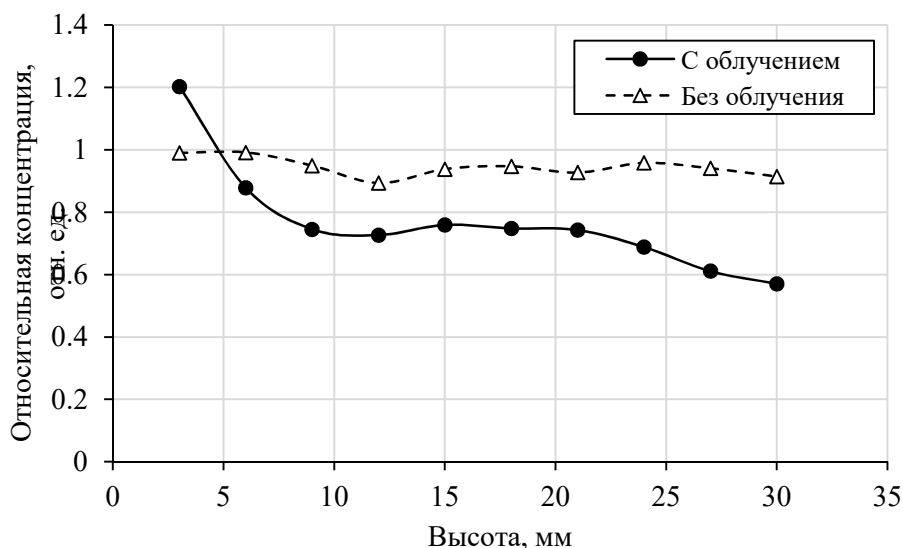


Рис. 3. Изменение относительной концентрации частиц на разных высотах после воздействия лазерного потока в течение 50 мин.

Без воздействия светового потока концентрация частиц за счет осаждения в гравитационном поле за 50 мин. наблюдения снизилась примерно на 10 % в слоях суспензии, расположенных выше 5 мм от дна кюветы. Однако в условиях облучения потоком лазерного излучения мощностью 300 мВт концентрация частиц за то же время уменьшилась уже на 40 % в верхних слоях, и на 20 % – в центральной области. Вблизи дна кюветы происходит увеличение содержания частиц на ~ 20 %. Таким образом, результаты проведенного опыта показывают, что воздействие внешнего облучения значительно ускоряет процесс осаждения частиц в жидкостях и может быть использовано как метод сепарации и диагностики дисперсных сред.

1. Ходаков Г.С., Юдкин Ю.П. Седиментационный анализ высокодисперсных систем. – М.: Химия, 1981. – 192 с.
2. Шишкин А.С., Илюнина Т.В. Исследование процесса седиментации полидисперсного порошка // Огнеупоры и техническая керамика. – 2011. – № 4–5. – С. 11–13.
3. Сазанцев М.А., Игнатенко А.В. Метод анализа скорости седиментации частиц в водных средах // Труды БГТУ. – 2013. – № 4. – С. 48–50.

4. Афанасьев А.А., Гайда Л.С., Матук Е.В., Свистун, А.Ч. Движение серебряных наночастиц в жидкости с различной вязкостью под действием сил светового давления // Проблемы физики, математики и техники. – 2016. – № 4 (29). – С. 7–12.

5. Иванова Г.Д., Хе В.К., Иванов И.В. Оптическая седиментация полидисперсных смесей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 8. – С. 141–143.

6. Иванов В.И., Пячин С.А. Сепарация частиц в полидисперсной нанодисперсии в поле лазерного излучения // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2021. – Вып. 13. – С. 146–155.

УДК 62-52, 53.08

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОММУТАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ОБРАЗЦА С КОНТРОЛЕМ ВРЕМЕНИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

И.А. Рябов, Д.О. Струков, Д. В. Фомин

Амурский государственный университет» (г. Благовещенск)

rybovilay@gmail.com

В работе представлен результат модернизации устройства переключения источников питания, подключаемых к нагрузке в виде подложки, в качестве которой в лаборатории физики поверхности НОЦ имени К.Э. Циолковского выступают пластины кремния. Данные пластины используются как основа при формировании тонких пленок различных силицидов. Предлагаемое устройство позволяет реализовать два способа переключения источников питания: с помощью обратной связи и по таймеру. Экспериментально, при тестировании прототипа прибора, установлено, что оптимальное время переключения по таймеру с высоковольтного источника тока на низковольтный, подключаемых к нагрузке, составляет 10 сек.

AUTOMATION OF THE PROCESS OF SWITCHING SAMPLE POWER SUPPLIES WITH SWITCHING TIME CONTROL

I.A. Ryabov, D.O. Strukov D. V. Fomin

Amur State University (Blagoveshchensk)

rybovilay@gmail.com

The paper presents the result of the modernization of the switching device of power sources connected to the load in the form of a substrate, which in the Laboratory of Surface Physics of the K.E. Tsiolkovsky Scientific and Educational Center are silicon plates. These plates are used as a basis for the formation of thin films of various silicides. The proposed device allows you to implement two ways of switching power sources: by feedback and by timer. Experimentally, when testing the prototype of the device, it was found that the optimal timer switching time from a high-voltage current source to a low-voltage current connected to the load is 10 sec.

DOI:10.22250/9785934934195_172

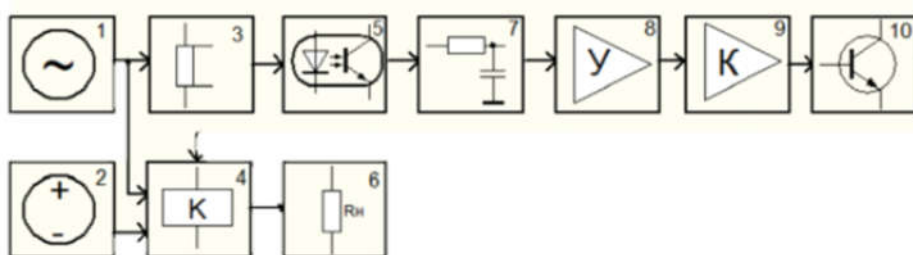
В НОЦ им. К.Э. Циолковского на базе лаборатории физики поверхности с 2007 г. и по настоящее время осуществляются эксперименты по формированию на кремниевых подложках пленок полупроводниковых силицидов методами реактивной или твердофазной эпитаксии, соосаждением либо послойным осаждением. В условиях сверхвысокого вакуума получали пленки Ca_2Si , FeSi_2 , BaSi_2 и Mg_2Si [1 -8]. Кремниевые пластины, как правило, изготавливаются из промышленных шайб с разным типом

проводимости и удельным сопротивлением от 5 до 85 Ом·см, – например, КДБ100 Si(111), КЭФ-100 Si(111) и др. Чтобы прогреть кремниевую подложку, необходимо осуществить управляемый электрический пробой, который достигается переключением нагрузки (Si) с высоковольтного на низковольтный источник.

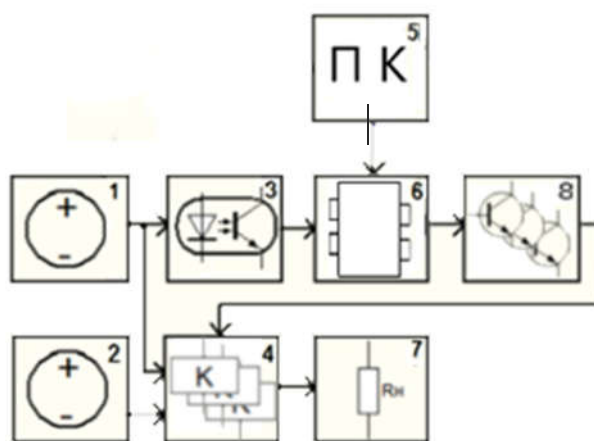
В работах [2; 3] был представлено описание устройства автоматического переключения источников питания образца (рис 1 а). Рассмотрим его основные составляющие. Так, компаратор применён, как надежный элемент автоматики, осуществляющий управление электронным ключом, срабатывающий по заранее установленному уровню опорного напряжения. В качестве электронного ключа использован составной биполярный транзистор, построенный по схеме Дарлингтона [4; 5]. Коммутация источников тока осуществляется с помощью малогабаритного реле, рассчитанного на большие токи нагрузки. В качестве шунта и датчика применена лампа накаливания мощностью 150 Вт.

К недостаткам рассмотренного устройства можно отнести: отсутствие возможности одновременного подключения нескольких образцов к блокам питания, громоздкий шунт (в виде лампы накаливания) и отсутствие управления устройством с помощью программного обеспечения, установленного на компьютер. Поэтому авторами был предложен усовершенствованный вариант прибора (рис. 1 б).

На функциональной схеме устройства (рис. 1 б) цифрами обозначены: 1 – высоковольтный источник постоянного тока (160 В, 2 А); 2 – низковольтный источник постоянного тока (20 В, 10 А); 3 – гальваническая развязка в виде оптрона; 4 – узел коммутации в виде реле; 5 – персональный компьютер; 6 – микроконтроллер; 7 – нагрузка (кремниевая подложка); 8 – электронный ключ (составной транзистор).



а)



б)

Рис. 1. Функциональная схема устройства переключения: а) исходный вариант[3]; б) предлагаемый усовершенствованный вариант.

В усовершенствованном устройстве, в отличие от [2; 3], в качестве высоковольтного использован источник не переменного, а постоянного тока (рис.1 а, блок № 1), к тому же с возможностью программного ограничения силы тока на выходе, благодаря чему отпала необходимость в шунте (рис.1 а, блок № 3). Блоки фильтра, повторителя сигнала и компаратора (рис.1 а – № 7, 8, 9), заменены на блок микроконтроллера (рис.1 б, блок № 6), полностью реализующего их функции.

В предложенном устройстве заложена также возможность одновременного переключения нескольких нагрузок путем переключения нескольких реле одновременно (рис.1 б, блок № 4).

Посредством микроконтроллера (на рис.1 б, блок № 6), устройство управляется персональным компьютером с помощью программы, написанной на языке Python [6]. Данная программа позволяет ввести команды управления процессом коммутации либо команды для тестирования основных функциональных узлов прибора на холостом ходу. Коммутация источников тока, подключаемых к нагрузке, может осуществляться двумя вариантами. Первый – когда задействуется обратная связь от высоковольтного источника тока, реализованная на оптронной развязке [7; 8]. Она служит для передачи на вход микроконтроллера сигнала, соответствующего уровню падения напряжения в цепи нагрузки. Когда достигается установленное значение напряжения, происходит переключение нагрузки с высоковольтного источника постоянного тока (рис.1 б, блок № 1), на низковольтный (рис.1 б, блок № 2).

Второй вариант коммутации может осуществляться с помощью таймера, посредством ввода временных значений в подготовленную программу, где он реализован. Экспериментально, при тестировании прототипа прибора (рис.1 б), установлено, что оптимальное время переключения по таймеру нагрузки с высоковольтного источника тока на низковольтный составляет 10 сек.

1. Силицид магния – перспективный материал для оптических датчиков / А.В. Поляков, Д.В. Фомин, Н.С. Новгородцев // Успехи прикладной физики. – 2023. – Т. 11, № 1. – С. 52-60.

2. Модернизация устройства автоматического переключения источников питания образца / Д. В. Фомин, А. В. Поляков, Д. О. Струков // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование : Материалы XX региональной научной конференции, Хабаровск, 03–07 октября 2022 года / под ред. А.И. Мазура. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2022. – С. 153-155. – EDN NRYHON.

3. Устройство для автоматического переключения источников питания нагрузки / Д.В. Фомин, Д. О.Струков, А. В. Поляков // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки: 2022. – № 97. – С. 54-58. DOI 10.22250/20730268_2022_97_54.

4. Широкополосные сверхвысокочастотные усилители на основе биполярных и гетеробиполярных транзисторов / Е.М. Савченко, А.Ю. Кузьмин // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 608-610. – EDN POLREN.

5. Оптимизация статических и динамических параметров и повышение радиационной стойкости составных транзисторных структур / Е.А. Ладыгин, М.П. Коновалов, М.Н. Орлова [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру». – 2006. – № 1-2. – С. 24-28. – EDN NAYCRX.

6. Язык программирования Python в научных вычислениях / А. Г. Савина, Л. И. Малявкина, Ю. Я. Герасимова, Д. Е. Жилина // Инфраструктура цифрового развития образования и бизнеса. Сборник научных трудов национальной научно-практической конференции, Орел, 01– 30 апреля 2021 года / под ред. Л.И. Малявкиной. – Орёл: Орловский государственный университет экономики и торговли, 2021. – С. 64-69. – EDN CPPPGG.

7. Гальваническая оптронная развязка в цепи обратной связи импульсных стабилизированных ИП на примере продукции NationalSemiconductor / А. Леонов, И. Кривченко // Компоненты и технологии. – 2010. – № 6(107). – С. 34-36. – EDN MWGBNP.

8. Оптоэлектронные резистивные цепи / Ш.С. Мухиддинов, Э.Х. Абдураимов, Р.Ч. Каримов // Наука и современное общество: взаимодействие и развитие. – 2017. – Т. 2, № 1(4). – С. 72-75. – EDN YRZPYN.

Секция 5

Физическое образование (школьное и вузовское)

УДК 372.853

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ МУЛЬТИМЕДИА НА УРОКАХ ФИЗИКИ

Е.Г. Аплачкина, Ю.А. Рябцева, О.Е. Кадеева

*Дальневосточный федеральный университет. Школа педагогики (г. Владивосток)
lekaterinaaplachkina9@gmail.com*

В данной статье рассматривается понятие «мультимедиа», а также место средств мультимедиа на уроках физики. Предложены варианты использования мультимедийных технологий в процессе обучения.

USING MULTIMEDIA IN PHYSICS LESSONS

E.G. Aplachkina, Yu.A. Ryabtseva, O.E. Kadeeva

*Far Eastern Federal University, (Vladivostok)
lekaterinaaplachkina9@gmail.com*

This article discusses the concept of "multimedia", as well as the place of multimedia in physics lessons. The variants of using multimedia technologies in the learning process are proposed.

DOI:10.22250/9785934934195_175

В настоящее время, в эпоху стремительного развития информационных технологий, влияющих на формирование современного социума, большое внимание уделяется информационной грамотности общества, уровень развития которой влияет на социализацию личности. По этой причине, формирование у обучающихся информационной компетентности и умений применять ее в процессе обучения является приоритетной задачей современного образования. Основной вклад в решение данной задачи вносит использование учителями в процессе обучения новейших информационных технологий.

В современных требованиях к результатам образования, в том числе и к результатам обучения физике, на первое место вместе с формированием конкретных знаний и умений становится развитие метапредметных знаний и умений, а также становление научного мышления. Развитие метапредметных знаний и умений включает в себя формирование универсальных учебных действий; самостоятельности учащихся; представления метапредметных понятий; мировоззрения, совпадающего с уровнем развития науки на момент обучения [1]. Поэтому развивать информационную грамотность и компетентность учащихся возможно не только на уроках информатики.

На достижение образовательных целей, а также на качество обучения физике оказывает влияние не только структура системы образования, но и средства, формы и методы обучения, используемые в образовательном процессе.

Одним из средств обучения является технология мультимедиа. Особенность таких технологий

заключается в воздействии на познавательную деятельность учащихся через специально разработанные средства. Такие технологии несут в себе новые способы представления, хранения, передачи и обработки информации и положительно влияют на эффективность учебной деятельности.

Мультимедиа представляет собой совокупность аппаратных и программных средств, предоставляющих возможность создавать и воспроизводить информационный материал (ресурс), который объединяет в себе визуальную статическую (графика, текст, числа) и динамическую (видеофрагменты, анимация, аудио) информацию, с возможностью организации интерактивной образовательной среды, с помощью гиперссылок.

Средства мультимедиа можно разделить по методическому и функциональному назначению.

Классификация по методическому назначению:

наставнические (изучение нового материала учащимися);

тренировочные (отработка умений и навыков учащихся при повторении и закреплении изученного материала);

информационно-справочные (получение учащимися необходимой информации);

демонстрационные (наглядное представление учебного материала, визуализация изучаемых закономерностей, иллюстрация взаимосвязей между объектами);

имитационные (изучение основных функциональных или структурных особенностей объекта, на основе определенного числа параметров);

игровые (развитие мышления или воспроизведение в игровой форме учебной ситуации в целях выбора наиболее подходящего решения или построения порядка дальнейших действий);

досуговые (внеучебная работа, направленная на развитие внимания, реакции и логического мышления и т.д.).

Классификация по функциональному назначению:

обучающие (предоставляют учебную информацию, направляя обучение, опираясь на имеющиеся знания, индивидуальные возможности и интересы учащихся);

диагностические (определяют уровень и интеллект учащегося);

инструментальные (проектируют программные средства, подготавливают или генерируют учебно-методические материалы, создают сервисную надстройку);

предметно-ориентированные (воспроизводят различные предметные модели);

управляющие (руководят деятельностью обучающихся во время выполнения работ);

административные (автоматизируют процесс организации обучения и делопроизводство;

игровые (обеспечивают всевозможные виды игровой и учебно-игровой деятельности).

Мультимедийные средства обучения не смогут в полной мере заменить традиционные. Сочетание в процессе обучения мультимедийных и традиционных средств положительно скажется на активности учащихся во время урока. Использование различных способов представления информации и разных видов деятельности поможет избежать быстрой утомляемости учеников. Учебный материал лучше усваивается, когда задействованы различные чувственные восприятия информации (зрительные, слуховые, тактильные и др.). Средства мультимедиа открывают большие возможности для работы с информацией.

Физика, как школьная дисциплина, имеет свои определенные особенности, поэтому в процесс ее преподавания легко внедрить мультимедийные средства. Их можно применять во многих типах урока и на разных его этапах: на лекции, лабораторных и практических занятиях, во время самоподготовки, а также для контроля и самоконтроля степени усвоения учебного материала учащимися.

Средства мультимедиа чаще всего реализуются техническими средствами обучения (ТСО), а именно использованием компьютера.

Компьютер как основной инструмент работы с мультимедиа позволяет:

разрабатывать и применять мультимедийные сценарии уроков;
применять готовые мультимедийные курсы, обучающие программы и электронные учебники;
осуществлять проверку знаний на уроке;
организовывать внеурочную деятельность.

Разработка и применение мультимедийных сценариев урока.

Такой сценарий урока содержит краткий текст, основные формулы, рисунки, чертежи, анимацию и видеофрагменты. Использование мультимедийных сценариев значительно сокращает количество времени на объяснение материала, не влияя на качество содержания. Оставшееся время можно потратить на дополнительную информацию по теме или углубление полученных знаний.

Зачастую мультимедийный сценарий реализуется с помощью программ для подготовки презентации. В итоге получается продукт, увеличивающий «плотность» урока (заранее подготовленная информация появляется в нужный момент), включающий в себя различные виды наглядности (изображения, схемы, таблицы и др.) и интерактивные элементы (тесты, упражнения, тренажеры и др.) [2].

На уроках физики, благодаря средствам мультимедиа демонстрация учебного фильма старого образца гораздо эффективнее, если его перевести в цифровой формат средствами мультимедиа. В таком случае появится возможность акцентировать внимание на отдельных фрагментах и кадрах, содержащих ключевые особенности (характеристики) изучаемых объектов, процессов или явлений. Вариант увеличения, выделения и динамической работы с определенными кадрами учебного фильма возможен, если кабинет оборудован интерактивной доской [3].

Применение готовых мультимедийных курсов, обучающих программ и электронных учебников.

Обучающие программы обеспечивают доступ к компьютерным моделям большого числа опытов и экспериментов по физике. Ученикам предоставляется возможность наблюдать процесс диффузии или движение броуновской частицы и еще многое другое. В случае неудачи в эксперименте, можно начать все сначала, сохранив необходимые условия для проведения опыта.

В интернете в открытом доступе находится большое количество качественных мультимедийных курсов, которые представляют собой комплексы все возможных ресурсов по конкретному разделу, которые объединены в единый образовательный сценарий системой связей и переходов между собой. Использование мультимедийных курсов имеет ряд преимуществ:

- организация самостоятельной работы учащегося;
- возможность развития навыка обмена опытом;
- становление критического мышления;
- приобретение творческих навыков;
- расширение познавательных возможностей.

Электронный учебник – компьютерное, педагогическое программное средство, предназначенное в первую очередь для предъявления новой информации, с целью дополнения печатных изданий, служащее для индивидуального обучения, с возможностью в меньшей степени тестировать полученные обучающимися знания и умения.

Осуществление проверки знаний на уроке.

Помимо традиционных контрольно-измерительных материалов можно использовать компьютерное тестирование, которое в большей степени способствует индивидуализированию заданий (разный порядок заданий для каждого ученика), а также обеспечивает дифференцирование заданий путем разноуровневых вопросов. В том числе компьютерные тесты обеспечивают оценку проделанной работы самим учащимся (работа над ошибками), т.к. позволяют посмотреть допущенные ошибки.

Организация внеурочной деятельности.

С помощью средств ТСО (технические средства обучения) и средств мультимедиа, учащие могут принимать участие в проектной деятельности, всевозможных олимпиадах и конкурсах. Также ученики получают возможность для самостоятельной подготовки к урокам.

Применение технических средств обучения и средств мультимедиа как на уроках физики, так и во внеурочной деятельности развивает творческие возможности не только учеников, но и учителя; повышает интерес к предмету. Мультимедийные средства предоставляют возможность повысить уровень демонстрационных и лабораторных работ; повышают интерес у обучающихся и обеспечивают условия для творческого подхода к обучению. Мультимедиа обеспечивает как индивидуальную форму работы, так и групповую; работу в классе и вне класса. Организует самостоятельный поиск и сбор информации, обеспечивает ресурсами для создания современных средств обучения.

Например, в процессе обучения физике индивидуальную работу можно организовать с помощью метода проектов. Создание проекта подразумевает тесное взаимодействие с различными технологиями мультимедиа (поиск информации, создание итогового продукта средствами мультимедиа, презентации для защиты проекта).

Так же можно использовать онлайн платформы для создания интеллект-карт. Интеллект-карта – технология анализа и структурирования информации. Работа с данной технологией позволит улучшить качество обучения, т.к. информация будет представлена в наглядно и легком для восприятия виде.

Но не стоит забывать, что современные средства обучения должны использоваться с традиционными, дополняя друг друга. Такой подход обеспечит дидактически целесообразный процесс обучения и поспособствует формированию у учащихся целостного представления об окружающем мире.

1. Абдурахимов, Т.Д., Ахтареев, К.О., Яппарова, Э.Н. Инновационное обучение в условиях реализации ФГОС / Т.Д. Абдурахимов, К.О. Ахтареев, Э.Н. Яппарова // Проблемы современного педагогического образования. – 2017. – № 57-8. – С. 9-15.

2. Ерофеева, Л.В. Мультимедийные презентации как метод обучения: В сборнике: World science: problems and innovations /сборник статей IV Международной научно-практической конференции. – МЦНС «Наука и Просвещение». – 2016. – С. 197-199.

3. Кудряшов, В.И. Использование видео задач при изучении физики в школе / В.И. Кудряшов // Учебный эксперимент в образовании. – 2012. – № 4. – С. 39-41.

УДК 378.016

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТАПРЕДМЕТНЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

Н.А. Дейнекина, О.В. Кравченко

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения (г. Хабаровск)
ndeyka@mail.ru*

В настоящей статье поднимается вопрос о реализации метапредметных связей дисциплины «Теоретическая механика» в процессе её освоения студентами вузов. В работе находят своё отражение способы и пути осуществления принципов междисциплинарной преемственности на практических занятиях по рассматриваемому предмету.

REALIZATION OF META-SUBJECT RELATIONS IN THE STUDY OF THEORETICAL MECHANICS

N.A. Deinekina, O.V. Kravchenko

Far Eastern State University of Railway Transport (Khabarovsk)

ndeyka@mail.ru

This article raises the question of the implementation of meta-subject relations of the discipline "Theoretical Mechanics" in the process of its development by university students. The work reflects the ways and means of implementing the principles of interdisciplinary continuity in practical classes on the subject under consideration.

DOI:10.22250/9785934934195_178

В современных реалиях наиболее актуализированы принципы междисциплинарности, что находят своё отражение в характере научно-исследовательской и преподавательской деятельности. Специалистами признаётся, что учёт межпредметной преемственности при составлении содержания обучения обладает рядом преимуществ, главное из которых заключается в том, что студенты получают возможность осознать существование единой научной картины мира. В свою очередь данное осознание способствует тому, что обучающиеся подходят к образованию как к целостному и системному процессу, где каждая добытая в ходе изучения одной конкретной дисциплины информация может быть применена в иной смежной предметной области (межпредметность обучения), а преподаватели получают возможность эффективно использовать на занятиях накопленный учебный опыт студентов (метапредметное обучение) [1], демонстрировать связь эмпирического и практического знания, что особенно актуально для теоретико-направленных дисциплин.

Следовательно, термин «метапредметность» в некоторой степени соотносим с термином «межпредметность», однако, по точному замечанию А. В. Хуторского, первые из указанных – это «корни» («вертикальные линии» в объёмной модели образования); вторые же – горизонтальные («связи между ветвями-предметами») [2].

В отношении теоретической механики следует обозначить, что данный предмет действительно может выступать своеобразной исходной точкой, «корнем» для реализации вертикальной связи между последующими изучаемыми студентами дисциплинами, поскольку в рамках данного курса обучающиеся усваивают фундаментальные физические законы «механического движения и взаимодействия материальных точек и тел» [3]. Данные знания неизбежно будут востребованы при освоении учебных программ дисциплин «Соппротивление материалов», «Теория машин и механизмов», «Основы проектирования» и т. д.

Кроме того, в процессе изучения теоретической механики студенты овладевают перечнем навыков, которые входят в систему метапредметных результатов обучения. К ним относятся такие навыки, как:

анализ проблем, соотносимых с профессиональной областью обучающихся;
применение на практике теоретических основ, заложенных в содержании дисциплины;
самостоятельное решение учебных задач на основе использования современных образовательных технологий [4].

Следовательно, содержание дисциплины должно быть соотносимо как с содержанием предметов-предшественников (математика, физика, начертательная геометрия и т. д.), так и с теми, что будут изучаться студентами в дальнейшем. Однако преемственность дисциплин не всегда подразумевает

схожесть их терминологического аппарата. В рамках изучения теоретической механики педагогу следует указывать на терминологическую схожесть некоторых понятий, однако акцентировать внимание студентов на нюансах их различия (например, «крутящий момент», «скручивающий момент» и «вращающий момент») в целях избежания трудностей с употреблением терминов при изучении последующих дисциплин.

Симптоматично, что в данном случае необходима переориентация обучения на более профессионально-направленную цель: в рамках курса следует использовать не абстрактные задачи, а те, что демонстрируют реально существующие механизмы и аппараты (в идеале те, которые находятся в материально-технической базе университета и вероятнее всего будут применяться для работы с обучающимися в период производственных практик). Такой подход позволит реализовать первый и второй из обозначенных выше метапредметных навыков, укрепить представление студентов о системности вузовского образования и акцентировании любого учебного предмета на будущую профессиональную область обучающихся.

Навыки самостоятельного решения учебных задач в практике изучения теоретической механики развиваются посредством избираемых преподавателем технологий обучения. Увеличение доли самостоятельной работы в целом нацелено на формирование метапредметных результатов обучения, поскольку данный навык востребован при освоении любого вузовского предмета. Актуализация навыков самостоятельной деятельности происходит благодаря внедрению в образовательный процесс решения кейсов и проблемного обучения (особенно применительно в темах, содержательно соотносимых со школьным курсом физики и математики). Трудно оспорим тот факт, что интегрированное обучение становится той технологией, которая в большей мере ориентирована на экспликацию межпредметности и метапредметности, однако следует отметить, что данная практика в условиях вузовской системы не получает широкого применения в силу различных организационных сложностей, поэтому технологии, применяемые педагогом в рамках аудиторной деятельности по дисциплине, выступают практически единственным средством реализации метапредметных связей теоретической механики с другими отраслями знания.

Таким образом, при грамотном подходе педагога к формированию технологической стороны учебного процесса, а также к расстановке соответствующих акцентов на неразрывности связи преподаваемого предмета с другими вузовскими дисциплинами представляется возможным реализовать метапредметную преемственность теоретической механики с другими областями инженерно-технического знания, а также сформировать у студентов метапредметные навыки.

1. Чикинева, А. С. Метапредметность и межпредметность в связях математики и физики // Инновации и рискологическая компетентность педагога: Сборник научных трудов Шестнадцатой Международной заочной научно-методической конференции. В 2-х частях, Саратов, 13 марта 2019 года. Часть 2. – Саратов: Издательство «Саратовский источник», 2020. – С. 271–275.

2. Хуторской А. В. Чем метапредметность отличается от межпредметности [Электронный ресурс] // А. В. Хуторской. Персональный сайт – Хроника бытия (02.12.2018 г.). – URL: <http://khutorskoy.ru/be/2018/1202> (дата обращения: 06.07.2023).

3. Имаева Э. Ш., Зубкова О. Е., Исмагилов М. Р. Преемственность в преподавании механики // Проблемы современного педагогического образования. – 2018. – № 59–3. – С. 328–332.

4. Парфенова И. А., Жаркова О. М., Лежнев В. В., Сковородов Г. М., Цой Г. Д. Методика преподавания основ теоретической механики // Современные проблемы науки и образования. – 2019. – № 2 [Электронный ресурс]. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=28629> (дата обращения: 07.07.2023).

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СТУДЕНТОВ КАК ФАКТОР СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНА (НА ПРИМЕРЕ ТИХООКЕАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА)

А.В. Казарбин¹, К.А. Драчёв¹, Ю.В. Лунина²

¹ Тихоокеанский государственный университет, (г. Хабаровск),

² Хабаровский государственный медицинский колледж, (г. Хабаровск)

000283@pnu.edu.ru; lunina2110@mail.ru

Авторы рассматривают научно-исследовательскую деятельность студентов инженерных направлений подготовки как фактор социально-экономического развития Хабаровского края. Определены приоритетные инженерные направления подготовки кадров в магистратуре и аспирантуре. Представлены результаты НИРС и ведущие инженерные проекты, направленные на решение современных проблем социально-экономического развития Хабаровского края.

RESEARCH ACTIVITIES OF STUDENTS AS A FACTOR IN SOCIO-ECONOMIC DEVELOPMENT OF THE REGION (USING THE EXAMPLE OF PACIFIC STATE UNIVERSITY)

A.V. Kazarbin¹, K.A. Drachev¹, Yu.V. Lunina²

¹ Pacific State University, (Khabarovsk)

² Khabarovsk State Medical College (Khabarovsk)

000283@pnu.edu.ru; lunina2110@mail.ru

In the article, the authors consider the research activities of engineering students as a factor of socio-economic development of Khabarovsk Krai. The priority areas of engineering education at the undergraduate and postgraduate levels are identified. The results of students' R&D and leading engineering projects aimed at solving modern problems of socio-economic development of Khabarovsk Krai are presented.

DOI:10.22250/9785934934195_181

Тихоокеанский государственный университет (далее – ТОГУ, университет) основан в 1958 г. для кадрового сопровождения промышленного развития Хабаровского края. Ежегодно университет выпускает около 2000 выпускников, успешно работающих во всех основных отраслях экономики и социальной сферы региона. В системе высшего образования края ТОГУ является многопрофильным университетом, в котором обучается 27,83 % общего контингента вузов в субъекте РФ. Портфель образовательных программ университета соответствует структуре экономики Хабаровского края: науки об обществе (44,3 %), инженерия и технические науки (40,4 %), гуманитарные (11 %), математические и естественные (2,2 %), сельскохозяйственные (2,1 %) науки. В настоящее время университет осуществляет подготовку по 130 направлениям обучения (в сетевой форме реализуется 44 образовательные программы) [1].

Тихоокеанский государственный университет представляет собой крупный научно-образовательный центр, в котором гармонично сочетаются естественнонаучные, гуманитарные и инженерно-технические направления.

В настоящее время наблюдается увеличение и актуализация портфеля основных программ (за последние два года – 13 новых программ бакалавриата и 10 программ магистратуры).

Рост количества программ магистратуры обусловливается ростом востребованности специалистов с углубленными знаниями в определенной области (удельный вес поступающих на программы магистратуры вырос в 1,5 раза, доля магистрантов в общем контингенте составляет стабильно 12 %), а также получением навыков научно-исследовательской деятельности и дальнейшего обучения в аспирантуре [1].

Авторы считают, что научно-исследовательская работа является незаменимым инструментом формирования критического и независимого мышления молодого специалиста, развития его интеллекта, высоких личностных и морально-этических качеств. Систематически участвуя в реальной научной работе в команде, возглавляемой опытным педагогом-исследователем, студент получает собственный уникальный опыт участия в научно-исследовательской работе, возможность формирования профессиональных компетенций и пополнения портфолио. Сказанное в полной мере справедливо в отношении подготовки инженеров, востребованных высокотехнологичным обществом будущего. Ряд документов, определяющих современную парадигму российского образования на федеральном и региональном уровне, обуславливают формирование и развитие научно-исследовательских компетенций студентов. Важным элементом основной образовательной программы подготовки инженера является научно-исследовательская практика, цель которой – проработка теоретических вопросов, участие в научных исследованиях, школах, семинарах, конференциях и т. д. [2].

Для развития научно-исследовательской деятельности студентов в ТОГУ созданы научные подразделения.

Деятельность научных структурных подразделений – планирование и организация выполнения научных исследований, развитие научно-исследовательской базы, учет результатов научных исследований, а также популяризация науки.

Сегодня в ТОГУ выделены следующие ключевые приоритетные инженерные направления подготовки кадров в магистратуре и аспирантуре: системная инженерия и цифровой инжиниринг, рациональное ресурсо- и природопользование, а также сквозные направления развития в области ИТ и цифровых компетенций.

Университет имеет достаточно сильное исследовательское ядро в таких естественнонаучных областях как экология и науки о Земле; ядерная физика; социальные науки; инжиниринг; математика; прикладные направления с высоким потенциалом коммерциализации в горном производстве, транспортировке и переработке леса; материаловедении; автоматизации производства.

Основная цель организации научно-исследовательской работы студентов в ТОГУ – создание условий для привлечения учащихся к научно-исследовательской и научно-практической деятельности. Научно-исследовательская деятельность основной вид самостоятельной работы студента в каждом семестре, она формирует прежде всего его профессиональные компетенции.

В настоящее время подход кафедр к привлечению студентов к НИРС является технологичным, т.е. совместной педагогической деятельностью по проектированию, организации и проведению учебного процесса с безусловным обеспечением комфортных условий для студентов и педагогов. Выбор темы НИРС осуществляется из предлагаемого кафедрами и руководителем направления исследований. Помочь студенту в выборе направления НИРС могут представленные на сайте вуза (факультета) информационные материалы – списки публикаций преподавателей кафедр, описание направлений исследований, свидетельства успешности и др. В табл. представлена информация о результатах НИРС студентов.

Результативность научно-исследовательской деятельности студентов (основные показатели)

Показатель	2022	2021	2020	2019	2018	2017
Количество привлеченных студентов	2365	2413	2214	2506	2333	2092
% от контингента студентов очной формы обучения	33 (7101)	35 (6963)	32 (7003)	34 (7438)	31 (7549)	28 (7581)
Количество научных студенческих публикаций	1161	1439	1287	1279	1318	1134
Общее количество докладов, сделанных студентами на научных (научно-технических) конференциях, семинарах и т.п.	894	1315	1223	1877	1127	932
Количество медалей, дипломов, грамот, премий, полученных студентами на студенческих конкурсах, олимпиадах и т.п.	540	1085	851	1232	1121	1091
Поданные студенческие работы, награды, полученные на конкурсах на лучшую студенческую НИР/ВКР	587	490	341	309	329	91

В 2019-2020 гг. отмечено снижение активности и эффективности научно-исследовательской деятельности студентов университета. Это связано с распространением COVID 19 (более подробно авторы рассматривали ситуацию в своей статье «Развитие инженерного мышления средствами научно-исследовательской деятельности студентов» «Педагогический журнал». – Т. 11, № 3А – 2021). В настоящее время происходит значительная перестройка форматов и направлений работы с талантливой молодежью, потребовавшая консолидации усилий коллектива преподавателей для развития новых форм взаимодействия в научно-исследовательской работе студентов. Эти формы включают привлечение сторонних экспертов, развитие связей с ведущими вузами России и зарубежными странами, взаимодействие с администрацией Хабаровского края и г. Хабаровска и др.

В 2022 г. в университете сформирована система непрерывной внутренней поддержки НИР, реализация которой ориентирована на развитие стратегических проектов программы «Приоритет-2030» и на достижение целей, заявленных в политиках программы (прежде всего в научной и образовательной), а также на развитие новых научных направлений в университете.

1. Разработана и апробирована программа повышения квалификации «Школа молодого ученого» в объеме 16 часов, обучено 80 человек (бакалавриат, магистратура, аспирантура). Данная программа направлена на индивидуализацию деятельности студентов в рамках НИР.

2. Внедрена концепция цифровой платформы координации и сопровождения подготовки проектов, сформирован единый университетский банк проектных инициатив, в финальной стадии разработки находится единый портал управления инновационной деятельностью студентов ТОГУ Инновации27.рф.

3. Разработан проект реализации Межрегионального центра студенческих инноваций, включающий создание студенческих конструкторских бюро по инженерным направлениям, наиболее востребованным у внешних заказчиков и направленным на решение актуальных вопросов социально-экономического развития Хабаровского края, например:

деятельность студенческого конструкторского бюро (СКБ) «Строитель», включая реализацию проектов по тематике «Строительство, дорожное строительство» (ВМ/ТИМ-технологии в строительстве в сотрудничестве с ООО «ДВПИ»);

деятельность СКБ «Синергия» реализацией проектов по тематикам «Программирование», «Моделирование», «Конструирование» (интерактивная карта с AR, симулятор для обучения операторов АРМ);

деятельность СКБ «Транспорт» включающая реализацию проектов по тематике «Беспилотные транспортные устройства» («Беспилотный трактор» и др.);

деятельность СКБ «Робототехника» в том числе реализация проектов по реверс-инжинирингу, робототехнике (робот- экскурсовод для музея);

деятельность СКБ «Когнитивные технологии» с реализацией проектов по «социально-гуманитарному блоку» (анимация в сотрудничестве с компанией «Мечталёт»);

совместно с отраслевыми партнерами из лесопромышленного комплекса Хабаровского края (холдинг «RFP Group», ООО «Таунга-Лес»), а также с участником консорциума ФБУ «ДальНИИЛХ» реализация двух совместных научно-технологических проектов: студенческого технопарка «ХимЛесМаш» (ключевые направления технопарка – стабилизированная древесина, инженерная древесина и древесно-полимерные композиты) и лаборатории «Агроинженерия и биотехнология растений» (разработка технологий по производству биоудобрений из древесных отходов лесопромышленного комплекса, которых на территории Хабаровского края в год образуется до 1,5 млн тонн);

совместно с ФБУ «ДальНИИЛХ» и филиалом ФБУ Рослесозащита – Центр защиты леса Хабаровского края с сентября 2022 г. прикладные исследования по распространению лесных пожаров в природных зонах Хабаровского края с целью создать цифровые карты территориальных зон пожарной опасности, основывающиеся на динамике изменений таксационных показателей лесных насаждений и климатических изменениях Дальневосточного региона [1].

Все перечисленные проекты показывают высокий интерес студентов не только к научно-исследовательской деятельности, но и к определенным карьерным траекториям, определяя сформированность профессиональных, надпрофессиональных и управленческих компетенций.

Авторы считают, что систематическое участие в НИРС постепенно и уверенно формирует высокие профессиональные и личностные качества студентов, эффективно развивает их интеллектуальные и когнитивные способности, формируют прочные навыки в поиске, анализе и переработке информации, развивает языковые и коммуникативные навыки. НИРС способствует становлению современного, востребованного специалиста на рынке труда. Используя НИР в образовательном процессе, вузы смогут обеспечить подготовку инженерных кадров, обладающих знаниями, навыками, личностными качествами и компетенциями, отвечающими требованиям экономики XXI века, целям и задачам социально-экономического развития и структуры рынка труда страны.

1. Отчет о результатах реализации программы развития университета в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» за 2022 г.

2. Казарбин А.В., Лунина Ю.В. Развитие инженерного мышления средствами научно-исследовательской деятельности студентов // Педагогический журнал». – 2021. –Т. 11, № 3А.

3. Программа развития университета на 2021–2030 г.г. в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

УЧЕБНЫЕ ЗАДАЧИ В ШКОЛЬНОМ КУРСЕ ФИЗИКИ И ИХ РЕШЕНИЕ ЧЕРЕЗ АЛГОРИТМЫ: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАПРЕДМЕТНЫХ СВЯЗЕЙ ИНФОРМАТИКИ И ФИЗИКИ

М.Р. Касаткина, Л.В. Горбанёва, Е.А. Редько

Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

В наше время, когда развитие информационных технологий находится на пике, важно не только овладеть базовыми знаниями в области программирования, но и уметь применять их в различных сферах жизни. Одной из таких сфер является физика. В школьном курсе физики большую роль играют учебные задачи, которые помогают учащимся понять и применить полученные знания на практике. Они требуют аналитического мышления, логики и умения применять различные методы решения. Однако все большее внимание в решении этих задач уделяется и информатике. В рамках данной статьи рассмотрим исследование метапредметных связей информатики и физики – использование алгоритмов для решения учебных задач по физике. Как оказывается, это позволяет не только эффективнее решать задачи, но и развивает логическое, абстрактное мышление, способность анализировать и моделировать сложные системы.

EDUCATIONAL TASKS IN THE SCHOOL PHYSICS COURSE AND THEIR SOLUTION THROUGH ALGORITHMS: RESEARCH OF META-SUBJECT RELATIONS OF COMPUTER SCIENCE AND PHYSICS

M.R. Kasatkina, L.V. Gorbaneva, E.A. Redko,

Pacific State University (Khabarovsk)

Nowadays, when the development of information technologies is at its peak, it is important not only to master basic knowledge in the field of programming, but also to be able to apply them in various spheres of life. One of these fields is physics. In the school physics course, an important role is played by educational tasks that help students understand and apply their knowledge in practice. They require analytical thinking, logic and the ability to apply various methods of solution. However, more and more attention is being paid to the use of computer science in solving these problems. In this article, we will consider the study of meta-subject relations of computer science and physics, namely the use of algorithms to solve educational problems in physics. As it turns out, the use of algorithms and programming allows not only to solve problems more efficiently, but also develops logical thinking, abstract thinking, the ability to analyze and model complex systems.

DOI:10.22250/9785934934195_185

Метапредметные связи являются дидактическим условием и средством глубокого и всестороннего усвоения основ наук в образовательном учреждении. Установление таких связей способствует более глубокому усвоению знаний, формированию научных понятий и законов, совершенствованию учебно-воспитательного процесса. Реализация метапредметных связей создает благоприятные условия для формирования общеучебных умений и навыков учащихся, повышает эффективность политехнической и практической направленности обучения. К числу метапредметных умений для школьника относятся умения распознавать и конструировать алгоритмы в жизни и учебной деятельности, записывать их различными способами, так же это реализуется в метапредметных связях с физикой, химией, биологией [1].

Связь между физикой и информатикой – двухсторонняя. С одной стороны, используя информационные технологии для построения графиков, создания электронных таблиц, программ визуализации и др., можно решать физические задачи и моделировать физические процессы. С другой стороны, – развитие электронной вычислительной техники невозможно без знания физических законов и процессов.

Рассматривая тему «Алгоритмизация» в информатике, мы доносим до учеников идею, что большую часть процессов в этой жизни можно соотнести с алгоритмом. Алгоритмы – важная часть информатики и могут быть применены во многих сферах жизни, начиная от рецепта блюда и заканчивая планированием пути до работы.

Физика – один из фундаментальных предметов в школьной программе, предлагающий ученикам развивать научно-физическую картину мира и навыки решения задач. Алгоритмы предоставляют инструменты для эффективного анализа и моделирования физических систем, а также позволяют извлекать полезную информацию из экспериментальных данных. Сложность решения физических задач заключается в широком применении вычислительных методов. Школьников необходимо научить правильному подходу – поиску алгоритма вычислений. Такой подход носит название «вычислительное мышление».

Рассмотрим методические приемы обучения решению физических задач с использованием алгоритмов.

1. Применение пошаговых алгоритмов (декомпозиция). Одним из методов, который может помочь ученикам разобраться в сложных задачах, является разбиение задачи на подзадачи, т. е. на последовательность шагов. Разложение подобных задач на простые шаги позволяет ученикам поэтапно решать проблему и облегчает понимание процесса решения. Например, при решении задачи о движении тела можно выделить шаги: определение начальных условий, применение законов движения, вычисление требуемых величин и т.д.

2. Использование графических методов. Графические методы – отличный способ визуализации задач по физике. Ученикам полезно использовать графические инструменты (графики, диаграммы или рисунки к задаче), чтобы лучше представить физическую ситуацию. Например, построение графика зависимостей между величинами помогает понять закономерности и влияние различных факторов на решение задачи. Таким образом, одним из этапов алгоритма решения физической задачи может быть этап построения рисунка или графика. Построение рисунка к задаче или графика – это самостоятельный шаг алгоритма решения рассматриваемой задачи.

3. Алгоритмизация и моделирование. В современной школе использование виртуальных моделей при проведении лабораторных работ позволяет более точно исследовать задачу, проводить численные эксперименты и анализировать результаты. Виртуальные лабораторные эксперименты дают возможность визуализации реальных физических процессов, которые затруднительно воспроизвести в школьных условиях. Например, задачи по движению тела в воздухе могут быть решены с помощью создания компьютерной модели, которая учтет различные факторы: сопротивление воздуха или гравитацию. Ученики могут использовать навык построения алгоритма при выполнении лабораторной работы по моделированию физического процесса.

4. Методы научного познания – индукция. Метод индукции предполагает основываться на наблюдениях, чтобы сделать общий вывод. В физике это означает анализировать экспериментальные данные, с помощью алгоритмов выявлять закономерности и формулировать общие законы. Первый шаг в использовании метода индукции в решении задач по физике – сбор данных и наблюдений. Вторым шагом – поиск связей между различными переменными и исследовать, как эти связи соответствуют физическим законам. При этом необходимо использовать логику и рассуждение для формулирования гипотезы или вывода, затем следует проверка результата [2].

При решении физических задач различного уровня сложности учащиеся сталкиваются с большими трудностями в создании моделей физического процесса, представленного в условии задачи. Поэтапное рассмотрение физической ситуации и обнаружение причинно-следственной связи сопровождается аналитическими выражениями, которые и должны лечь в основу составления алгоритма. Составление алгоритма значительно упрощает понимание физической ситуации, делает ее более доступной и решаемой [3].

Анализ физической задачи

Тема	Задача	Ошибки при решении	Вариант алгоритма для решения задачи
Равномерное и неравномерное движение. Расчет пути и времени движения. Траектория. Прямолинейное движение	Задача 1. Какой путь пройдет автомобиль, двигаясь равномерно со скоростью 75 км/ч, за 20 минут? Задача 2. Мотоциклист проехал 5 км вдвое быстрее, чем следующие 7 км. Найдите его среднюю скорость, если общее время в пути составило 10 минут.	Путают понятие траектории с физической величиной «пройденный путь». Трудно дается анализ графиков зависимости пройденного пути от времени, не обращают внимания на единицы измерения физических величин и не переводят их в систему СИ. С трудом дается алгоритм решения задачи. Математические ошибки, неправильно выводят формулы или вообще не знают их. Не видят скрытых условий при решении задачи. Неграмотно использует дольные и кратные приставки при записи чисел.	1. Проанализировать условие задачи: определить движение тела и характер этого движения. 2. Записать краткое условие задачи в единицах СИ. 3. Сделать чертеж. Записать кинематические законы движения для тела в векторной форме. 4. Спроецировать векторные величины на оси x и y. 5. Вывести формулу для расчета искомой величины. 6. Вычислить значение искомой величины. 7. Проконтролировать размерность и ответ.

Важность использования алгоритма при решении физических задач особенно ярко прослеживается при решении и оформлении учащимися задач второй части контрольно-измерительных материалов (КИМ) единого государственного экзамена (ЕГЭ) по физике. Рассмотрим возможное эталонное решение и критерии оценивания выполнения заданий с развернутым ответом в ЕГЭ по физике на примере 25-й задачи (рис. 1, 2) [4].

Плоская льдина плавает в воде, выступая над её поверхностью на $h = 0,04$ м.
 Определите массу льдины, если площадь её поверхности $S = 2500$ см².
 Плотность льда равна 900 кг/м³.

Рис. 1. Пример условия 25-й задачи в ЕГЭ по физике.

Данная задача в ЕГЭ оценивается в 2 балла. Рассмотрев критерии, по которым оценивается задача, мы сделали вывод [4]. Исходя из анализа критериев, можно сделать вывод, что присутствует крайняя необходимость следования алгоритму при решении задач по физике. Заключается это не только в том, чтобы решить задачу правильно, ведь на ЕГЭ проверяется в том числе и правила оформления задачи по образцу (алгоритму), не допускаются лишние записи, ненужные при решении конкретной задачи (за это также снижаются баллы).

Так как льдина плавает,

$$F_A = mg,$$

$$\rho_w g(H-h)S = \rho_l gHS,$$

где ρ_w – плотность воды,

ρ_l – плотность льда,

H – толщина льдины,

$$\text{откуда } H = \frac{\rho_w h}{\rho_w - \rho_l};$$

$$m = \rho_l SH = \frac{\rho_w \rho_l Sh}{\rho_w - \rho_l} = \frac{1000 \cdot 900 \cdot 2500 \cdot 10^{-4} \cdot 0,04}{1000 - 900} = 90 \text{ кг.}$$

Ответ: $m = 90$ кг

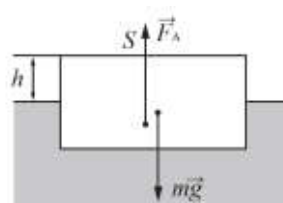


Рис. 2. Вариант решения 25-й задачи из демо-версии 2022 г.

Применение алгоритмов в физике имеет большое значение при решении задач в школьной программе. Алгоритмы позволяют школьникам систематизировать свои знания и разработать эффективные методы решения задач. В курсе физики необходимо учить школьников следовать алгоритму при решении задач, чтобы это было на автоматическом уровне.

1. Лапчик М. П. и др. Методика преподавания информатики. Учеб. пособие для студ. пед. вузов / М. П. Лапчик, И. Г. Семакин, Е. К. Хеннер, под общей ред. М. П. Лапчика. – М.: Изд. центр «Академия», 2001. – 624 с.
2. Методика решения учебных задач средствами программирования: методическое пособие / Р. Р. Сулейманов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 188 с.: ил. (ИКТ в работе учителя).
3. Теория и методика обучения физике в школе. Общие вопросы. Учеб. пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений / ред. С.Е. Каменецкого, Н.С. Пурышевой. – М.: Изд. центр «Академия», 2000. – 368 с.
4. Федеральный институт педагогических измерений / Демоверсии, спецификации, кодификаторы. – URL: <https://fipi.ru/ege/demoversii-specifikacii-kodifikatory> (дата обращения: 20.06.2023).

УДК 53.087

ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ

И.Б. Копылова

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

kopylovaib@mail.ru

За последнее десятилетие в организации и осуществлении учебного процесса накопилась масса проблем. Эти проблемы связаны с тем, что основное внимание было сосредоточено на бюрократизации учебного процесса. Обновлению учебной базы практически не уделялось никакого внимания, так это требовало больших материальных затрат. Кроме того, сейчас рынок труда требует совсем не тех выпускников, которых готовит высшая школа.

PROBLEMS OF HIGHER EDUCATION AND POSSIBLE OVERCOMING

I.B. Kopylova

Amur State University (Blagoveshchensk)

kopylovaib@mail.ru

Over the past decade, a lot of problems have accumulated in the organization and implementation of the educational process. These problems are related to the fact that the main attention was paid to the bureaucratization of the

educational process. Practically no attention was paid to updating the training base, as it required large material costs. In addition, the labor market requires very different graduates who are trained by a higher school.

DOI:10.22250/9785934934195_188

О проблемах высшей школы написано немало статей, но в каждой затрагиваются различные аспекты одних и тех же вопросов [1].

1. Направленность обучения в основном теоретическая. Часто теория далеко отстоит от практики и не учитывает тенденций современного развития.
2. Подготовка специалистов ведется по направлениям, не востребованным на рынке труда.
3. Отмечается тенденция снижения финансирования высшего образования, доли ВВП, вложенной в высшее образование.
4. Качество обучения остается низким.
5. Кризис системы образования в целом. Потеря связи между школьной и вузовской подготовкой.

Что касается оторванности теории и практики, то эта проблема требует дополнительного исследования. Нельзя отрицать значения теоретической подготовки, особенно по базовым предметам. Однако основы теории по многим современным направлениям подготовки специалистов быстро устаревают. Преподавание старых теорий значительно снижает качество подготовки выпускников. Кроме того, сами студенты зачастую теряют интерес к обучению. Этому сильно способствует и отсутствие практики, непосредственно связанной с будущей профессией.

Возникает еще одна проблема – это кадры для высшей школы. Специалисты высокой категории, как правило, не имеют возможности повышать квалификацию на основе работы передовых вузов страны, такая практика существовала в советской системе. Это давало возможность преподавателям постоянно совершенствовать свою подготовку и перестраивать свои дисциплины под потребности современных отраслей народного хозяйства. Такие курсы обеспечивали не только теоретическую, но и практическую подготовку под руководством специалистов. Примером могут служить курсы повышения квалификации на базе крупнейших вузов страны в 80-е годы, когда преподаватели изучали работу персональных компьютеров и основы программирования. Если учесть, что в тот период ПК были редкостью, то становится понятным, насколько такая подготовка способствовала развитию компьютерной грамотности. Электронные курсы повышения квалификации не формируют навыков практического применения знаний.

Для решения проблемы невостребованности выпускников нужно, прежде всего, установить связь между «потребителями» выпускников тех или иных направлений подготовки [2].

Многие направления подготовки были востребованы в различных регионах страны в связи с размещением на их территории промышленных предприятий, которые в настоящее время либо закрыты, либо реорганизованы. Однако многие региональные вузы продолжают выпуск фактически по тем же направлениям, изменив название, но оставив ту же теоретическую и практическую базу.

Очень часто выпускники сталкиваются с проблемой расхождения теории и практики при поступлении на работу и вынуждены получать дополнительные знания на семинарах, курсах повышения квалификации. Как правило, осуществляется это платно за счет работника и очень редко – за счет предприятия.

Привлечение к преподаванию практических дисциплин специалистов, имеющих опыт работы непосредственно на предприятии, обязательно в процессе подготовки студентов. Такие специалисты могут не только объяснить основы выбранной профессии, но и пригласить студентов на практику и в дальнейшем обеспечить место работы. Конечно, при этом студент должен показать высокий уровень подготовки, заинтересованность в получении практических знаний.

Другая проблема – это прохождение студентами различных видов практик, которые включены в учебный план. Порой студенты вынуждены сами искать места практики, нередко расположенных достаточно далеко от вуза.

Мониторинг потребностей рынка труда в каждом регионе и в стране в целом может помочь решить проблему не только устройства выпускников, но и проблему практической направленности обучения, обеспечения местами практики. Другой путь – это организация новых производств, в том числе и на основе взаимодействия с экспериментальными лабораториями вузов.

Современные направления подготовки требуют хорошего компьютерного обеспечения, наличия прикладных лицензионных программ для моделирования различных технологических процессов, рабочих ситуаций, устранения неполадок в работе производственных мощностей и др. задачи. Особенно это касается развития современных IT-технологий. Современное оборудование требует больших финансовых вложений, что сделать достаточно сложно при тенденции снижения финансирования высшего образования.

Невозможно научить студентов без современной лабораторной базы. В результате, например, студенты энергетических специальностей не могут собрать элементарную электрическую схему и пользоваться электроизмерительными приборами. Качественное преподавание фундаментальных дисциплин невозможно без наличия лекционных демонстраций, позволяющих лучше понимать суть явлений. Особенно это касается инженерных направлений подготовки.

Немногие вузы имеют достаточно современную учебную базу, в основном это, находящиеся в европейской части России. Поэтому создание пилотных проектов, работа по заказу предприятий, которые могут финансировать такие проекты, возможны только в хорошо оснащенных вузах и при наличии крупных предприятий. Получение же государственных заказов в настоящее время возможно только в области военных, IT-технологий, космических исследований и т.д. Еще один путь – это целевые наборы, конкретно под развитие новых предприятий и производств в регионе, которые могут финансироваться соответствующими министерствами. Осуществление подготовки таких специалистов целиком зависит от мобильности вузов.

Организация стартапов по направлениям развития бизнеса в регионе решает сразу несколько задач: взаимодействие с работодателем, возможность дальнейшего сотрудничества (устройство на работу выпускников), перестройка подготовки выпускников для развития конкретного бизнеса или производства. Создание технопарка при вузе решает фактически те же задачи, но понятие «технопарк» включает еще и организацию собственного производства. Это требует значительных финансовых вложений и поддержки государства, которая открывает возможность участия в разработке новых программ, технологий, выполнении государственных заказов. Кроме того, приводит к развитию научной деятельности вуза. Все это создает еще и необходимость целевого набора студентов для персонала новых производств и бизнеса. В последнее время целевые наборы либо совсем отсутствуют, либо такие студенты не работают на предприятиях, направивших их на обучение.

Вопрос качества подготовки студентов является наиболее острым. На снижение качества подготовки влияют проблемы, изложенные выше. Главная же проблема – качество подготовки выпускников школ, которые, несмотря на высокие баллы ЕГЭ, не могут мыслить логически, не способны применять знания на практике. Чаще всего после сдачи выпускного экзамена все, что изучалось, благополучно забывается. При изучении в вузе дисциплин с таким же названием, как и школьные предметы – физика, химия, математика, биология, история и т.д. – бывшие абитуриенты не могут вспомнить основные понятия и законы. Это следствие потери связи между различными этапами образования: нет преемственности, согласованности учебных программ, разнообразные школьные программы, учебников для их реализации настолько много, что порой переход из одной школы в другую становится невозможным.

В высшей школе преподавателям приходится вместо совершенствования дисциплин повторять уже «изученное» в школе, не уделяя должного внимания вузовской программе. Отсюда и излишняя теоретизация преподавания в ущерб практической направленности. Все эти замечания касаются в основном среднестатистического студента, обучающегося в региональном вузе.

Повышение качества подготовки специалистов и качества образования в целом не может происходить без внедрения и использования инновационных технологий управления процессом образования, детализации программ обучения, внедрения модульной системы. Накопившиеся проблемы высшей школы показывают, что состояние системы образования практически критическое, так как не устраивает все стороны образовательного процесса – студентов, преподавателей, работодателей. Начинать нужно с изменения отношения общества к образованию. Образование не должно быть товаром, представленным на рынке, оно должно стать неотъемлемой частью жизненной позиции человека, потребностью совершенствовать свои знания и умения, учиться новому в выбранной профессии. Возможность самореализации и свобода выбора сферы деятельности являются неотъемлемой частью гармонического развития личности [3]. Изменится отношение к процессу обучения – повысится успеваемость студентов.

Еще одна проблема высшего образования – это коммерциализация, снижение доступности образования, сокращение бюджетных мест, сокращение числа вузов [4]. Появление коммерческих вузов, с одной стороны, расширило возможности получить высшее образование, но, с другой, – привело к перенасыщенности рынка труда так называемыми престижными профессиями. Востребованность таких специалистов значительно снизилась, а их количество продолжает увеличиваться. Потребность в коммерческих вузах значительно снизилась, да и качество подготовки было низким, что привело к закрытию таких вузов, а вместе с ними и государственных вузов, которые готовили таких специалистов. В результате – произошла утрата государственной собственности, значительно сократилось и число профессорско-преподавательского состава [5].

Кардинальный способ решения проблем высшего образования в России – это полное реформирование. Предстоит изменить закон об образовании, создать новую концепцию образования в России, начиная со школы и заканчивая академиями. Предстоит переработка целевых программ, выработка новых требований, огромная работа по корректировке учебных планов. Все это требует огромных усилий как со стороны власти, так и со стороны вузов: увеличение финансирования, пересмотра подхода к набору в вузы, корректировка направлений подготовки в связи с реалиями времени. Необходимо учитывать опыт предыдущей системы, положительные моменты почти двадцатилетнего участия в Болонском процессе.

1. Тодис Л.М., Виноградова Т.В., Андроничева А.С. Современные проблемы высшего образования в России и возможные пути решения. //Современное педагогическое образование.– 2023.– №3.– С. 78-81. <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-problemy-vysshego-obrazovaniya-v-rossii-i-vozmozhnye-puti-ih-resheniya/viewer>

2. Бровкин А.В. Проблемы современной российской системы высшего образования и пути их решения в интересах всех участников образовательного процесса: часть 1 // Современное образование.– 2018.– № 1.– С. 1 - 10. DOI: 10.25136/2409-8736.2018.1.25053 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=25053

3. Гуреев М.В. «Скользкие» грани современной системы образования в России. Проблемы высшей школы // Психология, социология и педагогика.– 2012.– № 5 URL:<https://psychology.snauka.ru/2012/05/571>

4. Климова Е.К., Чернышева Т.Е. Анализ актуальных проблем высшего образования в России и возможные пути решения // Международный журнал экспериментального образования. – 2017. – № 5. – С. 71-74; <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=11669> (дата обращения: 24.06.2023).

5. Боброва Т. А. Современная система высшего образования Российской Федерации: основные проблемы и пути их решения // Молодой ученый. — 2018. — № 45 (231). — С. 127-130. — URL: <https://moluch.ru/archive/231/53422/>

ВЫХОД ИЗ БОЛОНСКОЙ СИСТЕМЫ: ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

И.Б. Копылова

*Амурский государственный университет (г. Благовещенск)
kopylovaib@mail.ru*

В настоящее время в Министерстве образования и науки, а также в Государственной Думе и Правительстве Российской Федерации активно обсуждается вопрос о выходе из Болонского процесса и реорганизации системы высшей школы. Некоторые аспекты дискуссии обсуждаются в этой статье.

EXIT FROM THE BOLOGNA SYSTEM RESULTS AND THE PROSPECTS

I.B. Kopylova

*Amur State University (Blagoveshchensk)
kopylovaib@mail.ru*

Currently, the Ministry of Education and Science, as well as the State Duma and the Government of the Russian Federation are actively discussing the issue of withdrawing from the Bologna process and reorganizing the higher school system. Some aspects of this discussion are discussed in this article.

DOI:10.22250/9785934934195_192

Предложения о выходе из Болонского процесса выдвигаются и обсуждаются давно. Анализируются итоги двухуровневого образования, качество подготовки бакалавров и магистров, востребованность выпускников на рынке труда. В апреле 2023 г. Россию просто исключили из Болонского процесса и поставили перед фактом, без каких-либо согласований. Таким образом, реорганизация системы высшего образования обусловлена не только недостатками Болонского процесса, который в нашей стране не дал положительных результатов, но и необходимостью строить российскую систему образования на основе потребностей в специалистах и традиций, которые вырабатывались на протяжении веков.

Заявление о выходе из Болонской системы образования прозвучало в интервью «Коммерсанту» главы Минобрнауки Валерия Фалькова 24 мая: «К Болонской системе надо относиться как к прожитому этапу. Будущее за нашей собственной уникальной системой образования, в основе которой должны лежать интересы национальной экономики и максимальное пространство возможностей для каждого студента», – сказал он. Еще в марте об этом не было и речи, хотя в июне 2022 г. такое предложение было вынесено на заседание Государственной Думы.

Идея интеграции образования в Европе прозвучала в 1999 г. и получила название Болонского процесса. В этом процессе участвовали сначала 23 страны. Россия присоединилась к Болонской системе в 2003 г. Всего к системе присоединилось 49 стран, однако США так и не стали участником Болонского процесса, предпочитая свою систему образования, предъявляя свои требования к иностранным специалистам.

Изначально идеи Болонской системы казались очень привлекательными и способствовали объединению различных систем образования, мобильности студентов, возможности получить образование в другой стране, унификации стандартов, направленности обучения на будущее развитие, признанию дипломов различных вузов на пространстве всех стран, входящих в Болонскую систему. Такая

организация способствовала и объединению усилий фундаментальных и прикладных научных исследований.

Главным отличием была двухуровневая система образования – бакалавриат и магистратура. Изначально бакалавриат предусматривал практическую направленность обучения, а магистратура получению углубленных знаний с возможностью участвовать в научных исследованиях. Реально бакалавриат – это очень узконаправленный уровень подготовки, направленный на обучения только какой-определенной профессии, отсюда компетентный подход к образованию. То есть обучение направлено не на получение знаний, а на формирование компетенций, наличие которых у выпускников контролировать практически невозможно. Для этого в программу обучения вводится определенное количество дидактических единиц, усвоение которых и должно формировать нужные компетенции в рамках направления подготовки. Введение единого государственного экзамена (ЕГЭ) – также следствие унификации образования [1].

Вступление России в Болонский процесс в начале нового века решало множество вопросов интеграции в Европейский союз, налаживания функционирования промышленности, производства, подготовки специалистов для новых производств, специалистов в области экономики, международного права и других направлений. Однако эта система в России так и не прижилась, осталось чуждой и непонятной. По прошествии почти 20 лет она перестала отвечать потребностям страны в специалистах с высшим образованием.

Каковы же итоги двухуровневого образования в России и итоги Болонского процесса? Основной задачей бакалавриата стала подготовка специалистов, соответствующих квалификации среднетехнического персонала. Бакалавриат нельзя назвать полноценным высшим образованием. К такому пришли и преподаватели вузов, и работодатели, и выпускники, которые на производстве сталкиваются с недостатком собственных знаний.

Мобильность студентов, предполагающая подготовку в нескольких вузах, включая зарубежные, также оказалась под вопросом, так как программы подготовки значительно разнятся, а международная система пересчета зачетных единиц ECTS (European Credit Transfer and Accumulation System) работает только для определенных направлений подготовки. Перемещение студентов в пространстве Болонской системы затруднено законодательством как РФ, так и других стран. Немаловажной является и финансовая сторона вопроса.

Болонская система является рыночно ориентированной, что ведет не к накоплению знаний, а удовлетворению потребностей экономики. Это вызвало к увеличению в вузах так называемых престижных направлений подготовки. Переизбыток выпускников привел к их невостребованности. Кроме того, образование потеряло смысл национальной ценности и значимости, что приводит к сегрегации общества, потере традиций в обучении и воспитании молодежи.

Профессорско-преподавательский состав вузов был вынужден переработать курсы дисциплин, сокращая теоретические основы, увеличивая долю практико-ориентированных вопросов. Кроме того, сократилось и число часов на изучение дисциплин. При этом доля часов на самостоятельную работу значительно увеличилась. Как показывает практика преподавания, за редким исключением, студенты не умеют работать самостоятельно. Нагрузка на одного преподавателя увеличилась, что привело к снижению качества образования, снижению успеваемости студентов.

Преподаватель вуза обязан участвовать в научной работе, эффективность которой оценивается по публикациям в иностранных журналах систем SCOPUS, WEB OF SCIENCE и др. Значимость отечественных научных изданий снизилась. Положительным в плане научных исследований является участие в российских программах зарубежных ученых и наоборот.

Выход из Болонского процесса стал реальностью, и реформа системы высшего образования – необходимостью. Переход к новой системе образования требует тщательного анализа итогов Болонского процесса в России, особенно причин снижения уровня знаний, уровня подготовки в целом. Сокращение курсов фундаментальных дисциплин (математика, физика, биология, программирование и т.д.) показали, что выпускники плохо ориентируются в выбранной профессии, трудно осваивают необходимые знания, повышают квалификацию, в результате неспособны к исследовательской, научной и конструкторской деятельности [2]. Это следствие формального подхода к выполнению требований Болонской системы, да сама система являлась формальной, так как обеспечение учебного процесса основывалось на выполнении инструкций, требований подзаконных актов, но не определяло пути достижения цели формирования у студентов определенных компетенций.

Возвращение к прежней системе образования в настоящее время невозможно: сформировалось определенное общественное мнение о бакалаврах и магистрах, необходимо определить значимость дипломов при переходе к новой системе. Для подготовки выпускников по значимым для страны направлениям предлагается перейти на специалитет. Бакалавриат сохраняется для подготовки специалистов узкого профиля. Более жестко следует отбирать студентов в магистратуру, которая должна развивать творческие способности студентов и включать углубленную теоретическую подготовку. Должны быть переработаны критерии поступления в высшую школу.

В последних выступлениях министра образования и его заместителей были изложены предложения о реформировании высшей школы. Предполагается ввести понятие базового высшего образования со сроком обучения 4-6 лет в зависимости от специальности. Магистратура будет относиться к специализированному образованию по специальности. Срок обучения составит 1-2 года. Перечни специальностей и направлений подготовки приведены в соответствии с потребностями работодателей. Возрастает число бюджетных мест на инженерные специальности, что обусловлено потребностями промышленного производства.

Изменения затронут и форму диплома. В дипломе будет указываться направление подготовки или специальность, срок подготовки и основная квалификация. Это необходимо для взаимодействия с работодателями.

Общая стратегия перехода к новой образовательной парадигме высшего образования зачитана Президентом РФ В.В. Путиным в рамках послания Федеральному собранию в феврале 2023 г.: «Очень важный вопрос – о нашей высшей школе. Здесь назрели существенные изменения в условиях новых требований, необходим синтез всего лучшего, что было в советской системе образования, и опыта последних десятилетий. В этой связи предлагается следующее: вернуться к традиционной для нашей страны базовой подготовке специалистов с высшим образованием».

1. Авшаров А. Г. Выход из Болонского соглашения высшего образования РФ – «Прожитый этап» или «Отечественный политический рывок» / А. Г. Авшаров, М. В. Волошина, О. Ю. Косенко // Экономика и управление народным хозяйством. – 2022. – № 6 (211). – С. 13-20.

2. Богданова И.И. Отмена Болонской системы: проблемы и перспективы высшего образования в России. // Актуальные проблемы педагогики и психологии. – 2022. – № 8. – С. 11-16.

ФИЗИКИ-ПОЛИТЕХНИКИ И СОВЕТСКИЙ АТОМНЫЙ ПРОЕКТ

Д.И. Кузнецов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург)

Представлена история участия выдающихся сотрудников и выпускников Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в создании атомного проекта, их научный вклад в разработку ядерного оружия и освоения мирного атома. Дан краткий анализ исторических событий в СССР в области исследования атомного ядра и почему в сентябре 1942 года вышло распоряжение Государственного комитета обороны по возобновлению работ, связанных с атомной энергией путем расщепления ядра урана.

PHYSICS-POLYTECHNICS AND THE SOVIET ATOMIC PROJECT

D.I. Kuznetsov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (St.- Petersburg)

dkuznec@list.ru

The history of the participation of outstanding employees and graduates of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University in the creation of the atomic project, their scientific contribution to the development of nuclear weapons and the development of peaceful atom is presented. A brief analysis of the historical events in the USSR in the field of research of the atomic nucleus is given and why in September 1942 the State Defense Committee issued an order to resume work related to atomic energy by fissioning the uranium nucleus.

DOI:10.22250/9785934934195_195

Для Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого атомная отрасль всегда имела и имеет исключительное значение. Считается, что как отдельная отрасль в нашей стране она зародилась 80 лет назад. Именно в сентябре 1942 г. Государственный Комитет Обороны (ГКО) распоряжением (№ 2352сс от 28.09.42 г.) обязал Академию наук «...возобновить работы по исследованию осуществимости использования атомной энергии путем расщепления ядра урана и представить к 1 апреля 1943 г. доклад о возможности создания урановой бомбы или уранового топлива». Была организована специальная лаборатория атомного ядра при Ленинградском физико-техническом институте, находившемся в то время в эвакуации в Казани. Позже она была названа Лабораторией измерительных приборов № 2 Академии наук СССР (ЛИПАН № 2). Из этого распоряжения видно, что работы, касавшиеся использования атомной энергии, в нашей стране велись и до начала войны с фашистской Германией, их просто требовалось восстановить.

Известно, что еще в середине сентября 1937 г. в Москве под председательством директора Физико-технического института и профессора Ленинградского политехнического института А.Ф. Иоффе состоялась конференция по изучению атомного ядра [1]. Что касается ЛИПАН №2, то с работой данной лаборатории связаны имена таких выдающихся ученых, сотрудников и выпускников Ленинградского политехнического института как Игорь Курчатов, Юлий Харитон, Кирилл Щёлкин, Яков Зельдович, Анатолий Александров, Исаак Кикоин, Николай Доллежал, Николай Духов, Георгий Флёров. Эти и другие выдающиеся ученые и конструкторы-политехники стали знаковыми фигурами

атомного проекта, а их имена навсегда вписаны золотыми буквами в историю страны.

Еще до Великой Отечественной войны советские ученые добились тогда значительных достижений в области освоения атомного ядра. Так, в 1939 г. Юлий Харитон и Яков Зельдович впервые определили условия, при которых происходит цепная реакция деления атомных ядер урана. А в 1940-м Георгий Флёрв и Константин Петржак открыли самопроизвольный распад ядер атомов урана. Но война прервала исследования советских физиков-атомщиков. Все силы ученых были перенаправлены на помощь фронту. Однако вскоре руководству страны благодаря данным разведки стало известно, что в США и Англии начаты работы по использованию атомной энергии в военных целях. Работы в СССР по данному направлению ускорились. Научным руководителем советского атомного проекта был назначен один из основоположников физики атомного ядра в СССР, профессор Ленинградского политехнического института и сотрудник физико-технического института Игорь Курчатов. Научным центром по руководству ядерными исследованиями стала Лаборатория (ЛИПАН № 2). Пять направлений из шести в ней возглавили политехники – Курчатов, Кикоин, Флёрв, Арцимович и Харитон [2].

Однако темпы продвижения к главной цели – созданию отечественной атомной бомбы – были недостаточными. Ситуация резко изменилась летом 1945 г. 16 июля США испытали свой первый атомный заряд, а 6 и 9 августа подвергли атомной бомбардировке Хиросиму и Нагасаки. Для ускорения работ по созданию советского атомного оружия были приняты чрезвычайные меры мобилизационного характера. Американские аналитики прогнозировали, что Советский Союз в послевоенных условиях сможет создать свою атомную бомбу, вероятнее всего, не ранее 1954 г. Однако они ошиблись. 29 августа 1949 г. на Семипалатинском полигоне был успешно испытан первый советский заряд для атомной бомбы РДС-1 мощностью около 20 килотонн в тротиловом эквиваленте. Руководил работами выпускник физико-механического факультета Ленинградского политехнического института Михаил Садовский – будущий академик РАН и будущий участник переговоров между СССР и США в Женеве о сокращении запасов ядерного оружия. Тем самым была ликвидирована монополия США на обладание атомным оружием и предотвращена возможность одностороннего военного конфликта с его безнаказанным применением. Советские атомщики путем колоссального напряжения сил и ресурсов в сжатые сроки совершили, без преувеличения, великий подвиг. Атомный проект оказал огромное влияние на темпы научного развития Советского Союза, способствовал ускорению развития самых разных областей – материаловедения, вычислительной математики и ЭВМ, физики высоких давлений и температур, физики элементарных частиц и ускорителей [3].

Однако СССР еще до своего первого ядерного испытания стал активно развивать направление, связанное с мирным применением атомной энергии. В 1948 г. по предложению Игоря Курчатова начались первые работы по практическому использованию энергии атома для получения электроэнергии. Главным их итогом стал пуск первой в мире атомной электростанции в Обнинске. Станция дала свой первый ток 26 июня 1954 г. Она была оснащена уран-графитовым канальным реактором с водяным теплоносителем мощностью всего 5 мегаватт. Опыт эксплуатации первой станции полностью подтвердил инженерно-технические решения, предложенные специалистами атомной отрасли, что позволило приступить к реализации широкомасштабной программы по строительству в СССР новых атомных станций. Особой гордостью отрасли стал единственный в мире атомный ледокольный флот. В 1959 г. вошел в эксплуатацию первый атомный ледокол «Ленин». В 1957 г. на воду спустили первую советскую атомную подводную лодку К-3 («Ленинский комсомол»). В дальнейшем советский ядерный оружейный комплекс активно развивался, создавались заряды нового поколения – как для оснащения ракет различного типа, так и для самолетов и подводных лодок. В 1977 г. атомный ледокол «Арктика» стал первым в истории мореплавания надводным судном, покорившим Северный полюс [4].

Громадный научно-технический потенциал – одна из главных особенностей атомной отрасли. В России не было и нет другого промышленного направления, в котором работало бы такое количество ученых, как в атомной сфере. Сегодня ученые-атомщики получают фундаментальные результаты мирового уровня и выполняют практические разработки, а наработки прошлых поколений ученых помогают создавать энергетику XXI в. – чистую и безопасную. Следует отметить, что атомная отрасль всегда была средоточием новых знаний и технологий. История и настоящее атомной промышленности – это громадный перечень научных и технических достижений, сделавших ее одной из ключевых, стратегических отраслей российской экономики. Труд и талант множества ученых, конструкторов, инженеров, строителей, сотен тысяч простых работников обеспечили обороноспособность и национальную безопасность страны, стали залогом глобального лидерства сначала Советского Союза, а затем России в технологиях мирного использования атомной энергии. И сотрудники СПбПУ Петра Великого всегда были в авангарде этого движения.

-
1. Асташенков П.Т. Академик И.В.Курчатов.– М.: Воениздат, 1971.
 2. Бодрихин Н.Г. Анатолий Александров.– М.: ЖЗЛ; Молодая гвардия, 2018.
 3. Лойцянский Л.Г. Из моих воспоминаний. Записки профессора-политехника.– СПб.: 1998.
 4. Васильев Ю.С. 110 лет на службе России. Сборник статей о Политехническом университете.– СПб.: Наука, 2009.

УДК 372.853

ЭКСПЕРИМЕНТИРОВАНИЕ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ КАК СРЕДСТВО РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ УМЕНИЙ УЧАЩИХСЯ НА УРОКАХ ФИЗИКИ

И.В. Литовко

МАОУ «Школа № 26 г. Благовещенска» (г. Благовещенск)

livirina@mail.ru

Обоснована возможность использования экспериментальных задач на уроках физики для развития исследовательских умений учащихся.

EXPERIMENTATION IN SOLVING PROBLEMS AS A MEANS OF DEVELOPING STUDENTS' RESEARCH SKILLS IN PHYSICS LESSONS

I.V. Litovko

MAOU "School No. 26 of Blagoveshchensk" (Blagoveshchensk)

livirina@mail.ru

The possibility of using experimental tasks in physics lessons for the development of students' research skills is substantiated.

DOI:10.22250/9785934934195_197

Одна из важнейших задач современной школы – научить школьников учиться, укрепить их способность к саморазвитию в процессе обучения, для чего необходимо сформировать у них соответствующие устойчивые желания, интересы, умения.

Анализ ответов, полученных при анкетировании учащихся по изучению мотивации к учебному предмету «Физика», показывает, что большинству учащихся нравится определять значение физических величин при выполнении домашних экспериментальных заданий, на уроке самостоятельно выполнять опыты и лабораторные работы. И неудивительно, так как особенностью физики является ее экспериментальный характер. Поэтому, наряду с обычными заданиями – изучение текста учебника, заучивание правил и законов, решение задач и упражнений, – нужно, чтобы учащиеся выполняли задания практического характера. Большую роль в этом играют экспериментальные задачи.

Экспериментальные задачи – это физические задачи, которые не могут быть решены формально, без достаточного осмысливания физического процесса. Решение таких задач связано с экспериментом: с проведением измерений, воспроизведением физических явлений, наблюдением за физическими процессами и т.п. В отличие от текстовых задач экспериментальные задачи требуют больше времени на подготовку и решение [1].

Среди достоинств экспериментальных задач можно выделить следующие.

1. Экспериментальные задачи способствуют повышению познавательной активности учащихся на уроках, развитию логического мышления и проведению анализа явления.
2. Решение экспериментальных задач способствуют получению прочных знаний, умению использовать их при рассмотрении практических вопросов.
3. Экспериментальные задачи позволяют учащимся ознакомиться с особенностями эксперимента как метода научного познания, знакомят с основными принципами научных наблюдений.
4. Последовательное решение экспериментальных задач в учебном процессе способствует формированию у учащихся научного мировоззрения, развитию у них диалектического и физического мышления.
5. Решая экспериментальные задачи и проверяя решение опытом, ученики убеждаются в достоверности полученных знаний, в том, что опыт является критерием теоретических знаний.
6. Использование экспериментальных задач способствует приобретению учащимися умений и навыков исследовательского характера, развитию творческих способностей. Школьникам приходится выдвигать гипотезу и проверять ее на практике, составлять план решения задачи, определять способы получения некоторых данных, отбирать и даже «конструировать» нужные приборы для воспроизведения того или иного явления.
7. Анализ экспериментальных задач воспитывает у учеников критический подход к результатам измерений, способность оценивать условия, при которых производится эксперимент.
8. Экспериментальные задачи формируют у учащихся потребность в самообразовании [2].

Экспериментальные задачи подразделяются на качественные и количественные. Решение качественных задач осуществляется путем построения логической цепочки умозаключений, в них отсутствуют измерения и математические расчеты. Учащимся требуется воспроизвести физическое явление с помощью выданных приборов или предвидеть явление, которое должно совершиться в результате опыта.

При решении количественных экспериментальных задач учащиеся сначала производят необходимые измерения с помощью приборов, а затем, используя полученные данные, вычисляют с помощью математических формул необходимую физическую величину.

Решение экспериментальных задач состоит из четырех этапов:

1. Осмысление условия задачи (знакомство с условием задачи и предлагаемым оборудованием, оценка физической ситуации).

2. Составление плана решения (разработка пути поиска от данных к искомому, порядка проведения эксперимента).
3. Реализация плана (выполнение эксперимента, измерение величин).
4. Исследование ответа (анализ результата эксперимента и правдоподобности полученных результатов) [3].

Экспериментальные задачи могут быть использованы на любом этапе урока: актуализация знаний, первичное усвоение и понимание новых знаний, первичное закрепление, информация о домашнем задании.

При подборе экспериментальных задач необходимо, чтобы они были направлены на пополнение знаний, закрепление и углубление изученного материала, отработку вычислительных и практических навыков. Например, при изучении темы «Движение тел под действием силы тяжести» вместо текстовых задач из сборников можно предложить следующие задачи:

вычислить конечную скорость и время свободно падающего ластика;
определить начальную скорость мяча, подброшенного вертикально вверх;
определить горизонтальную скорость шарика, скатившегося со стола;
вычислить коэффициент трения монеты при скольжении с деревянной линейки (при поднятии конца линейки), пока монета не начнет скользить, и т.п.

Тексты подобных задач не содержат перечня необходимых приборов, поэтому можно заслушать мнение любого ученика, какие материалы и приборы можно использовать (какие выполнить измерения и вычисления).

Творчески школьники подходят к выполнению заданий, в которых необходимо определить физическую величину с помощью определенных приборов и предметов. Например:

с помощью карандаша и линейки вычислить сопротивление алюминиевого провода;
определить плотность камня с помощью динамометра, сосуда с водой, нити;
используя линейку и весы с разновесами, найти длину мотка проволоки в мотке, не разматывая его;

рассчитать скорость истечения воды из водопроводного крана, имея цилиндрическую банку, секундомер, штангенциркуль и т.п. [5].

В учебниках «Физика» школьникам после изучения отдельных тем предлагаются экспериментальные задачи, которые можно выполнить в домашних условиях. Например: «В вашем распоряжении имеются весы с разновесами, измерительный цилиндр с водой и металлический шарик на нити. Предложите, как определить плотность шарика»; «Зная свою массу и площадь ботинка, вычислите, какое давление вы производите при ходьбе и стоя на месте» и т.п. При выполнении таких задач учащиеся самостоятельно планируют опыт, подбирают оборудование с применением подручных средств, бытовых приборов, технических устройств для проведения необходимых опытов и измерений.

Домашние экспериментальные задачи могут быть предложены до или после выполнения лабораторной работы. Например, перед выполнением лабораторной работы «Сравнение количеств теплоты при смешивании воды разной температуры» предлагается задание: «Налейте в стакан горячей воды и дайте ей остыть. Вычислите, какое количество теплоты выделит вода». После проведения лабораторной работы «Исследование зависимости периода и частоты свободных колебаний нитяного маятника от его длины» учащиеся выполняют задание: «Проведите исследование зависимости периода колебаний математического маятника от его массы».

Решение любой экспериментальной задачи предполагает проведение измерений, что позволяет отработать навыки нахождения цены деления и показания прибора. Например, после изучения темы «Атмосферное давление» предлагается экспериментальная задача: определить, с какой силой атмосферный воздух давит на страницу тетради. Ознакомившись с содержанием такой задачи, ученики:

измеряют длину и ширину страницы тетради при помощи измерительной линейки;
определяют атмосферное давление при помощи барометра-анероида;
записывают данные измеренных величин;
рассчитывают силу по формуле $F = p \cdot S$.

В рабочей программе по предмету в конце учебного года за счет резервного времени выделяются часы на проведение уроков по решению экспериментальных задач – уроки-практикумы, что позволяет школьникам развивать исследовательские умения, проявлять самостоятельность, и творческие начала.

Для обучающихся, проявляющих интерес к предмету, решение экспериментальных задач осуществляется на занятиях элективных курсов. В разработанные программы «Мир движений», «Эксперименты в физике», «Решение задач повышенной сложности», «Измерение физических величин» включены занятия, на которых ученики самостоятельно рассматривают экспериментальные задачи, включаются в исследовательскую деятельность, накапливают опыт самостоятельного принятия решений.

Региональный этап Всероссийской олимпиады по физике включает теоретический и практический туры. На консультациях при подготовке к олимпиаде с учащимися рассматривается решение задач практического тура, представляющие собой задания по определению физической величины с помощью предоставленных приборов. При подготовке к практическому туру учащиеся знакомятся с работой основных приборов – мультиметра, электронных весов, электронного секундомера и электронного термометра; изучают требования к построению графиков для установления зависимости между физическими величинами и оценке погрешностей измерений.

В условиях введения ФГОС каждый учащийся 9 и 11 класса должен подготовить и защитить индивидуальный проект. По предмету «Физика» такие проекты чаще всего являются исследовательскими. В ходе реализации основного этапа работы над проектом учащиеся под руководством учителя определяют тему проекта, цель и задачи, выдвигают гипотезу, составляют план работы над проектом, подбирается оборудование для опытов, проводят эксперимент [4]. С результатами своих исследований учащиеся выступают на научно-практических конференциях («Определение ускорения свободного падения при изучении движения тела», «Определение магнитной индукции постоянных магнитов», «Определение плотности тел с помощью рычажных весов», «Исследование магнитного поля катушки с током» и т.п.).

Систематическое выполнение экспериментальных задач способствует более осознанному и конкретному восприятию изучаемого на уроке материала, повышает интерес к физике, развивает любознательность, прививает ценные практические умения и навыки, что является эффективным средством роста самостоятельности и инициативы учащихся, развития исследовательских умений.

-
1. Антипин И.Г. Экспериментальные задачи по физике в 6- 7 классах. – М.: Просвещение, 1974. – 251 с.
 2. Атаманченко А.К. Экспериментальные задачи по физике и методы их решения. Учебное пособие / А.К. Атаманченко, А.А. Давиденко. – Таганрог: Ньюанс, 2003. – 52 с.
 3. Бубликов С.В. Обучение решению экспериментальных задач по физике как средство интеллектуального развития учащихся. Учебное пособие / С.В. Бубликов, А.А. Регель, Р.Б. Чернышов. - СПб: Изд. РГПУ им. А.И. Герцена, 2007. – 84 с.
 4. Гребенев И.В. Школьный физический эксперимент в исследовательском проектном обучении. Учебное пособие / И.В. Гребенев, О.В. Лебедева, С.В. Полушкина. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. – 56 с.
 5. Ланге В.Н. Экспериментальные физические задачи на смекалку. – М.: Наука, 1985. – 128 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ЦЕНТРА ОБРАЗОВАНИЯ «ТОЧКА РОСТА» НА УРОКАХ ФИЗИКИ

Е.Н. Масленникова

МАОУ «Школа № 14 г. Благовещенска» (г. Благовещенск)

elena1964maslen@mail.ru

Представлены варианты использования оборудования центра образования «Точка роста» и традиционного оборудования при проведении демонстрационных экспериментов и практических работ на уроках физики. Показана эффективность одновременного использования традиционного и цифрового оборудования для повышения интереса учащихся к изучению физики.

USING THE EQUIPMENT OF THE POINT OF GROWTH EDUCATION CENTER IN PHYSICS LESSONS

E.N. Maslennikova

MAEI «School No. 14 of Blagoveshchensk»

elena1964maslen@mail.ru

The variants of using the equipment of the Point of Growth education center and traditional equipment for conducting demonstration experiments and practical work in physics lessons are presented. The effectiveness of simultaneous use of traditional and digital equipment to increase the interest of students in the study of physics is shown.

DOI:10.22250/9785934934195_201

2023-й год в России объявлен Годом наставника, тьютора – по-английски. Я являюсь тьютором Центра непрерывного повышения мастерства педагогических работников Амурской области, поэтому имею возможность использовать на своих уроках оборудование центра образования «Точка роста». Использование как традиционного, так и оборудование Центра позволяет повышать интерес детей к изучению физики. На открытых уроках, мастер – классах показываю учителям преимущества использования цифрового оборудования.

В 8-м классе, в разделе «Тепловые явления», исследуется зависимость скорости остывания воды от разности температур между горячей водой и окружающей средой. Необходимо опытным путем установить эту зависимость. Одновременно проводится опыт на традиционном оборудовании (стакан с горячей водой, термометр, часы) и на оборудовании Центра (датчик температуры, компьютер, программное обеспечение). Через каждые 5 минут учащиеся снимают показания термометра и данные заносят в таблицу. По этим данным строится график зависимости температуры воды от времени, делается вывод, в это же время данные с датчика автоматически выводятся на экран и одновременно строится график. После завершения работы учащиеся сравнивают значения, полученные самостоятельно и сделанные компьютером. Графики похожи, но значения температур немного отличаются. Вместе с учащимися делаем вывод, что при прямом измерении существует погрешность, при выполнении опыта с помощью оборудования она существенно уменьшается. Эти два опыта, проведенные одновременно, позволяют учащимся понять, что существует несколько вариантов получения ответа на поставленный вопрос, а из них нужно уметь выбрать наиболее подходящий.

В 10-м классе есть практическая работа «Определение жесткости пружины». В ходе ее выполнения используются три разные пружины известной жесткости. Для проведения этой работы учащиеся делятся на четыре группы по 5-6 человек. Первые три группы выполняют работу на традиционном оборудовании (пружина, три груза массой 101 г. каждый, линейка, динамометр, штатив с муфтой и лапкой). Четвертая группа выполняет эксперимент на оборудовании центра «Точка роста». Три группы определяют жесткость только одной пружины, четвертая – всех трех пружин. После завершения работы сравниваются результаты. Учащиеся на практическом примере убеждаются, что жесткость пружин, измеренная с помощью датчиков, имеет более точное значение, чем с помощью традиционного оборудования. Работа четвертой группы проходила наиболее интенсивно, чем работа трех групп, так как за одно и то же время ею было выполнено три опыта.

Очень важной темой в курсе физики 11-го класса является тема «Электромагнитные явления». Учащимся бывает трудно представить, какие процессы происходят при прохождении электрического тока по проводнику, находящемуся в магнитном поле. Наиболее простой способ визуально представить процесс – включить видеоролик. Однако как показывает практика, не все дети способны воспринимать сложную информацию в таком формате. Если использовать оборудование Центра «Точка роста», то можно наглядно показать, как зависит модуль силы ампера от силы тока в проводнике [1]. При проведении опыта на экран автоматически выводится значение силы ампера. По данным опыта строится график, который показывает линейную зависимость силы ампера от силы тока в проводнике. Большое преимущество этого опыта заключается в том, что время для его проведения достаточно мало. Но за небольшой промежуток времени можно в простой и доступной форме донести до учащихся важную информацию.

Еще одна тема в 11-м классе, где на уроке можно применять одновременно как традиционное оборудование, так и оборудование Центра «Точка роста», – это изучение явления электромагнитной индукции. С помощью традиционного оборудования (катушка, полосовой магнит, гальванометр, соединительные провода) можно установить качественную зависимость между скоростью изменения магнитного потока и силой индукционного тока, направлением индукционного тока и величиной изменения магнитного потока. Используя цифровое оборудование, можно сделать количественную оценку зависимости силы индукционного тока от скорости изменения магнитного потока, что способствует более качественному усвоению изучаемого материала [2]. На этом же опыте видна зависимость направления индукционного тока от того, как изменяется магнитный поток (увеличивается или уменьшается). Времени при проведении эксперимента на цифровом оборудовании тратится меньше, что тоже является положительным фактором использования такого оборудования.

В декабре 2022 г. на базе «Школа № 14 г. Благовещенска» проводился семинар учителей физики города. Тема открытого урока: «Изучение зависимости периода колебаний математического маятника от длины нити, массы шарика и амплитуды колебаний». Для установления зависимости опытным путем учащиеся делились на четыре группы по 5-6 человек. Первая группа работала с маятниками разной длины, измеряла время 50 колебаний, по формуле рассчитывала период колебаний. Повторялся этот опыт пять раз, с разной длиной нити. По результатам опытов делался вывод о зависимости периода колебаний от длины нити. Вторая группа работала с маятниками одинаковой длины, но разной массы (объем шариков одинаковый). Измерялось время 50 колебаний, по формуле вычислялся период, делался вывод. У третьей группы было задание установить зависимость периода колебаний маятника от амплитуды. Проводилось пять опытов на одном маятнике. Менялась амплитуда колебаний, делался вывод. Четвертая группа работала на оборудовании центра образования «Точка роста» [3]. Рассматривались все три случая зависимости. При подведении итогов каждая группа представила свои выводы. Выводы трех групп совпали с выводами четвертой группы. Учащиеся на практике убедились, что работа на оборудовании центра проходит более эффективно. Учителя г. Благовещенска увидели, как

можно дополнить, разнообразить, сделать более интересным урок физики, если использовать оборудование центра образования «Точка роста».

Современный урок физики предусматривает деятельностный подход к обучению, при этом опыты, эксперименты, проводимые во время урока, играют очень важную роль. Работа на традиционном оборудовании чрезвычайно важна, так как развивают у учащихся практические навыки, что положительно скажется в дальнейшей жизни, так как в современном мире дети в подавляющем большинстве не умеют работать руками. Однако в век цифровых технологий необходимо использовать все достижения науки и техники, поэтому работа с датчиками тоже чрезвычайно важна. Дети получают навыки обращения с цифровым оборудованием, что позволяет совершенствовать знания, полученные на уроках информатики. Работая на традиционном оборудовании и оборудовании центра образования «Точка роста», учащиеся имеют возможности проводить сравнения, выбирать наиболее эффективный способ получения результатов, обрабатывать эти результаты, делать выводы, более быстро и точно получать результат, что в свою очередь способствует повышению интереса к изучению физики.

-
1. Поваляев О.А., Ханнанов Н.К., Хоменко С.В. Цифровая лаборатория по физике. Базовый уровень // DELIRI. –2021. – С.89.
 2. Поваляев О.А., Ханнанов Н.К., Хоменко С.В. Цифровая лаборатория по физике. Базовый уровень // DELIRI. –2021. – С.92.
 3. Поваляев О.А., Ханнанов Н.К., Хоменко С.В. Цифровая лаборатория по физике. Базовый уровень // DELIRI. –2021. – С.47.

УДК 378

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ В ШКОЛЬНОМ КУРСЕ

Т.А. Меределина

Благовещенский государственный педагогический университет (г. Благовещенск)
biofirm@mail.ru

Показана необходимость формирования у учащихся средней школы основных понятий об элементарных частицах, их свойствах и месте в современной науке. Раскрыты возможности школьной программы для освоения методологических основ квантового мира.

PHYSICS OF ELEMENTARY PARTICLES IN THE SCHOOL COURSE

T.A. Meredelina

Blagoveshchensk State Pedagogical University (Blagoveshchensk)
biofirm@mail.ru

The necessity of forming the basic concepts of elementary particles, their properties and place in modern science in secondary school students is shown. The possibilities of the school program for mastering the methodological foundations of the quantum world are revealed.

DOI:10.22250/9785934934195_203

Физика элементарных частиц (ФЭЧ) – наука уже с вековой историей, основанная на особых, отличных от классических, концепциях квантового мира. Этот молодой раздел физики изучает не только структуру, свойства и взаимодействия элементарных частиц, но и стремится установить наиболее общие законы мироустройства. В фундаменте физики элементарных частиц – методологические основы квантового мира: дискретность и квантование, симметрия и сохранность, элементарность. В курсе физики средней школы учебного материала на тему «Элементарные частицы» практически нет, знакомство с электроном, протоном, нейтроном происходит постепенно в учебном процессе при освоении основного курса. Скудость материала и отсутствие системного подхода к изучению данной темы не позволяет сформировать представления о микромире и элементарных частицах, методологические знания.

Основополагающей идеей методологических знаний физической науки является идея элементарности. Элементарность – одна из древнейших идей естествознания, с древности ученые искали малую частицу, подобную целому. Начиная с VII в. до н. э. в Греции выдвигались идеи о единой материальной основе мира, таковой считали воду, воздух, «апейрон» – неопределенное вещество. Идеи атомистического строения впервые были высказаны Левкиппом (500-440 гг. до н. э.) и развиты его учеником Демокритом (460-370 гг. до н. э.) [1]. Однако в процессе познания мира само понятие элементарности испытывало ряд уточнений, современная школьная программа позволяет установить логический ряд: молекула – атом – ядро и электроны – нуклоны – кварки. Проведенные исследования показали, что первокурсники физико-математического факультета считают все эти частицы элементарными, немногие знают, что элементарных частиц насчитывается несколько сот, единицы знают о современных открытиях, в частности о бозоне Хиггса, а если и знают, то не из школьных учебников. Критерии элементарности обсуждаются. Какие микрообъекты можно считать элементарными, если большинство из них составные и нестабильные, если протон и нейтрон превращаются друг в друга, а фотон распадается на пару электрон-позитрон и др. Тем не менее, наши ученики имеют право знать о современном состоянии элементарного мира, необходимо ввести в школьную программу «Стандартную модель» как некую систему, приводящую к упорядочению знания о микрообъектах и их свойствах.

Понятия дискретности и квантованности в школьном курсе не вводятся, но на первых же уроках по электричеству электрон представляется как частица, несущая элементарный неделимый электрический заряд, и все заряженные тела имеют заряд, кратный заряду электрона. Однако говоря о заряде протона, учащимся не поясняют, что он складывается из зарядов более меньших частиц – кварков. При знакомстве старшеклассников с видами взаимодействий необходимо рассказать о частицах-переносчиках этих взаимодействий, и начать необходимо с фотона как кванта электромагнитного взаимодействия. Введение постулатов Бора и формулы Планка дает возможность пояснить учащимся то обстоятельство, что для описания свойств элементарных частиц используются квантованные физические величины. Энергия, импульс, момент импульса могут принимать только дискретные значения, определенные набором собственных значений. Сам факт существования элементарных частиц доказывает дискретность структуры вещества и поля, сказывается на мировоззренческих взглядах будущих ученых.

В физике выделяются универсальные законы сохранения, такие – как законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, но есть и специфические для квантового мира, – к примеру, законы сохранения барионного и лептонного зарядов. В физике фундаментальных частиц законы сохранения играют особую роль, они определяют возможные взаимопревращения частиц, характеристики неизвестных частиц, появляющихся при распадах, способствуют открытию новых элементарных частиц. Иногда в ФЭЧ законы сохранения становятся единственным источником прогноза взаимодействия частиц, основанием их систематизации или классификации.

Идея сохранения в микромире плавно переходит в идею симметрии, которая приводит к идее существования античастиц. Особое внимание учащихся следует обратить на то, что электрический заряд в микромире не является приоритетным для зеркальной симметрии. Электрически нейтральные частицы тоже могут иметь античастицы, так как обладают и лептонным и барионным зарядами. Одна из самых распространенных ошибок школьников – многие считают, что протон является античастицей электрона.

Анализируя типичные ошибки участников единого государственного экзамена (ЕГЭ), можно сделать вывод, что у большинства ребят основные понятия об элементарных частицах не сформированы [2]. Достичь более высокого уровня образованности не позволяет практика изучения этой темы в современном школьном курсе физики. Для формирования научного мировоззрения и естественнонаучной картины мира необходимо при изучении элементарных частиц излагать материал с точки зрения индивидуальности микромира – мира, который обладает уникальными свойствами элементарности, дискретности, квантованности, сохранения, симметрии и др. Зачастую авторы, за исключением некоторых, боятся перегрузить учебники фактами современной науки [3], что приводит к нарушению принципа научности при обучении. Используя открытия современной науки и учитывая возрастные особенности учащихся, можно значительно повысить качество знаний, избежать формирования ошибочных представлений и заблуждений.

-
1. Дягилев Ф. М. Из истории физики и жизни ее творцов. – М.: Просвещение, 1986. – 255 с.
 2. Аналитические и методические материалы. Методические рекомендации для учителей, подготовленные на анализе типичных ошибок участников ЕГЭ. Физика. – ФБГНУ «Федеральный институт педагогических измерений» [сайт]. URL: <https://fipi.ru/egge/analiticheskie-i-metodicheskie-materialy> (дата обращения: 10.06.23).
 3. Кондратьев А. С. Тенденции развития обучения физике в средней школе // Методологические проблемы физического образования, 1995. – С.3-4.

УДК 539.261, 004.42

ВИРТУАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОМУ АНАЛИЗУ

В.И. Римлянд, К.Е. Удалов

Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)
riml@pnu.edu.ru

Рассматривается виртуальная лабораторная работа по рентгеновскому фазовому анализу, Разработана на языке программирования Python. В основе работы метод Дебая-Шеррера. Дифрактограммы строятся на основе известных справочных данных. Рефлексы моделируются с помощью формулы Шеррера и плотности вероятности Коши. Студенты на основе смоделированной программой дифрактограммы определяют углы и интенсивность рефлексов, рассчитывают межплоскостные расстояния.

VIRTUAL LABORATORY WORK ON X-RAY STRUCTURAL ANALYSIS

V.I. Rimlyand, K.E. Udalov

Pacific National University (Khabarovsk)
riml@pnu.edu.ru

A virtual laboratory work on X-ray phase analysis is considered. Developed in the programming language Python. The work is based on the Debye-Scherrer method. Diffraction patterns are built on the basis of known reference data. Reflexes are modeled using the Scherrer formula and the Cauchy probability density. Based on the diffractogram modeled by the program, students determine the angles and intensity of reflections and calculate the interplanar distance.

DOI:10.22250/9785934934195_205

Введение

Рентгеновский структурный анализ кристаллических веществ важное направление в физике твердого тела, часть «классического» курса «Физика твердого тела» или его аналогов. Основным видом рентгеноструктурного анализа является рентгеновский фазовый анализ. Он реализуется на базе специализированного научного оборудования – дифрактометров и требует высокой квалификации персонала. Это одна из причин, ограничивающих постановку и выполнение соответствующих лабораторных работ студентами вне специализированных лабораторий по рентгеноструктурному анализу. Проблема может быть решена путем создания виртуальной лабораторной работы (ЛР). В сети Интернет представлено большое количество виртуальных лабораторных работ по физике. Однако по физике твердого тела их количество ограничено, и авторам не удалось найти доступную в сети виртуальную ЛР по рентгеновскому фазовому анализу.

Виртуальная лабораторная работа

Разработанная ЛР основана на методе Дебая – Шеррера [1]. Данный метод наиболее часто используется для определения фазового состава вещества как в научных учреждениях, так и в лабораториях промышленных и геологических предприятий. Основой алгоритма ЛР является моделирование дифрактограмм образцов (рис.1), состоящих из одной или двух фаз, на основе известных справочных данных [2-3]. При выполнении ЛР студенты определяют углы отражения 2θ , интенсивность J рефлексов для различных типов анодов рентгеновских трубок. Затем рассчитываются межплоскостные расстояния d по формуле Брегга – Вульфа для углов θ [1]:

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (1)$$

где n – порядок максимума; λ – длина волны излучения.

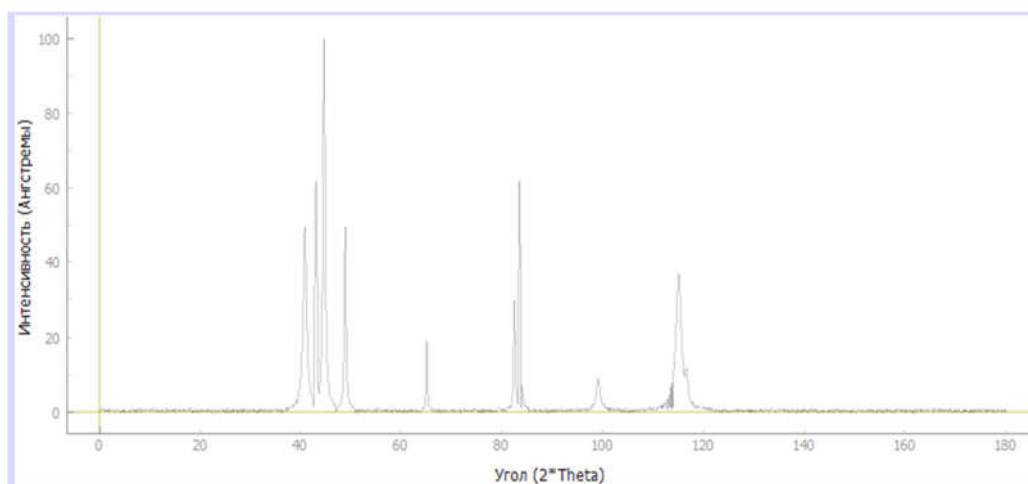


Рис. 1. Пример построенной дифрактограммы.

ЛР содержит восемь вариантов. Студент в соответствии с методическими указаниями выполняет два задания: 1 – определяется состав простой структуры из одного элемента (возможно 5 вариантов); 2 – определяется состав сложной структуры из двух фаз (возможно 3 варианта). Вариант содержит материал анода рентгеновской трубки и длины волн K_α и K_β –линии.

Пример двух вариантов:

1. Вещество – Al_2O_3 , материал анода – медь ($\lambda_\alpha - 1,5406 \text{ \AA}$, $\lambda_\beta - 1,392 \text{ \AA}$).
2. Вещество – Al_2O_3 и SiO_2 , материал анода – кобальт ($\lambda_\alpha - 1,7902 \text{ \AA}$, $\lambda_\beta - 1,6208 \text{ \AA}$).

Выполняя задание 1 студент с помощью интерфейса выбирает вариант ЛР, устанавливает фильтр K_β -линии, получает на экране дифрактограмму, рассчитанную программно (рис. 1), для излучения K_α -линии. Далее по экрану ПК определяет углы 2θ и значения интенсивностей I максимумов; используя условие Брегга – Вульфа (1), рассчитывает межплоскостные расстояния d для каждого угла θ .

Значения θ , d и I заносятся студентом в таблицу интерфейса экрана. По команде «Сравнить результаты» в таблице высвечиваются правильные значения d для данной дифрактограммы и химический символ элемента структуры (рис. 2). Если студент определил d с большой ошибкой ($> 5 \%$), правильные значения d и химический символ не возникают.

Угол максимума (градусы)	I	d рассчитанное студентом (ангстремы)	d табличное (ангстремы)	Вещество
40.8	50	2.21	2.213	Fe3C
43	62	2.102	2.104	Fe3C
44.6	100	2.03	2.0268	Fe
48.8	50	1.865	1.867	Fe3C
82.4	30	1.169	1.1702	Fe
83.4	62	1.158	1.16	Fe3C
115.1	37	0.913	0.9156	Fe3C

Рис. 2. Итоговая таблица результатов.

Чтобы увидеть, как меняется дифрактограмма при наличии фильтра и без него, студент может получить дифрактограмму без фильтра K_β -линии. Выполняя задание 2, студент выполняет пункты задания 1 для сложной двухфазной структуры.

Программная реализация виртуальной лабораторной работы

Для написания программы, моделирующей рентгеновский фазовый состав, был выбран язык Python. Выбор обусловлен тем, что данный язык поддерживает пакеты, позволяющие расширить базовые функции языка. Для создания графического интерфейса (рис. 3) используется пакет PySide2, а для работы с графиками и вывода их на экран интерфейса – пакет PyQtGraph. Интерфейс в пакете PySide2 строится с использованием виджетов, которые выполняют определенные функции. Основное окно имеет размер 1042×399 пикселей. Размер окна может изменяться пользователем. С помощью добавленной на график функции координат на экране отображаются значения интенсивности I и угла 2θ в ангстремах.

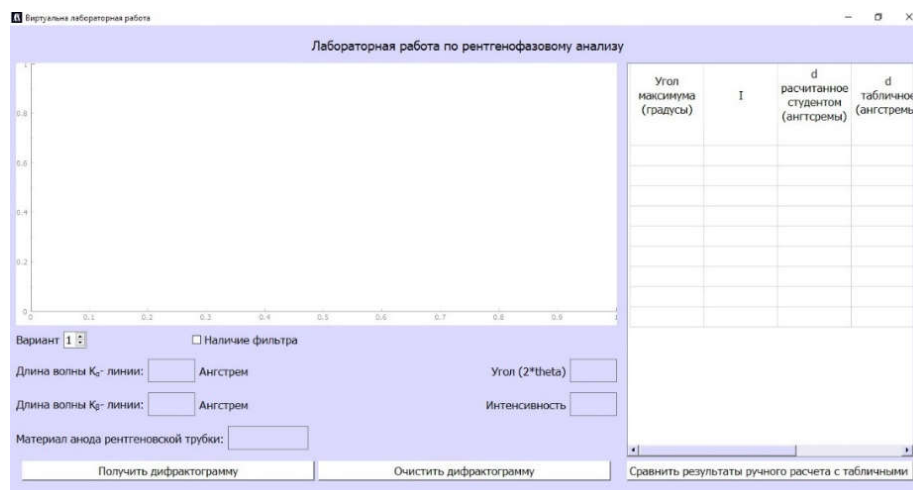


Рис. 3. Интерфейс программы.

В нижний виджет-контейнер добавляются две кнопки: «Получить дифрактограмму» и «Очистить дифрактограмму». Настройка эксперимента, значение длин волн для K_α и K_β -линии и материал анода указываются под дифрактограммой. Для настройки эксперимента были добавлены выбор варианта и возможность установки фильтра K_β -линии.

Для построения дифрактограммы создается нулевой массив на 1800 точек, что обусловлено максимальным брегговским углом – 180° . Данное количество точек дает цену деления в 0.1 градуса. Для каждого элемента создана своя база данных в формате .txt. Программа считывает базу данных при ее вызове и образует массив с помощью функции NumPy *loadtxt*. В качестве аргументов данная функция принимает название файла в формате .txt, тип данных *dtype*, разделитель *delimiter*, пропуск строки *skiprows* и номера колонок *usecols*, которые надо считывать. В тип данных подается *float*, так как в базе содержатся нецелочисленные значения межплоскостных расстояний. Значения интенсивности в дальнейшем будут конвертированы в целочисленный *int* –тип. Значения длин α - и β -волн присваиваются через переменные *lambdal* и *lambdbt*. Длины волн и межплоскостные расстояния задаются в ангстремах.

С помощью оператора *if-else* функция *diffract(self)* делится на две части: математическое моделирование рентгеновского фазового анализа для простой и сложной структуры. Однако, основные части кода для них совпадают. Считывание файлов происходило по колонкам: массив имеет размерность $2 \times N$, где N – количество элементов. Поэтому массив транспонируется и разделяется на два с помощью NumPy-функции *hsplit*. Для дальнейшей работы с массивами их тип меняется на *list*.

Заполнение массива происходит с помощью расчета брегговских углов через условие Брегга – Вульфа. Индекс элемента в массиве с межплоскостными расстояниями задается через функцию *randint* из пакета *random*. Межплоскостное расстояние подставляется в условие Брегга – Вульфа, и рассчитывается синус брегговского угла. Дальнейший расчет происходит, если синус меньше или равен 1. Данному максимуму присваивается соответствующее значение интенсивности. Если был убран фильтр β -волн, то происходит расчет брегговского угла и для β -волны, при этом значение интенсивности берется как 40% от интенсивности α -линии с фильтром.

Рефлексы (пики) на реальной дифрактограмме имеют конечную ширину. Ширина пиков находится с помощью формулы Шеррера [4]:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda K}{d \cos \theta}, \quad (2)$$

где $\Delta\theta$ – полуширина рефлекса (в градусах); λ – длина волны (ангстремы); $K = 1,15$ – коэффициент Шеррера.

Построение формы пиков с определенной шириной происходит с помощью плотности вероятности Коши

$$f(\theta) = \frac{\Delta\theta}{2\pi(\theta - \theta_0)^2 + \Delta\theta^2}. \quad (3)$$

Нормальное распределение Коши не учитывает значение интенсивности J , которое задает высоту пика. Поэтому был введен коэффициент, который восстанавливает распределение до значения интенсивности пика:

$$K = \frac{J_1}{J_2}, \quad (4)$$

где J_1 – значение интенсивности пика при угле θ ; J_2 – максимальное значение распределения при угле θ_0 .

Так как на реальных дифрактограммах нулевая амплитуда непостоянна, был добавлен шум через функцию *uniform* пакета *random*.

Заключение

Созданная виртуальная лабораторная работа позволяет моделировать процесс определения фазового состава вещества на основе методов рентгенофазового анализа. Работа рассчитана на два часа

выполнения студентами. Тестирование лабораторной работы показало ее работоспособность. Подготовлено соответствующее методическое указание для студентов. Лабораторная работа может использоваться в учебном лабораторном практикуме по курсу «Физика твердого тела» » направления бакалавриата «Физика» или аналогичных курсов, а также для создания десктопного приложения с реализацией в сети Интернет.

-
1. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Учебное пособие по физике – М.: Книга по требованию, 2012. – 789 с..
 2. Храмов А.С., Лукьянов И.В. Рентгеноструктурный анализ поликристаллов. Часть IV. Учебно-методическое пособие для студентов Института физики. – Казань: К(П)ФУ, 2010. – 76 с.
 3. ICDD. — URL: <https://www.icdd.com/> (дата обр. 26.06.2023).
 4. B.D. Cullity & S.R. Stock, Elements of X-Ray Diffraction, 3rd Ed., Prentice-Hall Inc, 2001

УДК 372.853

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА И РАЗВИТИЕ НАУЧНОГО МИРОВОЗЗРЕНИЯ УЧАЩИХСЯ

Ю. А. Рябцева, Е. Г. Аплачкина, О. Е. Кадеева

Дальневосточный федеральный университет. Школа педагогики, (г. Владивосток)
yulya.ryabtseva.00@mail.ru

Рассмотрена важность изучения современной физики и проанализировано ее влияние на научное мировоззрение учащихся.

MODERN PHYSICS AND THE DEVELOPMENT OF STUDENTS' SCIENTIFIC WORLD VIEW

Yu.A. Ryabtseva, E.G. Aplachkina, O.E. Kadeeva

Far Eastern Federal University, (Vladivostok)
yulya.ryabtseva.00@mail.ru

This article discusses the importance of studying modern physics and analyzes its impact on the scientific worldview of students.

DOI:10.22250/9785934934195_209

Основные концепции и открытия современной физики – ключевые элементы в современном научном мировоззрении. Квантовая механика, теория относительности и физика элементарных частиц – это лишь несколько областей, имеющих огромное значение в развитии современной науки. Квантовая механика – одна из основных концепций современной физики, которая изучает поведение частиц на атомарном и субатомарном уровне. Она открыла новые горизонты в понимании микромира и привела к появлению таких феноменов как квантовый суперпозиция и квантовое запутывание. Эти концепции вызывают ревизию привычных представлений о пространстве, времени и причинно-следственных связях. Теория относительности, разработанная Альбертом Эйнштейном, является еще одной фундаментальной концепцией в современной физике. Она предлагает новый взгляд на пространство, время

и гравитацию, а также отношения между объектами. Специальная теория относительности описывает физические явления в быстро движущихся системах, а общая теория относительности учитывает гравитацию и пространственно-временную кривизну. Эти открытия внесли колоссальный вклад в современное научное мировоззрение, расширяя понимание физической реальности и переосмысливая образ мира. Физика элементарных частиц изучает основные строительные блоки материи и их взаимодействия. С помощью коллайдеров и других экспериментальных методов физикам удастся исследовать микромир в самых малых масштабах, что открывает новые пути к пониманию фундаментальных законов природы. Открытие элементарных частиц, таких как кварки и лептоны, а также открытие Бозона Хиггса, предсказанного теорией элементарных частиц, имеет огромное значение для современной физики и вносит существенный вклад в нашу картину мира. Кроме квантовой механики, теории относительности и физики элементарных частиц, современная физика включает и другие важные области – астрофизику, ядерную физику, конденсированное состояние вещества и др. Все они способствуют формированию научного мировоззрения учащихся, расширяя их знания о фундаментальных законах природы и вызывая интерес к науке. Таким образом, основные концепции и открытия современной физики играют решающую роль в развитии научного мировоззрения учащихся. Они меняют привычное восприятие мира, вызывают новые вопросы и открывают двери к новым возможностям исследования и понимания природы. Изучение этих концепций позволяет учащимся обрести критическое мышление, аналитические и логические навыки, что имеет важное значение в общем интеллектуальном развитии [1].

Одно из главных изменений, вносимых современной физикой, связано с представлением о пространстве и времени. Классическая физика считала эти величины абсолютными и независимыми. Однако теория относительности Альберта Эйнштейна показала, что пространство и время взаимосвязаны и зависят от того, какие объекты и как быстро движутся. Это вызвало не только революцию в самой физике, но и подняло ряд философских вопросов: какова природа времени? Может ли время меняться? Какова структура пространства? Другим важным изменением, внесенным современной физикой, является переосмысление представлений о материи и энергии. Квантовая механика показала, что микромир испытывает квантовые скачки и обладает дуальными свойствами – например, частицы могут вести себя как волны и наоборот. Это приводит к вопросу о природе материи: что это такое на самом деле? Набор частиц, энергия, информация или что-то еще? А что касается энергии, то теория относительности указывает на смещение понятия энергии и даже массы, связанное с изменением скорости и положения объекта. Такие фундаментальные изменения в представлениях о пространстве, времени, материи и энергии вызывают новые философские вопросы и дебаты. Физики, философы, ученые в различных областях искусственного интеллекта, информатики и биологии обсуждают и исследуют эти вопросы. Например, они пытаются понять, как объединить квантовую механику и теорию относительности в единую теорию – так называемую "теорию всего". Изучение современной физики и ее влияния на научное мировоззрение стимулирует такие дебаты и помогает учащимся осознать, что существуют возможности для новых открытий [0].

Появление новых философских вопросов и дебаты, вызванные современной физикой, могут быть полезными для формирования критического мышления учащихся. Они анализируют и сравнивают различные концепции, аргументы и идеи, чтобы понять и оценить новые модели и теории. Такой аналитический подход развивает их способность мыслить логически, анализировать данные и делать обоснованные выводы. В итоге изучение современной физики способствует формированию у учащихся научного мышления и развитию их критических навыков. Она заставляет переосмысливать привычные представления о пространстве, времени, материи и энергии, а также стимулирует появление новых философских вопросов. Изучение современной физики позволяет развить у учащихся критическое мышление, подготовить их к будущим научным исследованиям и карьере в науке.

Одной из ключевых областей современной физики, способствующая формированию критического мышления, является квантовая механика. Эта область исследует микромир, где действуют особые законы и принципы. Часто квантовая механика противоречит нашему интуитивному представлению о мире, вызывая множество философских и логических вопросов. Учащимся предлагается проводить научные эксперименты, – например, дважды пропускать электроны через щель, чтобы наблюдать дифракцию и доказать, что электроны проявляют себя как волны и частицы одновременно. Это позволяет развить у учащихся аналитическое и логическое мышление, способность к абстрагированию и построению доказательств. Теория относительности – еще одна область современной физики, которая стимулирует развитие критического мышления. Она рассматривает взаимосвязь времени, пространства и гравитационных полей. Это приводит к появлению необычных парадоксов и противоречий, которые требуют от исследователей глубокого анализа и логических рассуждений. Один из примеров научных экспериментов, который помогает развить критическое мышление учащихся, – изучение эффекта близости к источнику гравитационного поля.

Учащимся предлагается провести серию экспериментов на измерение смещения показаний часов в разных гравитационных полях, чтобы проанализировать и объяснить полученные результаты. Это требует от учащихся глубокого понимания концепции относительности и способности к абстрагированию, а также развивает их логическое мышление и аналитические навыки. Физика элементарных частиц – еще одна область, которая предоставляет учащимся примеры научных экспериментов и задач для развития критического мышления. Учащимся можно предложить решение сложных задач, связанных с распадами частиц и реакциями при столкновениях, чтобы развить их умение анализировать сложные данные, выделять основную информацию и применять логические методы для получения результатов. Таким образом, научные эксперименты и задачи современной физики играют важную роль в формировании критического мышления учащихся, аналитического и логического мышления, способности к абстрагированию и построению доказательств. Развитие навыков помогает учащимся не только в изучении физики, но и будет полезно в их возможной научной карьере, а также в повседневной жизни, где критическое мышление – важный инструмент для принятия обоснованных решений.

Опыт привлечения школьников к участию в научных проектах и мероприятиях, которые демонстрируют практическое применение современной физики, помогает им осознать связь между учебным материалом и жизненной практикой. Одним из способов вовлечения учащихся в научные исследования является организация научных клубов или секций, где школьники могут самостоятельно проводить эксперименты, анализировать данные и делать соответствующие выводы. В такой среде учащиеся могут получить опыт работы с различными физическими явлениями и применить теоретические знания на практике. Например, ученики могут быть приглашены участвовать в конкурсе научных исследовательских работ, и представить свои уникальные проекты, основанные на современных физических концепциях. Подобные мероприятия помогают учащимся почувствовать себя участниками научного сообщества и оценить свои научные достижения. Кроме того, современные информационные технологии и средства коммуникации позволяют школьникам вступить в диалог с представителями научных сообществ и провести совместные исследования. Это могут быть совместные онлайн-эксперименты с помощью специальных интерактивных платформ либо сотрудничество с учеными через электронную почту или видеоконференции. Такие проекты не только помогают учащимся развивать навыки физического экспериментирования, но и открывают им новые горизонты и возможности саморазвития в научной сфере. Привлечение школьников к участию в научных проектах и мероприятиях, показывающих практическое применение достижений современной физики, способствует не только обогащению их знаний и развитию научного мышления, но и созданию условий для профориентации.

Любознательность и интерес к научным исследованиям, пробужденные в процессе участия в таких проектах, могут быть исходным моментом для выбора карьеры в науке или инженерии [3].

В связи со стремительным развитием нанотехнологий в значительной мере расширяются возможности для всех людей. Это может способствовать существенному сдвигу в общественной жизни. В настоящее время именно нанотехнологии являются центральной частью развития производства, так как находят применение во всех его сферах.

Динамичное развитие технологического прогресса и быстроразвивающиеся технологии свидетельствуют о переходе к точке технологической сингулярности в сфере информационных технологий. В период времени 2005 – 2030 г.г. [4].

Общество находится на рубеже глобальных перемен, имеющих двойственный характер, это происходит благодаря развитию и совершенствованию технологий. В наше время всего три ветви науки, могут способствовать сингулярности, что может привести к радикальным изменениям представлений о научной картине мира [5].

Изучение современной физики способствует формированию у школьников научного мировоззрения, необходимого во всех сферах жизни. Развивая понимание современных научных концепций и методов, учащиеся приобретают способность к самостоятельной научной работе и анализу новых данных. Это не только расширяет их знания о фундаментальных принципах природы, но и развивает их научные качества, критическое мышление и способности.

-
1. Griffiths D. J. Introduction to Quantum Mechanics (2nd ed.). Pearson Prentice Hall, 2005 – 213p.
 2. Greene B. . The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality. Vintage Books, 2004 – 292p.
 3. Penrose R. The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe. Vintage Books, 2004 – 392p.
 4. Feynman R. P., Leighton R. B., & Sands M. The Feynman Lectures on Physics // Mainly Mechanics, Radiation, and Heat, Basic Books, 2011 – 533p.
 5. Hawking, S. A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes. Bantam, 1988 – 385p.

УДК 372.853

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕЙМИФИКАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБУЧЕНИЯ СБОРУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А.С. Саприна

Благовещенский государственный педагогический университет (г. Благовещенск)

saprinaanna2001@mail.ru

В статье рассматривается применение геймификации в образовательном процессе с целью повышения эффективности выполнения лабораторных работ на Основном государственном экзамене (ОГЭ) по физике. В статье описываются различные методы геймификации при обучении физике, а также рассматривается использование комплекта для сборки электрических схем постоянного тока в виде пазлов. Особое внимание уделяется комплекту, этот инновационный подход позволяет учащимся не только изучать теоретические аспекты физики, но и применять свои знания на практике.

USING GAMIFICATION TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF LEARNING TO COLLECT DC ELECTRICAL CIRCUITS

A.S. Saprina

Blagoveshchensk State Pedagogical University (Blagoveshchensk)

saprinaanna2001@mail.ru

The article discusses the use of gamification in the educational process, in order to improve the efficiency of laboratory work on the Main State Exam (OGE) in physics. The article describes various methods of using gamification in teaching physics, and also discusses the use of a kit for assembling DC electrical circuits in the form of puzzles. Special attention is paid to the kit, this innovative approach allows students not only to study the theoretical aspects of physics, but also to directly apply their knowledge in practice.

DOI:10.22250/9785934934195_212

Трансформация образования невозможна без интеграции образовательного процесса. Одной из современных стратегий в области образования является геймификация – использование игровых технологий. Геймификация направлена на стимулирование мотивации и повышение эффективности обучения путем внедрения игровых элементов [1]. Основная цель геймификации при обучении физике заключается в увеличении мотивации и заинтересованности учащихся, а также в облегчении усвоения сложных физических концепций и теорий. Применение геймификации позволяет разрабатывать индивидуализированные и адаптивные образовательные программы, которые учитывают потребности и интересы каждого ученика [2].

В подготовке к Основному государственному экзамену (ОГЭ) по физике геймификация может использоваться в дополнение к традиционным методам обучения. Учащиеся имеют возможность применять свои знания на практике, искать альтернативные решения и развивать креативность, что способствует успешной сдаче ОГЭ по физике.

Рассмотрим методы использования геймификации в обучении физике.

1. Балльная система и достижения. Система заработка баллов и достижений, с помощью которой обучающиеся получают очки за выполнение заданий, правильные ответы или достижение определенных целей.

2. Виртуальные лаборатории. Создание виртуальных сред и лабораторий, где учащиеся могут экспериментировать и проводить виртуальные физические эксперименты, соревнуясь между собой в полученных результатах.

3. Командные проекты. Команды школьников выполняют задания по разработке и построению физического устройства или по выполнению эксперимента. Соревновательность между командами можно стимулировать посредством наград за самые эффективные и творческие решения.

4. Физические игры. Они способствуют лучшему пониманию физических явлений, законов и теорий. К примеру, головоломки, физическое лото и пазлы.

Использование пазлов представляет собой эффективный метод геймификации, который при достаточной проработке способен улучшить наглядность и эффективность изучения физики. Пазлы являются интересной и интерактивной активностью, привлекающей внимание и повышающей уровень вовлеченности в учебный процесс.

Цель данной статьи – анализ возможностей применения авторского комплекта для сборки электрических схем постоянного тока в виде пазлов с целью повышения эффективности обучения процессу сборки электрических схем.

В комплект для сборки электрических схем в рамках основного общего образования входят элементы пазла, выполненные из фанеры, на верхней плоскости которых нанесены условные обозначения отдельных элементов электрических цепей постоянного тока или токоведущего провода. Сбор электрической схемы в виде пазла осуществляется сопряжением элементов между собой, образуя при этом замкнутую электрическую схему. На каждом элементе нанесены изображения проводников, резисторов, лампочек и других элементов, необходимых для сборки схемы цепи постоянного тока.

ОГЭ по физике включает задания из различных разделов. Задания формируются на основе основных программных требований, которые содержат все необходимые темы, обязательные для изучения в рамках школьной программы. Наиболее трудными для обучающихся являются вопросы, связанные с магнетизмом и электромагнитным полем, с явлениями индукции и самоиндукции. В задании №17 ОГЭ по физике часто необходимо собрать электрическую цепь и выполнить измерения, что требует демонстрации теоретических знаний и умения работать с приборами, т. е. показать знания в комплексе

Таким образом, представленный комплект для сборки электрических схем постоянного тока в виде пазлов позволяет успешно интегрировать геймификацию в образовательный процесс. Особенно важно применение данного набора для повышения эффективности выполнения лабораторных работ по физике в рамках подготовки к Основному государственному экзамену (ОГЭ), где требуется собирать электрические цепи.

1. Гольцова Т. А. Геймификация как эффективная технология обучения иностранным языкам в условиях цифровизации образовательного процесса / Т. А. Гольцова, Е. А. Проценко // Отечественная и зарубежная педагогика. – 2020. – Т. 1, № 3(68). – С. 65-77.

2. Мерзлякова О. П. Геймификация образовательного процесса как инструмент развития мышления школьников // Ученые записки Орловского государственного университета. – 2021. – № 3(92). – С. 255-262.

УДК 372.853

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ПО ФИЗИКЕ

В.А. Смышляева¹, Л.В. Горбанева¹, Н.В. Горбанева²

¹Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

²Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена (г. Санкт-Петербург)

2019103557@pnu.edu.ru

В современных реалиях общества обучение в школе ведется для того, чтобы «научившийся» мог применять свои знания на практике. Поэтому важнейшим элементом обучения является практическое использование тех приборов и методов измерений, которые уже знакомы школьникам. Учителю стоит обратить внимание на использование домашних экспериментальных задач в обучении учащихся физике, ведь они развивают мышление и познавательную активность, способствуют более глубокому пониманию сущности явлений, выработке умения строить гипотезу и проверять ее на практике. В данной статье рассмотрены требования, предъявляемые к экспериментальным задачам, которые можно использовать в качестве домашнего задания, алгоритм действий учащихся при оформлении решения экспериментальных задач и примеры оформления отчетов выполнения таких заданий.

EXPERIMENTAL TASKS AT SCHOOL AND AT HOME

V.A. Smyshliaeva¹, L.V.Gorbaneva¹, N.V. Gorbaneva²

¹Pacific State University (Khabarovsk)

²A. I. Herzen Russian State Pedagogical University (St. Petersburg)

2019103557@pnu.edu.ru

In the modern realities of society, school education is conducted so that the "learned" can apply their knowledge in practice. Therefore, the most important element of training is the practical use of those instruments and measurement methods that have already been studied by schoolchildren. Therefore, the teacher should pay attention to the use of home experimental tasks in teaching physics students, because they develop thinking and cognitive activity, contribute to a deeper understanding of the essence of phenomena, develop the ability to build a hypothesis and test it in practice. This article discusses the requirements for experimental tasks that can be used as homework, the algorithm of students' actions in the design of solving experimental tasks and examples of the design of reports on the performance of such tasks.

DOI:10.22250/9785934934195_214

Образование в Российской Федерации регулируется Федеральным государственным образовательным стандартом основного и среднего общего образования (ФГОС ООО и ФГОС СОО), с 2022 г. в обновленной редакции [1]. В них нет кардинальных изменений, но внесены уточнения и развиты принципы, заложенные в прошлых стандартах. Образовательная деятельность по-прежнему основывается на системно-деятельностном подходе.

Особенностью системно-деятельностного подхода выступает положение о том, что главное место в образовательном процессе отводится активной, разносторонней и в максимальной степени самостоятельной познавательной деятельности учащихся. При обучении физике суть данного подхода состоит в том, что на любом занятии организуется деятельность учащихся по созданию и применению физических знаний. Чаще всего физические знания применяется в ходе решения физических задач [2].

Среди физических задач особое место занимают экспериментальные задачи, – постановка и решение которых органически связаны с экспериментом с различными измерениями, воспроизведением физических явлений, наблюдениями за физическими процессами, сборкой установок электрических цепей и т. п.

Наряду с демонстрационным экспериментом, фронтальными лабораторными работами и работами физического практикума, экспериментальные задачи составляют основу школьного физического эксперимента, играющего важную роль в познании физики школьниками [3]. Школьный физический эксперимент является не только одним из способов реализации принципа наглядности, способствует развитию творческих возможностей и самостоятельности, являющихся составляющими системно-деятельностного подхода. Кроме вышеперечисленного, экспериментальные задачи способствуют развитию интереса к изучению физики, развивают наблюдательность, учат более глубокому пониманию сущности явлений, выработке навыков строить гипотезу и проверять ее на практике [4].

Несмотря на значимость, экспериментальные задачи в школьной учебной практике в достаточной степени не востребованы, используются лишь эпизодически. Учителя при этом ссылаются на недостаток времени или оборудования. В нашем исследовании мы предлагаем использовать экспериментальные задачи в качестве домашнего задания.

Чтобы учащиеся успешно справились с решением экспериментальных задач по физике, необходимо грамотно организовать руководство решением таких задач.

Экспериментальные задачи, предлагаемые учителем в качестве домашнего задания, могут быть

как общими, одинаковыми для всех, так и индивидуальными. В любом случае учитель должен быть уверен, что для домашних опытов ученики найдут нужные приборы и предметы.

Чтобы легче было подобрать такие задания в нашем исследовании, мы поставили перед собой цель – из разнообразных источников найти экспериментальные задачи, которые можно решать дома. Более того, важным пунктом в нашей коллекции задач будет их классификация по разделам школьного курса, для удобства использования. При подборе таких задач мы делали основной упор на те, для решения которых не требуется специального оборудования, их можно выполнять в домашних условиях, используя подручные материалы [5, 6]. Такие задачи учащиеся смогут решать сами, если у них будет образец выполнения, заранее рассмотренный учителем на уроке.

При подборе заданий мы также опирались на требования, предъявляемые к домашним экспериментальным заданиям:

- безопасность при проведении;
- минимальные материальные затраты;
- простота выполнения;
- ценность в изучении и понимании физики;
- легкость последующего контроля учителем;
- наличие творческой окраски.

Также мы предлагаем определенный алгоритм действий при оформлении решения экспериментальных задач, с которым важно познакомить учащихся заранее, при решении экспериментальных задач на уроке.

Для решения экспериментальной задачи необходимо:

1. Составить и описать план решения задачи – что нужно делать и в какой последовательности.
2. Подобрать оборудование (либо указано в задаче, либо то, которое вы сами выбрали для решения данной задачи).
3. Выполнить все действия, указанные в плане, и произвести необходимые измерения. По возможности сделать фотографию или рисунок установки.
4. Записать все полученные измерения (прямые измерения) и вычисленные по ним искомые величины (косвенные измерения). Если проводятся измерения, то любой опыт, для исключения грубых ошибок, делается не менее четырех раз. Результаты оформить в виде таблицы.

5. Дать ответ на вопрос задания.

Кроме представленного алгоритма, обязательно показать решение и оформление экспериментальной задачи.

Приведем примеры решения экспериментальных заданий.

Задача 1. Определите скорость своего обычного передвижения пешком [7].

1. План решения.

Измерить длину своего обычного шага. Для этого достаточно сделать несколько шагов вдоль известной по длине территории (например, по своей комнате). Чтобы узнать длину своего шага, надо разделить расстояние на количество шагов.

Пройти расстояние длиной в 100 или 150 шагов и замерить затраченное на это движение время. По длине одного шага и количеству шагов определить пройденное расстояние.

Разделив это расстояние на затраченное время, рассчитать скорость своего перемещения.

2. Необходимое оборудование: измерительная рулетка, секундомер.

3. Длина комнаты $l = 2,8$ м. Количество шагов $n = 5$.

Расстояние, пройденное за 100 шагов, $S_2 = 56$ м.

Время, потраченное на это движение, $t = 60$ с.

4. Средняя длина шага $S_1 = \frac{l}{n} = \frac{2,8}{5} = 0,56$ м.

Скорость перемещения: $v = \frac{S_2}{t} = \frac{56}{60} = 0,93 \text{ м/с}$.

5. Скорость перемещения 0,93 м/с, или 3,4 км/ч.

Задача 2. Выявить зависимость давления газа от температуры.

1. Надуть небольшой шарик и завязать его. Облить шар холодной водой (температура примерно 5-10 °С). Через некоторое время вновь облить шарик водой, но на этот раз горячей (примерно 70 °С).

2. Миска, шарик, холодная и горячая вода.

3. Первоначально небольшой шарик, имеющий неправильную форму.

После того, как его облили холодной водой, он сдулся и стал еще меньше, чем до обливания. Его форма не изменилась.

После того, как его облили горячей водой, шар увеличился в объеме и приобрел правильную форму.

4. При снижении окружающей температуры молекулы ударяются о стенки тела реже, тем самым уменьшая объем тела. При повышении температуры вокруг тела молекулы начинают двигаться быстрее, ударять о стенки сосуда чаще и сильнее, тем самым движение увеличивается, давит на стенки шара и тот в свою очередь увеличивает свой объем.

Подводя итог, можно сделать вывод, что домашние экспериментальные задачи вызывают большой интерес у учащихся. Проводя наблюдения, за каким-либо физическим явлением, ставя дома эксперимент, который нужно объяснить, школьники учатся самостоятельно мыслить, развивают свои практические навыки. Выполнение экспериментальных задач играет особенно важную роль в подростковом возрасте, так как в этот период перестраивается характер учебной деятельности школьника. Подросток уже не всегда удовлетворяет то, что ответ на его вопрос есть в учебнике. У него появляется потребность получить этот ответ из жизненного опыта, наблюдений за окружающей действительностью, из результата собственных экспериментов. Экспериментальные задачи по физике учащиеся выполняют охотнее и с большим интересом, чем другие виды домашних заданий. Знания становятся более осмысленными, глубокими, повышается интерес к физике и технике. Умения наблюдать, экспериментировать, исследовать и конструировать становятся составной частью в подготовке учащихся к дальнейшему творческому труду в различных областях производства.

1. Приказ Минпросвещения России от 31.05.2021 № 287 (ред. от 18.07.2022) "Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта основного общего образования" (Зарегистрировано в Минюсте России 05.07.2021 N 64101) // URL: <https://xn--7sb3aehik9cm.xn--plai/wp-content/uploads/2023/01/fgos-ooo-povuj.pdf> (дата обращения: 26.03.2023).

2. Васильева Г. Н. Деятельностный подход в обучении физике, // Актуальные задачи педагогики : материалы III Междунар. науч. конф. (г. Чита, февраль 2013 г.). – Чита: – Молодой ученый, 2013. – С. 89-91. – URL: <https://moluch.ru/conf/ped/archive/67/3447/> (дата обращения: 28.06.2023)

3. Усова А. В. Практикум по решению физических задач / А. В. Усова, Н. Н. Тулькибаева. – М.: Просвещение, 1992.

4. Тарасенко Е. Ю. Роль экспериментальных задач в повышении качества знаний по физике // Педагогическое мастерство: материалы II Междунар. науч. конф. (г. Москва, декабрь 2012 г.). – М.: Буки-Веди, 2012. – С. 144-146. – URL: <https://moluch.ru/conf/ped/archive/65/3060/> (дата обращения 26.03.2023).

5. Андреева Ю. В. Экспериментальные задачи по физике в 7 классе // Инновационные педагогические технологии: материалы VIII Междунар. науч. конф. (г. Казань, май 2018 г.). – Казань: Молодой ученый, 2018. – С. 18-20. – URL: <https://moluch.ru/conf/ped/archive/278/14147/> (дата обращения 26.03.2023).

6. Ланге В. Н. Экспериментальные физические задачи на смекалку: учебное руководство. – М.: Наука. Глав. Ред. физико-математической литературы, 1985.

7. Шилов В.Ф. Домашние экспериментальные задания по физике. 7-9 классы. – М.: Школьная пресса, 2003.

ПРОБЛЕМА УЧЕБНОЙ МОТИВАЦИИ СТУДЕНТОВ В ЭПОХУ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.С. Стукалова

*Дальневосточный государственный медицинский университет (г. Хабаровск)
stukalovaanna@mail.ru*

Для выявления мотивов учебной деятельности было проведено анкетирование студентов, на основании которого определены ведущие компоненты учебной мотивации. Произведен анализ каждой компоненты с учетом особенностей когнитивного мышления и социально-психологического развития первокурсников - представителей цифрового поколения.

THE PROBLEM OF STUDENTS EDUCATIONAL MOTIVATION IN THE DIGITAL AGE

A. S. Stukalova

*Far Eastern State Medical University (Khabarovsk)
stukalovaanna@mail.ru*

To identify the motives of educational activity, a survey of students was conducted, on the basis of which the leading components of educational motivation were determined. The analysis of each component is made taking into account the peculiarities of cognitive thinking and socio-psychological development of first-year students - representatives of the digital generation.

DOI:10.22250/9785934934195_218

Социально-экономические и научно-технические преобразования в современных условиях повести развития Российской Федерации закономерно выдвигают потребности государства в молодых специалистах, способных к непрерывному повышению собственной квалификации и росту в профессиональной сфере. Способность будущего выпускника вуза к самостоятельной глубокой учебно-познавательной деятельности – залог его дальнейшей успешной самореализации, устойчивому личностному и социальному самоопределению. Постоянное углубление и приобретение знаний, непрерывное повышение собственной компетентности в различных областях стало более доступным в условиях цифровой цивилизации.

Интеграция современного образовательного процесса с цифровым пространством [1] породила новое педагогическое явление – цифровую дидактику, призванную сформировать методологическую и дидактическую концепцию в образовательной деятельности, с учетом особенностей развития познавательных процессов современного молодого поколения (преобладание клипового мышления над критическим, увеличение доли транзактивной памяти в познании, рост многозадачности в ущерб концентрации внимания и др.), повышения уровня самоорганизации в условиях цифрового общества. Задача цифровой дидактики – разрешить проблемный характер сложившегося феномена, когда динамичное развитие информационных технологий и цифровых средств обучения сочетают с традиционными формами организации образовательного процесса. Когнитивные особенности молодого поколения, трансформируемые социумом, современной технологичной культурой, побуждают педагогическое сообщество адаптировать существующие методы и искать новые педагогические решения.

Активное включение молодежи в глобальное информационное пространство не только формирует новый уровень отношения человека к информации, но и способствует появлению такого социального явления как «цифровая беспризорность», меняющего ценностные установки личности, способы коммуникации и процесс познания [2].

Познавательный процесс в психолого-педагогическом аспекте тесно связан с мотивационной сферой обучающихся. Учебная мотивация представляет собой совокупность компонентов, способствующих побуждению, поддержанию настойчивости и интереса к учебной деятельности, обладанию личностных установок на внутреннее интеллектуальное удовлетворение. В ходе движения субъекта по образовательной траектории основания и стимулы к обучению могут меняться, поэтому мотивация носит динамичный характер [3].

Анализ разновидностей мотивации, выявление учебных побуждений, оценка эффективных мотивационно ориентированных подходов к обучению в трудах отечественных и зарубежных педагогов подробно представлены в работе [4]. Авторы отмечают наличие разных уровней осознания мотивов собственной деятельности, выполняющих и побуждающую, и смыслообразующую функцию. Мотивы поощрения или избегания порицания (внешние стимулы) не всегда достаточны индивиду для полноценного функционирования его деятельности. Познавательная потребность, осознание необходимости в образовании для дальнейшей жизни, целеполагание и реализация профессиональных качеств как внутренних личностных мотивов заложены в успешной саморефлексии и самокоррекции обучающегося.

Внутренняя и внешняя мотивация сопряжены друг с другом: для устойчивого становления внутренней необходимы положительные внешние мотивы, формируемые в том числе педагогом в процессе обучения. Диагностика и анализ учебно-познавательной мотивации позволяют корректировать учебную деятельность студентов, повышать эффективность образовательного процесса и способствовать становлению будущего специалиста.

Для выявления мотивов учебной деятельности при изучении дисциплины «Физика» на кафедре физики, математики и информатики Дальневосточного государственного медицинского университета было проведено анкетирование студентов 1 курса специальности 33.05.01 «Фармация» (20 человек). Для сбора данных об учебной мотивации использовался опросник А.А. Реана и В.А. Якунина. При обработке результатов тестирования студентов был подсчитан средний показатель по каждой шкале опросника, затрагивающего следующие мотивы:

коммуникативные (относящиеся к потребностям в общении, межличностному и межгрупповому контакту);

мотивы избегания неудач (понимание возможных негативных факторов, которые могут последовать в случае невыполнения какой-либо деятельности в лабораторном практикуме);

социальные (стремление занять определенную позицию в коллективе, получить общественное одобрение);

мотивы престижа (сохранить или приумножить высокий социальный статус);

профессиональные (желание быть высококвалифицированным специалистом в своей области через);

учебно-познавательные (ориентация на овладение новыми знаниями, расширение кругозора в области естествознания, изучение и понимание физико-химических аспектов и механизмов работы приборов и материалов, стремление к самообразованию в учебной деятельности).

На рис. 1 приведены результаты анкетирования. Устойчиво высокими мотивами к обучению оказались профессиональные (3,9 балла) и социальные (3,8 балла) предпосылки: процесс приобретения специальности, становление профессионального самоопределения, стремление к социальному сближению характерны для учащегося медицинского вуза, целенаправленно выбравшего особую дорогу в профессии, и студенческого возраста в целом.

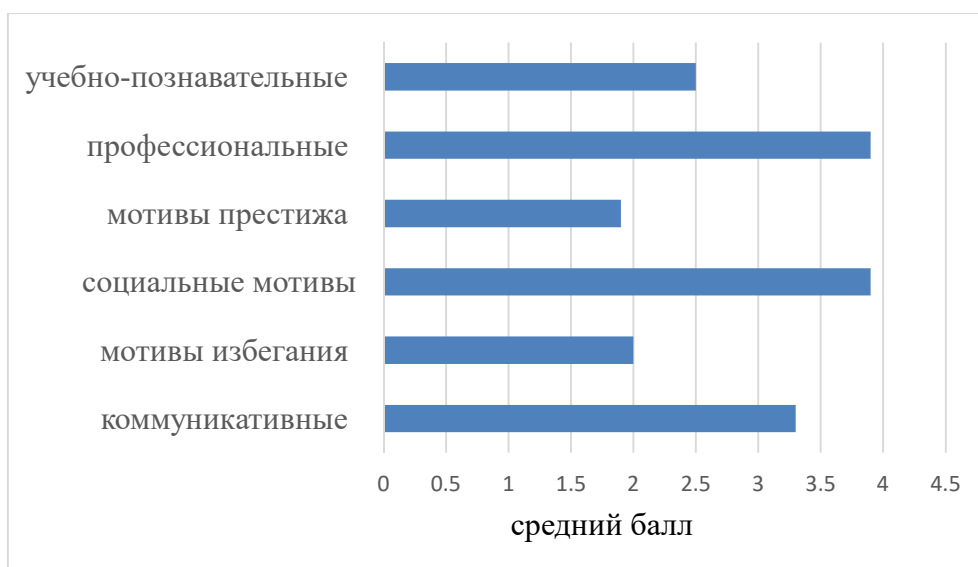


Рис. 1. Результаты диагностики учебной мотивации студентов.

Коммуникативная мотивация (3,3 балла), формирующаяся на основе базовых человеческих потребностей в общении, по-прежнему оказывает влияние на деятельность и поведение индивида, но на сегодня, по-видимому, претерпевает изменения. Для удовлетворения потребности в общении современным поколением часто привлекается цифровая коммуникация в социальных сетях, электронные мессенджеры выполняют роль психологически комфортной виртуальной реальности. Учебно-познавательные мотивы, по данным исследования, оказались сравнительно невысокими – 3,2 балла. Обучающиеся редко демонстрируют самостоятельный поиск способов решения учебной задачи, сопоставление и анализ теоретического содержания курса и практической его части. Преподаватели вуза давно отмечают недостаток самоконтроля и дефицит внимания, сосредоточенности студентов, быструю потерю интереса при переходе к новому действию, знанию.

Мотив избегания неудач связан, как правило, с определенной степенью тревожности поведения индивида в созданной им картине мира и появлению защитного поведения для предотвращения неуспеха как компенсаторного механизма. Низкий уровень сформированности этого типа мотивации (2,0 балла) иллюстрирует неглубокие эмоциональные переживания данного типа, принятие непредсказуемости итогов своей деятельности. Мотив престижа (1,9 балла) указывает на малую степень влияния в учебной мотивации таких факторов как высокое социальное благополучие, продуктивное выполнение деятельности. Учебная деятельность в этом случае характеризуется слабой саморегуляцией, импульсивностью и невысокой степенью ответственности. По-видимому, особенности когнитивной сферы цифрового поколения создают иллюзию собственной эффективности, чувство уверенности в своих взглядах вне зависимости от окружающих (родителей, друзей).

Результаты исследования показывают, что в мотивации студентов доминируют прежде всего профессиональные и социальные мотивы, что подтверждает значимость выбранной специальности в жизненной сфере интересов обучающихся. Коммуникативная составляющая несколько выпадает из лидирующих позиций, но продолжает оставаться значимым фактором в мотивации первокурсников. Учебно-познавательный мотив не является ведущей компонентой у обучающихся и свидетельствует о снижении интереса к образовательному процессу. Наименьшие значения по мотивам престижа и избегания, наблюдаемые в данном исследовании, могут являться маркерами глубоких преобразований в социально-психологических и личностных отношениях студентов.

Управление учебной мотивацией в условиях нарастающей доли цифровизации образования становится важной педагогической проблемой. Анализ учебной мотивации студентов при изучении

дисциплин естественнонаучного блока и поиск новых стимулов интереса к учебному процессу позволят эффективно использовать личностно-ориентированные технологии, отбирать средства обучения, направленные на развитие познавательной активности обучающихся.

-
1. Цыренова В. Б. Управление учебной мотивацией студентов в условиях цифровизации / В.Б. Цыренова, Н. Б. Лумбунова // Вестник Томского государственного университета. – 2021. – №470. – С. 203-209.
 2. Воронин М. Ю. Цифровая беспризорность: проблема глобального информационного общества // Вестник Московского государственного лингвистического университета. – Сер. «Образование и педагогические науки». – 2021. – №1 (838). – С. 257-263.
 3. Галкина Е. Н. Мотивация учебной деятельности в ВУЗе // Интернет-журнал «Мир науки». – 2017. – Том 5, №2 <http://mir-nauki.com/PDF/55PDMN217.pdf> (дата обращения: 08.06.2023).
 4. Гнездилова Л. Б. Учебная мотивация как основа эффективного образовательного процесса в вузе / Л. Б. Гнездилова, М. А. Гнездилов // Вестник Кемеровского государственного университета. Сер. «Гуманитарные и общественные науки». – 2017. – №2 (2) <https://cyberleninka.ru/article/n/uchebnaya-motivatsiya-kak-osnova-effektivnogo-obrazovatel'nogo-protsessa-v-vuze> (дата обращения: 19.06.2023).

УДК 372.853

ДИДАКТИЧЕСКИЕ ИГРЫ ПО ФИЗИКЕ

И.А. Чернечкин

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

Благовещенский государственный педагогический университет (г. Благовещенск)

cer_nyb@mail.ru

Представлен опыт применения дидактических задач по физике учителем в сельской школе. Описанные игры базируются на детских «дворовых» развлечениях, что обеспечивает знание правил учащимися.

DIDACTIC GAMES IN PHYSICS

I.A. Chernechkin

Amur State University (Blagoveshchensk)

Blagoveshchensk State Pedagogical University (Blagoveshchensk)

cer_nyb@mail.ru

The experience of using physical didactic tasks by a teacher in a rural school is presented. The described games are based on children's "yard" entertainment, which ensures that students know the rules.

DOI:10.22250/9785934934195_221

Согласно Указу Президента РФ «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года», Россия должна войти в число 10 стран, лидирующих по качеству образования. В связи с этим решается ряд вопросов: снижение нагрузки у учителей, укомплектованность школ оборудованием, сглаживание различий между школами в центре и на периферии [1].

Физика как учебный предмет изучается школьниками в возрасте 12-18 лет. Несмотря на период взросления и становления личности ученика, он все-таки остается ребёнком. Поэтому для повышения мотивации к изучаемому предмету учителя физики сельских школ зачастую должны строить учебный процесс с учетом преобладающего вида деятельности в сельской местности – в форме дидактической игры. При обучении физике необходимо придерживаться общенаучных принципов и подходов: систематичности и последовательности, самостоятельности и активности, сознательности и доступности, научности и связи теории с практикой. Дидактическая игра позволяет охватить все эти принципы сразу.

Игры, применяемые в образовательном процессе, можно охарактеризовать следующими признаками [2]: наличие общей цели у игрового коллектива, взаимодействие участников, моделирование определенных видов практической деятельности, создание условий, в которых протекает процесс, наличие ролей и их распределение между участниками, групповое или индивидуальное оценивание деятельности участников игры.

Выделяют шесть видов организационных форм проведения игр – индивидуальная, одиночная, парная, групповая, коллективная, массовая.

Рассмотрим примеры, применяемые мною в образовательном процессе по физике и основанные на хорошо известных детям играх.

1. «Правда или действие?». Суть игры заключается в том, что школьнику предоставляется право выбора между «правдой» (другой учащийся выдвигает утверждение, а первый должен с ним согласиться или опровергнуть, сказав верное) и «действием» (на демонстрационном столе находится оборудование с названием явления, ученику необходимо провести его демонстрацию). Такая игра подходит для повторительно-обобщающих уроков.

2. «Сломанный телефон». Учащиеся делятся на команды (если количество учеников в классе требует того) и встают в два ряда. Последнему стоящему в ряду учитель говорит физический термин. Задача школьников: шепотом передать по цепочке загаданное учителем понятие. Первый стоящий в ряду должен его озвучить. Игра проводится на этапе закрепления знаний: кроме оглашения термина, необходимо дать его определение.

3. «Горячая картошка». Эта игра напоминает волейбол, но вместо мяча используется воздушный шарик (для предотвращения травм). Ученики быстро перекидывают друг другу «горячую картошку», сопровождая удар по шару озвучиванием термина из изученного раздела.

4. «Чепуха на листочках». Ученики получают листы бумаги, с вопросами и отвечают на них. Один ученик дает ответ только на один вопрос, другие же учащиеся не должны видеть его ответа, поэтому каждый раз после ответа листик заворачивается. Написал – передай другому. Вопросы могут быть любыми: например, «кто?», «с кем?», «где?», «что делали?», «кто пришел?», «что спросил?», «что стали делать вместе?» и т.д. Последний отвечающий ученик разворачивает лист и зачитывает получившийся текст. После чего необходимо обсудить с учениками возможность происхождения того или иного события. Такая игра развивает общую эрудицию, межпредметные связи, хотя можно ограничить учащихся и одним разделом в рамках курса физики.

5. «Крокодил». Ученику дается карточка, на которой написаны термины. Задача заключается в том, чтобы объяснить классу понятие, не используя слов. В зависимости от сложности загаданных слов правила могут быть изменены: вместо одного ученика показывать термины могут два и более. Можно разрешить учащемуся использовать доску и мел для иллюстрации явления.

Апробация представленных разработок проводилась в разных параллелях. Так, в «Правду или действие» играли учащиеся 7-х классов на повторительно-обобщающем уроке по теме «Атмосферное давление», а «Сломанный телефон» заработал при закреплении раздела «Электрические явления» в 8

классе. «Горячая картошка» передавалась учениками всех классов при итоговом повторении курса физики. В «Чепуху на листочках» интереснее играть с учащимися старших классов, так как их кругозор более развит. В «Крокодила» играли в 9-м классе, после изучения раздела «Колебания и волны». Дидактические игры, применяемые мною, положительно сказались на коллективизме учащихся, позволяя выявить в классах некоторые скрытые проблемы.

1. Щербакова Е.В. Сельская малокомплектная школа: современное состояние, проблемы и перспективы развития //Теория и практика образования в современном мире (II): материалы междунар. заоч. науч. конф. – СПб.: Реноме, 2012.

2. Ланин И.Я. Формирование познавательных интересов учащихся на уроках физики. – М.: Просвещение.1995. – 128 с.

3. Лис Е.П. Применение игровых элементов на уроке физики//ФПВ. – 2009. – № 1. – С. 52-55.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. Теоретическая физика и вычислительная математика

Булах С.С., Чибисов А.Н. Квантовый вычислитель на основе структуры MoS_2	3
Ворона Д.Л., Верхотурова И.В. Моделирование процесса теплопередачи в экранно-вакуумной теплоизоляции средствами пакета COMSOL MultiPhysics.....	6
Демьяненко Е.В., Мазур А.И. Альтернативный метод решения уравнений HORSE.....	10
Ефименко М.К., Мазур И.А. Оценка энергии и ширины резонанса тринейтрона методом SS HORSE.....	14
Жуков Е.А., Панасюк С.Р. Изучение влияния акустических волн на генерацию магнитных волн при движении доменной границы в ортоферрите иттрия.....	18
Насыров В.В. Применение методов теории рассеяния для расчета потенциала ионизации трехэлектронной атомной системы.....	21
Прохоренко А.В., Гниденко А.А., Чибисов А.Н., Чибисова М.А. Анализ процессов взаимодействия атомов фосфора с силицидом.....	25
Белозеров А.О., Мазур А.И., Шарыпов Р.Э., Широков А.М. Экстраполяция вариационных расчетов с помощью искусственных нейронных сетей.....	29

Секция 2. Физика конденсированных сред

Барышников С.В. Линейные и нелинейные диэлектрические свойства композитов $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_x$	33
Верхотурова И.В., Нецименко В.В., Гужель Ю.А. Исследование спектров поглощения субмикророшков оксида цинка после воздействия электромагнитного излучения солнца.....	37
Верхотурова И.В., Нецименко В.В., Гужель Ю.А. Влияние электромагнитного излучения солнца на спектры поглощения микро- и нанорошков оксида цинка.....	40
Галкин Н.Г., Субботин Е.Ю., Галкин К.Н., Кропачев О.В., Доценко С.А., Горошко О.А., Аргунов Е.В. Структура, транспортные и термоэлектрические свойства ультратонких и тонких пленок моносилцида хрома на $\text{Si}(111)$	44
Дудин А.Н., Сердакова В.В., Неретина А.С. Оптические свойства и теплопроводность покрытий на основе микросфер диоксида кремния и натриевого жидкого стекла.....	50
Ливашивили А.И., Виноградова П.В., Моисеева О.В. Нелинейная динамика наночастиц в жидкофазной среде.....	53
Мерделелина Т.А., Стародубцева А.К. Электронные спектры углеродных модификаций в рамках модели Хаббарда.....	57
Милинский А.Ю., Барышников С.В., Стукова Е.В. Диэлектрические и тепловые свойства CsNO_3 , внедренного в мезопористые силикатные матрицы SBA-15.....	60
Морев Н.Г., Воронина А.А. Влияние форм-фактора на оптические свойства микрочастиц диоксида кремния.....	62
Алексеева О.А., Вахрушев С.Б., Горикова Ю.Е., Набережнов А.А., Сумников С.В., Яговкина М.А., Varatharaja Nallathambi, Lalith Kumar Bhaskar, Ravi Kumar Модификация структуры и свойств энтропийно-стабилизированных оксидов $(\text{MgNiCoCuZn})\text{O}$ при охлаждении.....	65
Новгородцев Н.С., Поляков А.В., Рябов И.А., Галкин К.Н., Галкин Н.Г., Фомин Д.В. Исследование методом спектроскопии комбинационного рассеяния света тонких пленок силицида магния на кремнии.....	69
Образцов К.В., Чибисов А.Н., Федоров А.С. Локализация дырочных состояний и распределение потенциала в сэндвич структуре $\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}$	72

<i>Павлов А.В., Стукова Е.В.</i> Исследования диэлектрических свойств нанокompозита на основе нитрата цезия, внедренного в пористые пленки оксида алюминия.....	75
<i>Писаренко Т.А., Злобина Ю.А.</i> Степень размерностного сжатия глобулярной структуры кварцевых стекол.....	79
<i>Писаренко Т.А., Фролов А.М., Крайнова Г.С.</i> Фракционная кинетика стратифицированной структуры спиннингованных лент Fe-Cr-V при послойном травлении.....	83
<i>Поляков А.В., Новгородцев Н.С., Галкин К.Н., Галкин Н.Г., Фомин Д.В., Рябов И.А.</i> Исследование оптических свойств и рельефа поверхности тонких пленок Mg_2Si на Si (111).....	87
<i>Резник М.В., Юрина В.Ю.</i> Моделирование прохождения протонов через полые и сплошные частицы структуры Al_2O_3/SiO_2	91
<i>Сахненко А.В., Стукова Е.В.</i> Исследование диэлектрических свойств композитов на основе иодида диизопропиламмония с включениями частиц оксида алюминия.....	93
<i>Сюй А.В., Новиков С.М., Целиков Г.И., Криштон В.В., Штарев Д.С., Арсенин А.В., Волков В.С.</i> Фотолюминесцентные свойства максенов $Mo_2TiC_2T_x$ и $Mo_2Ti_2C_3T_x$	97
<i>Трофимова Л.А.</i> Спектры поглощения системы поливинилового спирта-нитрат кадмия в области вакуумного ультрафиолета.....	103
<i>Филимонов А.В., Вахрушев С.Б., Политова Г.А.</i> Несоразмерная фаза в цирконате-титанате свинца.....	106
<i>Шеметов Д.А., Поляков А.В., Новгородцев Н.С., Галкин К.Н., Галкин Н.Г., Фомин Д.В.</i> Формирование тонкой пленки Mg_2Si на кремнии и исследование ее методом ИК-Фурье-спектроскопии.....	109
<i>Шолыгин И.О., Поляков А.В., Новгородцев Н.С., Галкин К.Н., Галкин Н.Г., Фомин Д.В.</i> Формирование низкоразмерного Mg_2Si на Si (111) методом реактивной эпитаксии и исследование его оптическими методами.....	113
<i>Яковлев А.А., Писаренко Т.А., Цуканов Д.А., Рыжкова М.В.</i> Индикация латерального фотовольтаического эффекта в структуре $Bi/n-Si(111)$	117

Секция 3. Материаловедение

<i>Дворник М.И., Михайленко Е.А., Власова Н.М., Кользун Д.А.</i> Переработка сплава Т5К10 электроэрозионным диспергированием отходов в различных жидкостях.....	121
<i>Воронков А.Е., Бузинов Р.А., Григорьев П.А.</i> Адгезия покрытий на основе микросфер диоксида кремния и эпоксидной смолы.....	125
<i>Пошарникова К.С., Драчёв К.А., Казарбин А.В.</i> Исследование влияния пластификатора на физико-механические свойства эпоксидной смолы.....	127
<i>Галкин Н.Г., Ян Д.Т., Галкин К.Н.</i> Усиление люминесцентных свойств пористого кремния после электроосаждения никеля из раствора дихлорида никеля.....	131
<i>Зайцев А.В.</i> Влияние концентрации анионов Cl^- , HCO_3^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-} на эффективность фотокаталитического окисления разноименно заряженных органических красителей.....	135
<i>Дворник М.И., Михайленко Е.А., Бурков А.А., Кользун Д.А.</i> Получение режущих пластин из твердого сплава Т5К10 с использованием пресс-форм, изготовленных аддитивным методом из PLA и ABS.....	139
<i>Одиноква О.А., Драчёв К.А.</i> Исследование механических и акустических свойств термопластов на основе полиэтилентерефталатгликоля.....	143
<i>Степанова К.В., Яковлева Н.М., Кокатев А.Н., Хомякова Е.А.</i> Защитно-декоративные серебряные держатели нанокompозитные покрытия на алюминии.....	147

Фролов А.М., Крайнова Г.С., Плотников В.С., Должиков С.В. Анизотропия морфологических неоднородностей лент $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{15}$ при поэтапном травлении.....	151
---	-----

Секция 4. Общая и техническая физика, оптика

Голых А.Е., Фомин Д.В. Расчет собственных частот колебаний поворотного основания для ИТПК.....	155
Дроботя Н.А., Верхотурова И.В. Изменение поглощенной дозы, вызванное декой стола фиксирующим устройством.....	159
Рассказов И.Ю., Горбунов А.В., Леоненко Н.А., Луговой В.А. Высокочастотный емкостный приемник акустических сигналов в конденсированных средах.....	163
Миклашевич С.В., Насыров В.В. Преимущества и особенности платформы ARDUINO.....	166
Касьянов И.А., Петкевич В.М., Пячин С.А. Влияние лазерного облучения на седиментацию частиц в жидких средах.....	168
Рябов И.А., Струков Д.О., Фомин Д. В. Автоматизация процесса коммутации источников питания образца с контролем времени переключения.....	172

Секция 5. Физическое образование (школьное и вузовское)

Аплачкина Е.Г., Рябцева Ю.А., Кадеева О.Е. Использование средств мультимедиа на уроках физики.....	175
Дейнекина Н.А., Кравченко О.В. Реализация метапредметных связей при изучении теоретической механики.....	178
Казарбин А.В., Драчёв К.А., Лунина Ю.В. Научно-исследовательская деятельность студентов как фактор социально-экономического развития региона (на примере тихоокеанского государственного университета).....	181
Касаткина М.Р., Горбанёва Л.В., Редько Е.А. Учебные задачи в школьном курсе физики и их решение через алгоритмы: исследование метапредметных связей информатики и физики.....	185
Копылова И.Б. Проблемы высшей школы и возможные пути и преодоления.....	188
Копылова И.Б. Выход из Болонской системы: итоги и перспективы.....	192
Кузнецов Д.И. Физики-политехники и советский атомный проект.....	195
Литовко И.В. Экспериментирование при решении зада как средство развития исследовательских умений учащихся на уроках физики.....	197
Масленникова Е.Н. Использование оборудования Центра образования «Точка Роста» на уроках физики.....	201
Мерделина Т.А. Физика элементарных частиц в школьном курсе.....	203
Римлянд В.И., Удалов К.Е. Виртуальная лабораторная работа по рентгеноструктурному анализу.....	205
Рябцева Ю.А., Аплачкина Е.Г., Кадеева О.Е. Современная физика и развитие научного мировоззрения учащихся.....	209
Саприна А.С. Использование геймификации для повышения эффективности обучения сбору электрических схем постоянного тока.....	212
Смышляева В.А., Горбанева Л.В., Горбанева Н.В. Домашние экспериментальные задачи по физике.....	214
Стукалова А.С. Проблема учебной мотивации студентов в эпоху цифровых технологий.....	218
Чернечкин И.А. Дидактические игры по физике.....	221

Научное издание

Адрес редакции и издателя:

675027, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21.

Адрес типографии:

675000, г. Благовещенск, ул. Мухина, 150а

Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование. Материалы XXI региональной научной конференции. 25 – 28 сентября 2023 г.

Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Амурский государственный университет». Подписано к печати 21.10.2023. Дата выхода 23.11.2023. Редактор – О.К. Мамонтова. Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 26,39. Тираж 200. Заказ 257. Бесплатно.

Отпечатано в типографии АмГУ.