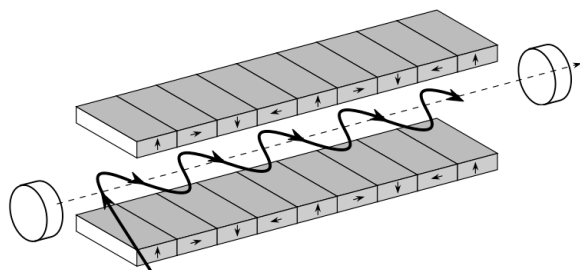




**ВЫСОКОТОЧНАЯ  
ДИАГНОСТИКА  
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ:  
ЛАБОРАТОРНЫЕ  
И СИНХРОТРОННЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ**

Воронежский государственный университет



# **ВЫСОКОТОЧНАЯ ДИАГНОСТИКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ: ЛАБОРАТОРНЫЕ И СИНХРОТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

*Сборник тезисов  
I Всероссийской молодежной конференции  
(г. Воронеж, 13—15 декабря 2021 г.)*

Под общей редакцией  
доктора физико-математических наук,  
доцента *С. Ю. Турищева*



Воронеж  
Издательско-полиграфический центр  
«Научная книга»  
2021

УДК 620.22(06)  
ББК 30.377я431  
В93

**В93      Высокоточная** диагностика функциональных материа-  
лов: лабораторные и синхротронные исследования : сборник тезисов I Всероссийской молодежной конференции (г. Воронеж, 13—15 декабря 2021 г.) / под общ. ред. С. Ю. Турищева. — Воронеж : Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2021. — 60 с. — ISBN 978-5-4446-1650-5. — Текст : непосредственный.

Сборник содержит тезисы устных докладов I Всероссийской молодежной конференции «Высокоточная диагностика функциональных материалов: лабораторные и синхротронные исследования» (г. Воронеж, 13—15 декабря 2021 г.). Конференция организована в рамках проекта «Распределенная инфраструктура высокоточных методов диагностики в ультрамягкой рентгеновской области синхротронного излучения для функциональных материалов и наноразмерных структур, включая био-нано-гибридные, для перспективных технологий и технических систем: от образовательных технологий через фундаментальные научные исследования к практическому применению» Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019—2027 годы.

Основную структуру конференции составили устные доклады молодых ученых по направлениям, связанным с развитием синхротронной диагностики материалов и наноразмерных структур для перспективных технологий и технических систем, включая принципиально новую природоподобную компонентную базу.

УДК 620.22(06)  
ББК 30.377я431

ISBN 978-5-4446-1650-5

© ВГУ, 2021  
© Изд. оформление.  
Издательско-полиграфический центр  
«Научная книга», 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Domashevskaya E. P. MODERN METHODS<br/>OF DIAGNOSTICS OF HETEROPHASE<br/>NANOSTRUCTURED MATERIALS . . . . .</b>                                                                                                                                                                                                                   | <b>8</b>  |
| <b>Турищев С. Ю., Чувенкова О. А., Парина Е. В.,<br/>Коюда Д. А., Манякин М. Д. КОМПЛЕМЕНТАРНЫЕ<br/>ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ<br/>МАТЕРИАЛОВ, ВКЛЮЧАЮЩИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ<br/>СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ<br/>В УЛЬТРАМЯГКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ . . . . .</b>                                                                       | <b>10</b> |
| <b>Какулия Ю. С., Турищев С. Ю., Чувенкова О. А.,<br/>Парина Е. В., Коюда Д. А. ИССЛЕДОВАНИЕ<br/>МОРФОЛОГИИ И СОСТАВА МАССИВОВ МЕДНЫХ<br/>НАНОЧАСТИЦ, ВЫРАЩЕННЫХ В ПОРАХ SiO<sub>2</sub> НА Si. . . . .</b>                                                                                                                          | <b>12</b> |
| <b>Барков К. А., Терехов В. А., Коновалов А. В.,<br/>Фоменко Ю. Л., Чукавин А. И., Ивков С. А.,<br/>Нестеров Д. Н., Домашевская Э. П., Курило Н. А.<br/>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИСЛОРОДА НА<br/>ФАЗОВЫЙ СОСТАВ НАНОКОМПОЗИТНЫХ<br/>ПЛЕНОК SIPOS . . . . .</b>                                                                          | <b>14</b> |
| <b>Петрова О. В., Сивков И. И., Некипелов С. В.,<br/>Ehrlich H. NEXAFS ИССЛЕДОВАНИЯ<br/>КАРБОНИЗИРОВАННОГО СПОНГИНОВОГО<br/>МАТРИКСА И КАТАЛИЗАТОРА НА ЕГО ОСНОВЕ . . . . .</b>                                                                                                                                                      | <b>16</b> |
| <b>Путинцев П. П., Гюппенен О. Д., МаксUTOва Д. Е.,<br/>Первушин Н. В., Гонгальский М. Б., Копейна Г. С.,<br/>Животовский Б., Осминкина Л. А. МЕТОД<br/>СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО<br/>РАССЕЯНИЯ СВЕТА ДЛЯ МОНИТОРИНГА<br/>ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ НАНОКРИСТАЛЛОВ<br/>КРЕМНИЯ В МОДЕЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ<br/>И ЖИВЫХ КЛЕТКАХ . . . . .</b> | <b>18</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Бакина К. А., Сивков Д. В., Петрова О. В.,<br/>Некипелов С. В., Скандаков Р. Н., Сивков В. Н.</b><br>ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ХИМИЧЕСКОГО<br>СОСТАВА НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ<br>УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК . . . . .                                                                                                                                                                              | 19 |
| <b>Бакиева О. Р.</b> АНАЛИЗ ЛОКАЛЬНОЙ<br>АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТОДОМ EXELFS . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 21 |
| <b>Солдатов А. В.</b> СИНТЕЗ И ДИАГНОСТИКА<br>ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ<br>НАНО-МИО-МЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                         | 22 |
| <b>Чукавин А. И., Бельтюков А. Н.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ<br>ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА В КОМПОЗИТНЫХ<br>СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО ОКСИДА<br>АЛЮМИНИЯ И НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА. . . . .                                                                                                                                                                                                                      | 23 |
| <b>Буйлов Н. С., Тригуб А. Л., Гуда А. А.,<br/>Домашевская Э. П.</b> XANES СПЕКТРЫ Fe И Co<br>ВБЛИЗИ К-КРАЕВ В ДВУХ МНС [(CoFeB)/C/SiO <sub>2</sub> ] <sub>200</sub><br>И [(CoFeB)(SiO <sub>2</sub> )/C] <sub>46</sub> . . . . .                                                                                                                                                                 | 25 |
| <b>Крюков Р. Н., Николичев Д. Е., Зубков С. Ю.,<br/>Дорохин М. В., Здоровейщев А. В., Калентьева И. Л.</b><br>ДИАГНОСТИКА СЛОЕВ CoPt, ОБЛАДАЮЩИХ<br>МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ . . . . .                                                                                                                                                                                                             | 27 |
| <b>Сивков В. Н.</b> АБСОРБЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ<br>С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАМЯГКОГО<br>РЕНТГЕНОВСКОГО И СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                             | 29 |
| <b>Бойков Н. И., Турищев С. Ю., Чувенкова О. А.,<br/>Захаров Н. Д., Анисимов А. В., Паринова Е. В.,<br/>Коюда Д. А., Манякин М. Д., Курганский С. И.,<br/>Макарова А., Смирнов Д., Овсянников Р.,<br/>Тонких А. А.</b> ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА,<br>АТОМНОГО И ЭЛЕКТРОННОГО СТРОЕНИЯ<br>ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ НАНОСЛОЕВ ОЛОВА НА<br>КРЕМНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ<br>СИНХРОТРОННЫХ МЕТОДОВ . . . . . | 30 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Гюппенен О. Д., Путинцев П. П., МаксUTOва Д. Е.,<br/> Первушин Н. В., Гонгальский М. Б.,<br/> Евстратова Я. В., Кудрявцев А. А.,<br/> Животовский Б., Осминкина Л. А. МЕТОД<br/> ФОТОЛЮМИНИСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ<br/> ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ<br/> НАНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ<br/> В МОДЕЛЬНЫХ ЖИДКОСТЯХ. . . . .</b> | <b>32</b> |
| <b>Домашевская Э. П., Ивков С. А., Середин П. В.,<br/> Ситников А. В. ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ<br/> И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ<br/> ГРАНУЛИРОВАННЫХ<br/> НАНОКОМПОЗИТОВ<br/> (Co45Fe45Zr10)X(MgF2)100-X . . . . .</b>                                                                                                             | <b>34</b> |
| <b>Радина В. Р., Курганский С. И.<br/> МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ<br/> ЭМИССИОННЫХ СПЕКТРОВ<br/> СОЕДИНЕНИЯ CuO. . . . .</b>                                                                                                                                                                                                      | <b>36</b> |
| <b>Валеев Р. Г., Елисеев А. А. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ<br/> ФАКТОРОВ НА СТЕПЕНЬ ОКИСЛЕННОСТИ<br/> ОКСИДА ГРАФЕНА: ОЦЕНКА<br/> МЕТОДОМ РФЭС . . . . .</b>                                                                                                                                                                                   | <b>38</b> |
| <b>Аверкиев И. К., Бакиева О. Р. АНАЛИЗ<br/> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ EELS СПЕКТРОВ,<br/> ПОЛУЧЕННЫХ В РЕЖИМЕ<br/> ОТРАЖЕНИЯ . . . . .</b>                                                                                                                                                                                                | <b>39</b> |
| <b>МаксUTOва Д. Е., Первушин Н. В., Гонгальский М. Б.,<br/> Евстратова Я. В., Кудрявцев А. А.,<br/> Животовский Б., Осминкина Л. А. ПОЛУЧЕНИЕ<br/> СТАБИЛЬНЫХ ВОДНЫХ СУСПЕНЗИЙ<br/> НАНОЧАСТИЦ КРЕМНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЕ<br/> ИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ<br/> И ЦИТОТОКСИЧНОСТИ. . . . .</b>                                         | <b>41</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Титова С. С., Коюда Д. А., Осминкина Л. А.,<br/>Паринова Е. В., Чувенкова О. А., Чумаков Р. Г.,<br/>Лебедев А. М., Канькин С. В., Чукавин А. И.,<br/>Бельтюков А. Н., Турищев С. Ю. ИЗУЧЕНИЕ<br/>ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НАНОЧАСТИЦ<br/>КРЕМНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ<br/>ПОЛУЧЕНИЯ И ИХ ИНТЕГРАЦИИ С КУЛЬТУРАМИ<br/>КЛЕТОК МЛЕКОПИТАЮЩИХ В ФОРМИРУЕМЫХ<br/>IN VITRO ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛАХ . . . . .</b> | <b>43</b> |
| <b>Картапова Т. С., Гильмутдинов Ф. З. ВЛИЯНИЕ<br/>ИОННО-ЛУЧЕВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ<br/>НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТОНКИХ УГЛЕРОДНЫХ<br/>ПЛЕНОК НА ИЗОЛИРУЮЩИХ ПОДЛОЖКАХ . . . . .</b>                                                                                                                                                                                                                                | <b>45</b> |
| <b>Sivakov Vladimir NANOSTRUCTURED SILICON: QUO VADIS? . . . .</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>46</b> |
| <b>Сивков Д. В., Некипелов С. В., Петрова О. В.,<br/>Виноградов А. С., Исаенко С. И., Макаров П. А.,<br/>Объедков А. М., Каверин Б. С., Вилков И. В.,<br/>Гусев С. А., Аборкин А. В., Скандаков Р. Н.,<br/>Сивков В. Н. NEXAFS И XPS ИССЛЕДОВАНИЯ<br/>СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА<br/>НА ПОВЕРХНОСТИ МУНТ. . . . .</b>                                                                           | <b>48</b> |
| <b>Беликов Е. А., Праслова Н. В., Паринова Е. В.,<br/>Коюда Д. А., Пислярук А. К., Чувенкова О. А.,<br/>Преображенская Е. В., Антипов С. С.,<br/>Требунских С. Ю., Сиваков В., Турищев С. Ю.<br/>ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ<br/>ОСОБЕННОСТЕЙ ГИБРИДНЫХ СТРУКТУР<br/>С НАНОЧАСТИЦАМИ ЖЕЛЕЗО-КИСЛОРОД НА<br/>ОСНОВЕ МОЛЕКУЛ ФЕРРИТИНА И КЛЕТОК E.COLI . . . . .</b>                             | <b>50</b> |
| <b>Ведь М. В., Дорохин М. В., Лесников В. П., Кудрин А. В.<br/>ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗБАВЛЕННОГО МАГНИТНОГО<br/>ПОЛУПРОВОДНИКА (IN, FE)SB КАК ИНЖЕКТОРА<br/>СПИНОВОГО СВЕТОДИОДА . . . . .</b>                                                                                                                                                                                                                   | <b>52</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Чумаков Р. Г., Лебедев А. М., Станкевич В. Г.</b><br>СПЕКТРОСКОПИЯ НА КУРЧАТОВСКОМ<br>ИСТОЧНИКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ . . . . .                                                                                                                                                 | 54 |
| <b>Пелагина А. К., Паринава Е. В., Коюда Д. А., Сиваков В.,<br/>Овсянников Р., Смирнов Д., Макарова А.,<br/>Yermukhamed D., Ming T., Турищев С. Ю.</b><br>ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ И ОБЪЕМНОЙ<br>ЧАСТИ МАССИВОВ КРЕМНИЕВЫХ НАНОНИТЕЙ<br>СИНХРОТРОННЫМИ МЕТОДАМИ XANES И XPS . . . . . | 55 |
| <b>Хаметова Э. Ф., Бакиева О. Р.</b> РАЗРАБОТКА МЕТОДА<br>АНАЛИЗА ПРОТЯЖЕННОЙ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ<br>В СИЛЬНО ОГРАНИЧЕННОМ ДИАПАЗОНЕ<br>НА ПРИМЕРЕ TiO <sub>2</sub> . . . . .                                                                                                            | 57 |
| <b>Скандаков Р. Н., Некипелов С. В., Петрова О. В.,<br/>Сивков В. Н., Сивков Д. В.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ<br>ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ФУЛЛЕРИТА<br>C <sub>60</sub> В ОБЛАСТИ NEXAFS C1S-КРАЯ ПОГЛОЩЕНИЯ . . . . .                                                                                 | 58 |

## MODERN METHODS OF DIAGNOSTICS OF HETEROPHASE NANOSTRUCTURED MATERIALS

**E. P. Domashevskaya** 

*Voronezh State University, 394018, Voronezh*  
*fit@phys.vsu.ru* , tel.: +7 (473) 220-83-63

Progress in the creation of nanomaterials and nanostructures with various functional properties and a wide range of their applicability in technical fields consists not only of achievements in the development of technological processes that allow obtaining low-dimensional materials with a given structure at the atomic level with high accuracy, but also in the development of scientific approaches to complex methods of diagnostics and characterization of parameters of such structures with the installation for subsequent implementation of the results obtained in the production process. This approach to the diagnosis of modern materials, nanostructures and nanocomposites metal-dielectric/semiconductor has been demonstrated in recent decades by the scientific school «Atomic and Electronic Structure of Solids and nanostructures» in Voronezh State University using the following effective methods of substance diagnostics at the atomic level as the main ones.

Methods of X-ray diffraction (XRD) and X-ray reflectometry (XRR) at small angles are used to determine the phase state of multicomponent materials and multilayer nanostructures (MNS), the thickness of the bilayers of periodic superstructures of MNS and the quality of their interfaces [1, 2].

The method of ultra-soft X-ray emission spectroscopy (USXES), due to the unique property of local sensitivity to the chemical bond of the element, makes it possible to consistently study the surface layers of the sample from 10 to 150 nm without destroying it by changing the accelerating high voltage at the anode of the X-ray tube from 1 to 6 kV with the test sample in the X-ray spectrometer-monochromator RSM-500 [3, 4].

For information about interatomic interactions in metal-composite layers and dielectric layers are used infrared (IR) and Raman spectroscopy [5].

For information about the nature of chemical bonds of metal clusters with atoms entourage in the composite layers and at the interfaces of the metal layer/

interlayer are used X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) with layer-by-layer removal of nanolayers by ion bombardment [6].

To obtain information about the interaction of metallic clusters Co, CoFeB, CoFeZr at interphase boundaries in composite layers and at interfaces, the local electronic structure in the conduction band of metals is investigated by registering the fine structure of the X-ray absorption of metals Co and Fe near the main X-ray absorption edges XANES (X-ray absorption near edge structure) [6].

To obtain information about the near and middle order surrounded by metal clusters, coordination numbers, Co, and Fe interatomic distances is using the synchrotron XAS by studies of the extended fine structure in K-edges X-ray absorption Co and Fe EXAFS (Extending X-ray absorption fine structure) [6].

To obtain information about the magnetic properties of the composites and MNS is using the field and concentration dependences of the Equatorial Kerr effect (TKE) [7].

*The work was partially carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the state assignment to universities in the field of scientific activity for 2020—2022, project No. FZGU-2020-0036.*

[1]. Yurakov Yu. A., Peshkov Ya. A., Ivkov S. A., Kannykin S. V., Sitnikov A. V., Domashevskaya E. P. / The state of individual layers and interfaces in multilayer nanostructures  $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{ZnO/C}]_{46}$  // Surface and Interface Analysis. 2020. V. 53. № 2. P. 6908—6916.

[2]. Domashevskaya E. P., Buylov N. S., Terekhov V. A., Barkov K. A., Sitnikov A. V. / Electronic structure and phase composition of dielectric interlayers in a multilayer amorphous nanostructure  $[(\text{CoFeB})_{60}\text{C}_{40}/\text{SiO}_2]_{200}$  // FTT. 2017. Vol. 59. No. 1. pp. 161—166.

[3]. Domashevskaya E. P., Buylov N. S., Terekhov V. A., Barkov K. A., Sitnikov A. V., Kalinin Yu. E. / Electronic structure and phase composition of silicon oxide in composite metal-containing layers of multilayer amorphous nanostructure  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{C}]_{46}$  with carbon interlayers // Inorganic materials. — 2017. Vol. 53. No. 9. pp. 950—956.

[4]. Domashevskaya E. P., Terekhov V. A., Parinova E. V., Sinelnikov A. A., Kharin A. N., Prizhimov A. S., Turishchev S. Yu. / Formation of Si nanocrystals in LP CVD semi-insulating polycrystalline silicon films // Materials Science and Engineering: B. 2020. V. 259. P. 114575—114581.

[5]. Domashevskaya E. P., Buylov N. S., Lukin A. N., Sitnikov A. V. / Research interatomic interaction in multilayer nanostructures  $[(\text{CoFeB})_{60}\text{C}_{40}/\text{SiO}_2]_{200}$  and  $[(\text{CoFeB})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{C}]_{46}$  with composite metal-containing layers by IR spectroscopy//Inorganic materials. 2018. Vol. 54. No. 2. pp. 153—159.

[6]. Domashevskaya E. P., Builov N. S., Ivkov S. A., Guda A. A., Chukavin A. I., Trigub A. L./XPS and XAS investigations of multilayer nanostructures based on the amorphous CoFeB alloy// Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. — 2020. — V. 243. — P. 146979

[7]. Ganshina E. A., Garshin V. V., Buylov N. S., Zubar N. N., Sitnikov A. V., Domashevskaya E. P. /Investigation of magnetic properties of amorphous multilayer nanostructures  $[(\text{CoFeB})_{60}\text{C}_{40}/\text{SiO}_2]_{200}$  and  $[(\text{CoFeB})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{C}]_{46}$  using the equatorial Kerr effect//Condensed media and interphase boundaries. — 2020. — Vol.22, No. 4. pp. 438—445.

УДК 538.91

## КОМПЛЕМЕНТАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ВКЛЮЧАЮЩИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В УЛЬТРАМЯГКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ

**С. Ю. Турищев<sup>✉</sup>, О. А. Чувенкова, Е. В. Паринава,  
Д. А. Коюда, М. Д. Манякин<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия  
tsu@phys.vsu.ru<sup>✉</sup>, тел.: +7 (473) 240-66-53*

Разработки в области функциональных материалов и структур уже давно невозможно представить без высокоточной диагностики, позволяющей восстановить фундаментальные свойства изучаемой системы на атомном или субатомном уровне. Методы электронной микроскопии, такие как просвечивающая и растровая электронная микроскопия являются обязательными для диагностики материалов и структур пониженной размерности. Важными являются и методы, чувствительные к структуре вещества, такие как дифракция рентгеновских лучей или электронов.

Применение синхротронного излучения чрезвычайно высокой интенсивности, коллимированности и варибельности длины волны в современных приложениях методов рентгеновской и электронной спектроскопии и микроскопии крайне востребовано. В самом деле, такие взаимодополняющие друг друга методы, как спектроскопия рентгеновского поглощения и фотоэлектронная спектроскопия обладают высокой чувствительностью к локальному атомному окружению, химической связи даже в случае малых количеств изучаемого материала. Это безусловно важно для понимания фундаментальных причин проявления свойств изучаемых структур, оптимизации их функционального назначения и отработке технологических аспектов формирования.

С точки зрения диапазона энергий квантов (длин волн) ультрамягкое рентгеновское излучение крайне важно для материалов, особые свойства которых продиктованы или находятся в прямой зависимости от чрезвычайно развитой поверхности — материалов нанометрового диапазона и структур на их основе. Использование синхротронного излучения в этом диапазоне привело к усовершенствованию и существенному расширению возможностей методов рентгеноэлектронной спектроскопии, в том числе в связке с методами, реализуемыми в лабораторных условиях.

Будут приведены примеры совместного использования синхротронных и лабораторных методов рентгеноэлектронной спектроскопии и их расширений для диагностики функциональных наноматериалов включая бионаногибридные.

Доклад будет представлен в рамках реализации гранта по соглашению 15.СИН.21.0005 Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019—2027 годы.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ И СОСТАВА МАССИВОВ МЕДНЫХ НАНОЧАСТИЦ, ВЫРАЩЕННЫХ В ПОРАХ $\text{SiO}_2$ НА Si

Ю. С. Какулия<sup>1✉</sup>, С. Ю. Турищев<sup>1</sup>, О. А. Чувенкова<sup>1</sup>,  
Е. В. Парина<sup>1</sup>, Д. А. Коюда<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия  
*kakuliia@phys.vsu.ru*<sup>✉</sup>, тел.: +7 (473) 240-66-53

В работе представлены результаты диагностики массивов медных наночастиц, выращенных в порах  $\text{SiO}_2$  на Si. Такие структуры являются плазмонными материалами и, таким образом, могут рассматриваться как перспективные структуры, активного элемента в сенсорах, создаваемых на основе эффекта поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния света. Метод поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния света, при которой молекулярно-специфический сигнал комбинационного рассеивания усиливается на несколько порядков величины, привлекает большое внимание в биоаналитике, медицине и экологии. При этом ключевым для создания сенсорных устройств на основе таких наноматериалов является понимание физико-химических и структурных свойств, в том числе развитой поверхности. Поэтому необходимо детальное изучение морфологии, состава, структуры наряду с атомным и электронным строением материалов, образующихся при формировании наночастиц меди в матрицах  $\text{SiO}_2$  на Si.

Для получения пористого слоя  $\text{SiO}_2$  на кремнии использовалась технология травления ионно-пролетных треков. Далее в сформированных субмикронных порах происходил рост наночастиц посредством разложения солей меди.

Методом растровой электронной микроскопии показано, что, изменяя условия формирования, можно контролировать степень заполнения пор наночастицами меди, которые предположительно являются нанокристаллами. Согласно данным растровой электронной микроскопии средний (преимущественный) размер наночастиц в первой группе от ~30 нм

до ~65 нм соответственно заполнению пор, а во второй от ~50 до ~100 нм, соответственно заполнению пор.

Методом дифракции рентгеновских лучей показано упорядочение в структурной сетке атомов меди, составляющих наночастицы в порах. А также были показаны области когерентного рассеяния для образца первой серии с переполнением поры и образованием глобул, и для образцов второй серии с переполнением поры и образованием глобул и покрытием матрицы с образованием глобул.

Анализ  $\text{Cu L}_{2,3}$  синхротронных спектров ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения (XANES) для описанных выше образцов позволил отметить, что для всех сформированных структур наблюдается изменение степени окисления, вплоть до формирования оксида, близкого к естественному, для случая второй серии образцов и полного заполнения поры или переполнения объема поры. В образцах первой серии с неполным покрытием дна поры, частичным заполнением поры, полным заполнением поры, а также в образцах второй серии с неполным покрытием и частичным заполнением поры наблюдается преобладание оксида меди (I) —  $\text{Cu}_2\text{O}$ , а для остальных образцов наблюдается два оксида:  $\text{Cu}_2\text{O}$  и  $\text{CuO}$ . Это можно объяснить различием в размерах кристаллов двух серий образцов, на поверхности которых происходит взаимодействие с кислородом.

В совокупности полученные результаты говорят о том, что используемый подход в формировании структур с наночастицами меди позволяет эффективно получать компактные и размерно-селективные массивы металлических медных наночастиц в контролируемом количестве, заполняющих субмикронные поры диэлектрика на полупроводниковой подложке.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИСЛОРОДА НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК SIPOS

**К. А. Барков<sup>1</sup>✉, В. А. Терехов<sup>1</sup>, А. В. Коновалов<sup>1</sup>,  
Ю. Л. Фоменко<sup>1</sup>, А. И. Чукавин<sup>2</sup>, С. А. Ивков<sup>1</sup>,  
Д. Н. Нестеров<sup>1</sup>, Э. П. Домашевская<sup>1</sup>, Н. А. Курило<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия*

<sup>2</sup>*Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,  
г. Ижевск, Россия  
barkov@phys.vsu.ru<sup>✉</sup>, тел.: +7 (473) 220-83-63*

Использование пленок полуизолирующего кремния, легированного кислородом, типа SIPOS (Semi-Insulating Polycrystalline Oxygen-doped Silicon) в качестве пассивирующих покрытий полупроводниковых приборов и ИС позволяет повысить пробивные напряжения высоковольтных приборов, так как в них отсутствует, характерный для пленок SiO<sub>2</sub>, эффект захвата носителей заряда, образующихся в процессе лавинного пробоя [1]. Легирование кислородом происходит непосредственно в процессе осаждения (CVD) слоев SIPOS, путем добавления в технологический реактор N<sub>2</sub>O, что позволяет варьировать в широких пределах концентрацию кислорода в получаемых пленках. Однако современная информация о влиянии N<sub>2</sub>O на фазовый состав пленок SIPOS противоречива [2].

Исследуемые пленки SIPOS были получены методом химического осаждения из газовой фазы моносилана SiH<sub>4</sub> с добавлением закиси азота N<sub>2</sub>O при пониженном давлении (P = 0.15 мм рт. ст.) и температуре 635 °C. В процессе формирования пленок соотношение объемного потока закиси азота к потоку моносилана  $\gamma = \text{N}_2\text{O}/\text{SiH}_4$  составляло 0 и 0.1. Толщина полученных слоев SIPOS составляла ~350 нм [3]. Фазовый состав пленок SIPOS определялся стандартными методами рентгеновской дифракции и ПЭМ, а также методом ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (УМРЭС). Рентгеновские эмиссионные Si L<sub>2,3</sub>-спектры отражают плотность электронных состояний в валентной зоне (ВЗ) кремния, которая крайне чувствительна к образованию химической связи, на-

лично и отсутствию дальнего порядка, поэтому данный метод позволяет устанавливать наличие и соотношение аморфных фаз  $\alpha$ -Si и  $\alpha$ -SiO<sub>x</sub>, а также кристаллического  $c$ -Si.

Результаты комплексных исследований показывают, что пленки SIPOS ( $\gamma = 0$ ), полученные методом химического осаждения из газовой фазы SiH<sub>4</sub> без добавления закиси азота N<sub>2</sub>O, представляют слои поликристаллического кремния со средним размером кристаллитов Si  $\sim 50$  нм. Добавление в технологический реактор закиси азота в соотношении  $\gamma = \text{N}_2\text{O}/\text{SiH}_4 = 0.1$  приводит к формированию композитной пленки аморфного кремния с некоторым содержанием субоксидов кремния SiO<sub>x</sub> ( $\sim 20\%$ ) и включениями нанокристаллов кремния со средним размером  $\sim 5$  нм, однако основной является фаза аморфного кремния. Это особенно хорошо видно из полученных методом УМРЭС рентгеновских эмиссионных Si  $L_{2,3}$ -спектров SIPOS с  $\gamma = 0$  и  $\gamma = 0.1$ , где в спектре пленки SIPOS с  $\gamma = 0$  имеются два максимума плотности электронных состояний при  $E = 89.5$  эВ и  $E = 92$  эВ, характерные для кристаллического кремния  $c$ -Si. В то же время плотность электронных состояний валентной зоны пленки SIPOS с  $\gamma = 0.1$  сильно размывается и является завышенной у потолка ВЗ (по сравнению с  $c$ -Si), что свидетельствует о преобладании в данной пленке фазы аморфного кремния. Это хорошо видно при сопоставлении рентгеновских эмиссионных Si  $L_{2,3}$ -спектров пленки SIPOS с  $\gamma = 0.1$  и аморфного кремния  $\alpha$ -Si.

1. T. Matsushita et. al., IEEE Transactions on electron devices, 1976, ED-23,826.

2. S. Schamm et. al., Materials Science and Engineering B, 2004, B107, 58.

3. Э. П. Домашевская и др., Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2015, 12, 24.

## НEXAFS ИССЛЕДОВАНИЯ КАРБОНИЗИРОВАННОГО СПОНГИНОВОГО МАТРИКСА И КАТАЛИЗАТОРА НА ЕГО ОСНОВЕ

**О. В. Петрова<sup>1,2</sup>, И. И. Сивков<sup>2</sup>, С. В. Некипелов<sup>1,2</sup>, Н. Ehrlich<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ФИЦКоми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

<sup>2</sup>СГУ им. Питирима Сорокина, Сыктывкар, Россия

<sup>3</sup>TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany

teiou@mail.ru<sup>✉</sup>, тел.: +7 (909) 122-52-01

Развитие технологий синтеза и модификации катализаторов на основе наноструктурированных углеродных материалов является актуальной задачей современного материаловедения. Наноструктурированные углеродные материалы, такие как многостенные углеродные нанотрубки характеризуются химической инертностью, высокой проводимостью, термостойкостью, твердостью и прочностью. Это, в сочетании с большой эффективной поверхностью, делает их перспективным материалом для использования в качестве основы для создания катализаторов химических процессов. С другой стороны углеродные нанотрубки обладают ограниченными размерами, не имеют объемной структуры, а их синтез требуют сложного высокотехнологичного оборудования и многоступенчатого процесса очистки. Поэтому в настоящее время, существует проблема поиска новых материалов, используемых в качестве основы для создания катализаторов, обладающих химической и термической устойчивостью, большой эффективной поверхностью, возможностью производства в сантиметровых масштабах из природного возобновляемого сырья, получение которых не связано с большими техническими сложностями и финансовыми затратами [1—3].

В работе представлены технология получения углеродных наноструктурированных материалов путем высокотемпературной карбонизации спонгинового матрикса морских губок и результаты исследования полученного материала и композита на его основе методами ультрамягкой рентгеновской спектроскопии (NEXAFS и XPS) [4].

Синтез исследуемых образцов и их предварительная характеристика проводились научной группой проф. Г. Эрлиха (Институт электроники и сенсорных материалов Технического университета «Фрайбергская горная академия»). NEXAFS и XPS исследования были выполнены с использованием синхротронного излучения Русско-немецкого канала выхода и монохроматизации излучения синхротронного центра BESSY II (г. Берлин, Германия) путем регистрации полного электронного выхода (TEY).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента РФ (МК-3796.2021.1.2), РФФИ и Республики Коми в рамках научных проектов № 19-32-60018 и 20-42-110002 р-а и Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения № 075-15-2021-1351 в части исследований NEXAFS-спектроскопии.*

1. M. Lu, Y. Qian, C. Yang, et al. // Nano Energy 32, 382—388 (2017);
2. Q. Wang, M. Jian, C. Wang, Y. Zhang //Adv. Funct. Mater. 27, 1605657 (2017);
3. X. Hu, P. Cebe, A. S. Weiss et al. // Materialstoday, 15(5), 208—215 (2012);
4. A. P. Petrenko et. al // Science Advances 5(10), 2805 (2019).

## МЕТОД СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ НАНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ В МОДЕЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ И ЖИВЫХ КЛЕТКАХ

П. П. Путинцев<sup>1✉</sup>, О. Д. Гюппенен<sup>1</sup>, Д. Е. МаксUTOва<sup>1</sup>,  
Н. В. Первушин<sup>1</sup>, М. Б. Гонгальский<sup>1</sup>, Г. С. Копенина<sup>2</sup>,  
Б. Животовский<sup>2</sup>, Л. А. Осминкина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Факультет фундаментальной медицины, Москва, Россия  
putintcev.pp19@physics.msu.ru<sup>✉</sup>, тел.: +7 (916) 436-64-50

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) является информативной экспериментальной методикой исследования свойств как твердотельных, так и биологических объектов. Метод КРС может использоваться для изучения квантово-размерных эффектов в кремниевых нанокристаллах, в том числе при их растворении [1]. В настоящей работе методом спектроскопии КРС изучены процессы растворения нанокристаллов кремния при их инкубации в фосфатном солевом буфере (PBS) 37 °С и в клетках рака молочной железы MCF-7.

Кремниевые наночастицы (КНЧ) были получены путем ультразвуковой диспергации в воде пористых или непористых нанонитей кремния, полученных методом металл-стимулированного химического травления кремния с различными уровнями легирования [2]. Оба типа КНЧ демонстрируют низкую цитотоксичность *in vitro* в отношении клеток MCF-7 до 800 мкг/мл [3].

По снижению интенсивности и низкочастотному сдвигу в спектрах КРС КНЧ, можно судить об уменьшении размеров нанокристаллов кремния при их инкубации в фосфатном солевом буфере (PBS) 37 °С и в клетках рака молочной железы MCF-7.

Показано, что можно регулировать скорость биodeградации наночастиц, изменяя размер их нанокристаллов.

---

© Путинцев П. П., Гюппенен О. Д., МаксUTOва Д. Е., Первушин Н. В., Гонгальский М. Б., Копенина Г. С., Б. Животовский, Осминкина Л. А., 2021

Результаты работы будут использованы для разработки интеллектуальных систем доставки лекарств и разработки новых подходов в тераностике заболеваний.

*Работа выполнена под руководством с. н. с. Осминкиной Л. А. и н. с. Гонгальского М. Б. при поддержке гранта РФФ № 19-72-10131.*

1. Гонгальский М. Б., Цурикова У. А., Гончар К. А., Гвинджилия Г. З., Осминкина Л. А. // Физика и техника полупроводников. 2021. № 1. С. 43.
2. *Ciro Chiappini*. MACE Silicon Nanostructures // Handbook of Porous Silicon: Second Edition. Springer International Publishing. 2018. P. 247—267
3. *Gongalsky M. B., Pervushin N. V., Maksutova D. E., Tsurikova U. A., Putintsev P. P., Gyuppenen O. D., Evstratova Y. V., Shalygina O. A., Kopeina G. S., Kudryavtsev A. A., Boris Zhivotovsky, Osminkina L. A.* Optical Monitoring of the Biodegradation of Porous and Solid Silicon Nanoparticles // Nanomaterials 2021, 11(9), 2167.

УДК 538.91

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

**К. А. Бакина<sup>1,2□</sup>, Д. В. Сивков<sup>1,3</sup>, О. В. Петрова<sup>1,2</sup>,  
С. В. Некипелов<sup>1,2</sup>, Р. Н. Скандаков<sup>1</sup>, В. Н. Сивков<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

<sup>2</sup>СГУ им. Питирима Сорокина, Сыктывкар, Россия

<sup>3</sup>СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

*tylxen@gmail.com<sup>□</sup>, тел.: +7 (8212) 39-14-51*

Открытие многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) и разработка технологий их получения в макроскопических количествах [1—2] положили начало систематических исследований с целью возможного использования нанотрубок в различных приложениях. Одно из важных направлений использования МУНТ, основанное на их высокой механиче-

ской прочности, большой удельной площади поверхности и химической инертности, связано с использованием углеродных нанотрубок в качестве подложки для катализаторов в химической технологии. Влияние МУНТ заключается в стабилизации наночастиц, карбидов или оксидов металлов, что обеспечивает высокую удельную площадь поверхности осаждаемых наночастиц и позволяет существенно изменять их физико-химические свойства [3].

В работе обсуждаются результаты исследования композита на основе МУНТ, на поверхность которых пиролизом медного формиата были осаждены наночастицы  $\text{CuO}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}$ . В исследовании был задействован набор взаимодополняющих методов, включая сканирующую и просвечивающую электронную микроскопию, рентгеновскую дифрактометрию, рамановскую и ультрамягкую рентгеновскую спектроскопию. Результаты исследования показывают хорошую адгезию между наночастицами меди и поверхностью МУНТ через образование кислородного мостика между атомами углерода внешнего слоя графена МУНТ и атомами кислорода оксидов  $\text{CuO}$  и  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Образование связи  $\text{Cu}-\text{O}-\text{C}$  между медным покрытием и внешней поверхностью нанотрубок наглядно подтверждается результатами исследования  $\text{O}1\text{s}$ -спектров NEXAFS и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) нанокompозита  $\text{Cu}/\text{МУНТ}$ . Измерения XPS проводились с помощью лабораторного спектрометра с компенсацией заряда образцов, а исследования NEXAFS — с использованием синхротронного излучения Русско-немецкого канала выхода и монохроматизации излучения синхротронного центра BESSY-II (Берлин, Германия) и станции NanoPES Курчатовского центра синхротронного излучения и нанотехнологий (Москва, Россия).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента РФ (МК-3796.2021.1.2), РФФИ и Республики Коми в рамках научных проектов № 19-32-60018 и 20-42-110002 р-а и Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения № 075-15-2021-1351 в части исследований NEXAFS-спектроскопии.*

1. W. K. Hsu, M. Terrones, J. P. Hare, et al. // Chemical Physics Letters, 262, 161—166 (1996);
2. P. Ball // Nature 382, 207—208 (1996);
3. C.N.R. Rao, A. K. Cheetham // J. Mater. Chem. 11, 2887—2894 (2001).

## АНАЛИЗ ЛОКАЛЬНОЙ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТОДОМ EXELFS

**О. Р. Бакиева**

*УдмФИЦ УрО РАН 426000, Ижевск, ул. Кирова, д. 132*

*bakieva@udman.ru*

Спектроскопия эмиссии электронов при возбуждении твердых тел электронным пучком или рентгеновским излучением является основным методом исследования химического состава и электронной структуры поверхностных слоев образцов. Протяженная тонкая структура спектров энергетических потерь электронов EXELFS (Extended Electron Energy Loss Fine Structure) по природе формирования и содержащейся информации аналогична протяженной тонкой структуре спектров рентгеновского поглощения EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure). Анализ EXELFS спектров позволяет определять парциальные длины химической связи, координационные числа и параметры тепловой дисперсии

В настоящее время как в EXELFS, так и в EXAFS спектроскопии существует проблема анализа спектров, содержащих наложение сигнала разных химических элементов. В этом случае экспериментальные данные являются результатом суперпозиции рассеяния нескольких волновых векторов. В настоящей работе предложен алгоритм выделения нормированных осциллирующих частей со значительной областью наложения экспериментальных сигналов. Аттестация предложенного метода проведена на диоксиде титана со структурой рутила, анатаза, брукита и рентгеноаморфной структурой. Проведено сравнение с EXAFS спектрами титана и модельными расчетами.

Работа выполнена в рамках выполнения гос. задания Отдела физики и химии поверхности УдмФИЦ УрО РАН (номер темы 121030100002-0).

## **СИНТЕЗ И ДИАГНОСТИКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НАНО-МИО-МЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ**

**А. В. Солдатов**

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия*  
*soldatov@sfsedu.ru*

Изучение наноразмерной атомной структуры перспективных материалов без дальнего порядка в расположении атомов (а к таким материалам относятся и все наноструктурированные) важно, как с фундаментальной точки зрения для понимания природы физических и химических свойств материалов, так и для прикладных исследований в качестве основы для синтеза новых материалов с необходимыми свойствами. В ходе исследования разработаны новые наноматериалы, которые позволят реализовать уникальную методику эффективного лечения опухолей, труднодоступных для стандартных методов лечения. Важным элементом разрабатываемой комплексной методики стало использование локализованного облучения опухолей с применением рентгеновского и гамма-излучения не только для высокоэнергетической лучевой терапии, но и для одновременной фотодинамической терапии, что позволит существенно улучшить результативность терапии при минимизации токсических и иных осложнений.

Для изучения распределения синтезированных наночастиц в тканях и опухолях были применены уникальные методики микро- и нанодиагностики с использованием исследовательских установок мега-класса — источников синхротронного излучения. В результате работы заложена база для разработки новых перспективных технологий комплексного персонализированного лечения в онкологии, не имеющих в настоящее время мировых аналогов.

В последнее десятилетие группой сотрудников Южного федерального университета была разработана и начала успешно применяться методика FitIt для определения параметров 3D локальной атомной структуры материалов на основе передовых методов суперкомпьютерного теоретическо-

го анализа данных спектроскопии рентгеновского поглощения в ближней к краю области (XANES).

Особенностью метода FitIt является то, что он позволяет неразрушающим образом определять не только межатомные расстояния в материалах без дальнего порядка, но и изучать угловое распределение атомов. В последнее время была успешно продемонстрирована возможность определения межатомных расстояний в материалах без дальнего порядка в расположении атомов с точностью до 1 пикометра и выше. В докладе также описывается современное состояние методов теоретического анализа экспериментальных спектров рентгеновского поглощения для извлечения параметров наноразмерной атомной и электронной структуры материалов для нано-био-медицинских применений.

*Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ 19-15-00305 «Нанокompозиты для рентгеновской фотодинамической терапии глубоких опухолей в онкологии».*

УДК 538.91

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА В КОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА**

**А. И. Чукавин<sup>1</sup>✉, А. Н. Бельтюков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>УдмФИЦ УрО РАН, г. Ижевск, Россия  
*chukavin@udman.ru*✉, тел.: +7 (3412) 43-18-94

Мембраны с наноразмерными отверстиями представляют интерес в качестве входных путей для наножидкостных аналитических систем [1]. При этом, нанесение наночастиц металла на поверхность мембраны может существенно увеличить чувствительность и предел детектирования таких систем за счёт использования локализованного плазмонного резонанса (ЛПР). Как известно, плазмонный пик в спектре экстинкции проводящих

наночастиц в значительной степени зависит не только от диэлектрического окружения, но также от их формы и размеров. Одним из относительно простых методов получения упорядоченных массивов наночастиц является «dewetting» [2]. В случае гладкой подложки упомянутый выше процесс носит спонтанный характер, при этом не удастся с высокой точностью контролировать размеры и форму частиц. Однако, в данном методе представляется возможным управлять размером частиц и их пространственным распределением за счёт подбора морфологии подложки. В настоящей работе предлагается использовать в качестве подложки пористый анодированный оксид алюминия (ПАОА), размером пор, а также расстоянием между порами которого можно управлять в достаточно широких диапазонах. Таким образом, в настоящей работе были синтезированы мембраны ПАОА с различной морфологией: со средними диаметрами пор от 20 до 75 нм, расстояние между центрами пор от 60 до 100 нм. На полученную в результате серию образцов мембран ПАОА с различной пористой микроструктурой путём вакуумного термического напыления наносились тонкие пленки золота различных толщин:  $10 \pm 3$  нм;  $15 \pm 3$  нм;  $20 \pm 3$  нм. Было изучено влияние морфологии ПАОА на размеры, форму и пространственное распределение наночастиц золота, получаемых на его поверхности при помощи «dewetting» тонкой термически напыленной пленки. А также исследованы оптические свойства полученных структур, в частности, ЛПП. Показана возможность настройки положения и ширины плазмонного пика за счёт подбора морфологии подложки ПАОА, а также за счёт термического отжига.

1. Liu Y and Ma Y. *Front. Phys.*, **2020**, 8:312.

2. Oliva-Ramírez M., Wang D. et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **2021**, 13 (9), 11385—11395.

## XANES СПЕКТРЫ FE И CO ВБЛИЗИ К-КРАЕВ В ДВУХ МНС [(COFeB)C/SiO<sub>2</sub>]<sub>200</sub> И [(COFeB)(SiO<sub>2</sub>)/C]<sub>46</sub>

**Н. С. Буйлов<sup>1</sup>✉, А. Л. Тригуб<sup>2</sup>, А. А. Гуда<sup>3</sup>, Э. П. Домашевская<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия*

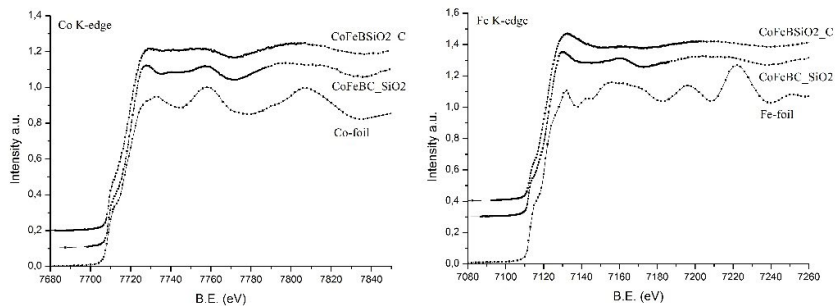
<sup>2</sup>*НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

<sup>3</sup>*ЮФУ, Ростов-на-Дону, Россия*

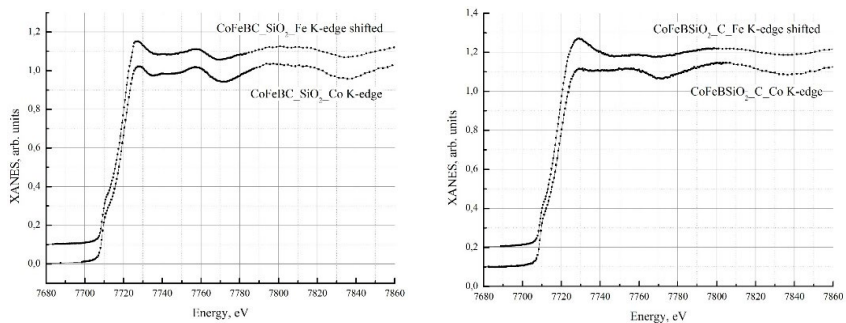
*buylov@phys.vsu.ru✉, тел.: +7 (473) 220-83-63*

Многослойные наноструктуры (МНС) [(CoFeB)<sub>60</sub>C<sub>40</sub>/SiO<sub>2</sub>]<sub>200</sub> и [(CoFeB)<sub>34</sub>(SiO<sub>2</sub>)<sub>66</sub>/C]<sub>46</sub> были получены методом ионно-лучевого распыления на вращающуюся ситалловую подложку двух мишеней, одна мишень из сплава Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub> со вставками графита или кварца SiO<sub>2</sub>, вторая, из которой распылялись прослойки, кварц или графит. Экспериментальные XANES спектры в области К-краев Fe и Co от МНС двух типов были получены на канале станции «Структурное материаловедение» центра синхротронного излучения НИИ «Курчатовский институт». Тонкая структура спектров XANES (X-ray absorption near edges structure) является результатом интерференции первичной фотоэлектронной волны, выходящей из поглощающего атома, и вторичных, многократно отраженных от ближайших соседних атомов.

Из экспериментальных данных (рис. 1) видно, что спектры рентгеновского поглощения за К-краями железа и кобальта обеих МНС [(CoFeB)C/SiO<sub>2</sub>]<sub>200</sub> и [(CoFeB)(SiO<sub>2</sub>)/C]<sub>46</sub> имеют форму отличную от спектров металлического железа и кобальта. Этот факт свидетельствует об отсутствии в обеих МНС металлов в чистом виде. Сравнение формы К-спектров рентгеновского поглощения Fe и Co МНС [(CoFeB)C/SiO<sub>2</sub>]<sub>200</sub> (рис. 2) указывает на одинаковое локальное окружение атомов металлов в результате сохранения в композитных слоях кластеров исходного сплава CoFeB, тогда как в МНС [(CoFeB)(SiO<sub>2</sub>)/C]<sub>46</sub> формы спектров рентгеновского поглощения Fe и Co различаются из-за влияния окисления от SiO<sub>2</sub> в композитном слое.



**Рис. 1.** Спектры рентгеновского поглощения за К-краем Со и К-краем Fe двух многослойных наноструктур (МНС)  $[(\text{CoFeB})\text{C}/\text{SiO}_2]_{200}$  и  $[(\text{CoFeB})(\text{SiO}_2)/\text{C}]_{46}$



**Рис. 2.** Сравнение формы спектров рентгеновского поглощения за К-краем Со и К-краем Fe двух МНС в энергетической шкале Со.

## ДИАГНОСТИКА СЛОЕВ CoPt, ОБЛАДАЮЩИХ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

**Р. Н. Крюков<sup>✉</sup>, Д. Е. Николичев, С. Ю. Зубков,**

**М. В. Дорохин, А. В. Здоровейщев, И. Л. Калентьева**

*НИФТИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия*

*kriukov.ruslan@yandex.ru<sup>✉</sup>, тел.: +7 (831) 462-31-20*

Развитие спинтроники как прикладной области знаний связано с созданием материалов, позволяющими получать поляризованный по спину поток носителей заряда. К такому классу материалов относятся тонкие пленки ферромагнитного сплава CoPt. Для этого материала свойственно то, что ось легкого намагничивания лежит перпендикулярно плоскости роста [1]. Последнее является крайне важным для приборов спинтроники, поскольку позволяет относительно малыми магнитными полями управлять поляризацией носителей заряда. Поскольку реализация приборных структур предполагает создание пленок на полупроводниковых подложках существует проблема интерфейсного взаимодействия CoPt/полупроводник. В дополнение к этому существует вопрос многофазности и однородности состава системы, что, предположительно, определяет величину обменного взаимодействия. В работе рассмотрены эти проблемы путем диагностики систем методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).

В ходе работы анализировались структуры, выращенные методом электронно-лучевого испарения мишеней в высоком вакууме на комбинированной установке TORR International [2] по двухстадийной технологии. На первом этапе на подложках Si или GaAs создавался диффузионный барьерный слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 1 нм. Далее попеременно наносились слои Co (3 Å) и Pt (5 Å). Температура нанесения составляла 200 °С. Соотношение толщин слоев Co и Pt задавало соотношение концентраций металлов в сплаве. Количество бислоев во всех экспериментах составляла 10. Для создания неоднородности состава слоев по глубине проводился высокотемпературный отжиг в условиях сверхвысокого вакуума в течение 20 с в диапазоне температур 300—700 °С с шагом 100 °С. Эксперименты РФЭС проводились на CBV комплексе Multiprobe RM (Omicron Nanotechnology GmbH, Германия). Для возбуждения фотоэмиссии использовалось  $\text{Mg K}_\alpha$  или  $\text{Al K}_\alpha$ -излучение. Диаметр области анализа составлял

3 мм. Профилирование состава осуществлялось травлением ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией 1 кэВ. Для определения концентрации химических элементов производилась запись ФЭ-линий O 1s, Cl 1s, Pt 4f, Pt 4d, Si 2s, Ga 3d, Co 2p, As 3d, Al 2s, Co 3p. Все спектры снимались при энергии пропускания анализатора 25 и 50 эВ и шаге по энергии 0,2 эВ. Математическая обработка спектров проводилась с использованием программного обеспечения SDP v. 4.3 по методике [3].

В ходе проведения работы установлено, что в исходных слоях CoPt присутствует неоднородность химического состава по глубине. Высокотемпературный отжиг приводит к увеличению в приповерхностных слоях концентрации Co, отмечается полная аморфизация этой области. В процессе роста протекает диффузия атомов Pt через диффузионный барьер, что, например, в системе CoPt/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Si сопровождается образованием химической связи Si-Pt. Отжиг не оказывает регистрируемого влияния на профиль распределения Pt. Анализ валентной зоны CoPt позволил выявить уменьшение электронной плотности вблизи уровня Ферми, что связано с перестроением плотности электронных состояний при возникновении сплава CoPt.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 21-79-20186.*

1. Zdoroveyshchev V., Vikhrova O. V., Demina P. B. *et al.*, *International Journal of Nano-science*, **2019**, 18, 1940019.

2. Здравейщев А. В., Дорохин М. В., Демина П. Б. и др., *ФТП*, **2015**, 49, 1649.

3. XPS/AES software. <http://www.xpsdata.com/>

## **АБСОРБЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАМЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО И СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**В. Н. Сивков**

*ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия  
sivkovvn@mail.ru, тел.: +7 (909) 123-19-63*

Ультрамягкая рентгеновская абсорбционная спектроскопия является одним из немногих традиционных методов исследования вещества на наноуровне, поскольку ближняя тонкая структура рентгеновских спектров поглощения определяется ближайшим окружением поглотившего рентгеновский квант атома и содержит информацию об атомном и химическом составе образцов, симметрии локального окружения атомов, их зарядовом состоянии и электронной структуре свободных состояний. Применение высокоинтенсивного с высокой степенью поляризации синхротронного излучения и современной аппаратуры синхротронных центров значительно расширяет возможности абсорбционной спектроскопии для исследования наноструктурированных систем, биологических и нанокompозитных материалов, наноразмерных покрытий и интерфейсов.

Ультрамягкая рентгеновская абсорбционная спектроскопия позволяет получать фундаментальную информацию о спектральных зависимостях оптических постоянных в области резонансного фотопоглощения (ближней тонкой структуры рентгеновских спектров поглощения, NEXAFS), через измерения сечений поглощения в широком спектральном интервале и применения соотношений Крамерса-Кронига.

Однако проведение таких измерений сопряжено с решением ряда сложных экспериментальных проблем, которые типичны при проведении спектральных измерений. А именно: (i) измерение и подавление немонохроматического фона и излучения кратных порядков, (ii) учет влияние аппаратурных искажений.

В докладе обсуждаются вопросы спектральных измерений с применением метода прямого фотопоглощения (трансмиссии) и метода полного

электронного выхода, методики измерения интенсивности монохроматического излучения, подавления и учета фонового излучения и аппаратурных искажений с иллюстрацией экспериментальных результатов.

УДК 538.91

## **ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА, АТОМНОГО И ЭЛЕКТРОННОГО СТРОЕНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ НАНОСЛОЕВ ОЛОВА НА КРЕМНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ СИНХРОТРОННЫХ МЕТОДОВ**

**Н. И. Бойков<sup>1✉</sup>, С. Ю. Турищев<sup>1</sup>, О. А. Чувенкова<sup>1</sup>,  
Н. Д. Захаров<sup>2</sup>, А. В. Анисимов<sup>1</sup>, Е. В. Паринова<sup>1</sup>, Д. А. Коюда<sup>1</sup>,  
М. Д. Манякин<sup>1</sup>, С. И. Курганский<sup>1</sup>, А. Макарова<sup>3</sup>,  
Д. Смирнов<sup>3</sup>, Р. Овсянников<sup>3</sup>, А. А. Тонких<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия*

<sup>2</sup>*Max Planck Institute of Microstructure Physics, Weinberg 2, 06120 Halle, Germany*

<sup>3</sup>*Helmholtz Zentrum Berlin, Санкт-Петербург, Россия*

*boykov-hfmm@bk.ru<sup>✉</sup>, тел.: +7 (920) 436-22-60*

Ограничивающим фактором создания и производства микросхем на основе кремния может считаться генерация тепла. Значительное снижение термической проводимости может быть достигнуто посредством формирования периодических многослойных структур Sn/Si. Таким образом, нарушения в движении фононов более заметны из-за более высокого соотношения масс Sn/Si. В то же время, исследования атомного и электронного строения, физико-химического состояния таких структур, являются крайне важными с точки зрения вопросов технологии их формирования и последующего применения. Целью данной работы было исследование атомного и электронного строения эпитаксиальных наноструктур на основе кремний-олово.

---

© Бойков Н. И., Турищев С. Ю., Чувенкова О. А., Захаров Н. Д., Анисимов А. В., Паринова Е. В., Коюда Д. А., Манякин М. Д., Курганский С. И., Макарова А., Смирнов Д., Овсянников Р., Тонких А. А., 2021

Исследованные образцы были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке Si(100) с буферным слоем Si толщиной 50 нм. На предварительно очищенных и высушенных кремниевых подложках в сверхвысоковакуумной камере осаждались ~ 5 монослоев олова. Для возможной модификации состава и структуры полученные образцы отжигались in-situ в сверхвысоком вакууме  $10^{-9}$  Торр при 800 °С в течение 10 мин. Исследования атомного и электронного строения проводились методами спектроскопии ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения (XANES — X-ray absorption near edge structure) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS — X-ray photoelectron spectroscopy). Использовалось синхротронное излучение накопительного кольца BESSY II Гельмгольца Центра Берлин (Берлин, Германия).

Путем сопоставления спектров эталонных фаз металлического олова,  $\text{SnO}_2$  и  $\text{SnO}$  с экспериментальными проведена оценка особенностей электронного спектра и состава эпитаксиальных нанослоев олова до и после отжига. Далее, при помощи спектров XANES, рассчитанных из первых принципов с использованием программного пакета Wien2K для таких материалов, как Sn,  $\text{SnO}$ , а также орторомбический и тетрагональный  $\text{SnO}_2$  была произведена полуколичественная оценка состава эпитаксиального нанослоя до и после отжига методом линейной комбинации LCF (Linear Combination Fitting). Полученные результаты показали присутствие всех трех оксидов в исходной эпитаксиальной пленке. После отжига эпитаксиальная пленка представляла собой металлическое олово. Полученные результаты полностью коррелируют с данными метода XPS.

Показано, что рост нанослоя олова на поверхности буферного слоя кремния не приводит к заметному межатомному взаимодействию на их гетерогранице, в результате чего не происходит заметных искажений электронно-энергетического спектра. Сформированный нанослой имеет сложный композитный состав из различных оксидов олова. Однако высокотемпературный сверхвысоковакуумный отжиг приводит к перестройке фазового состава поверхностных слоев такой структуры, что сопровождается миграцией атомов кислорода от атомов олова вглубь структуры к кремнию. Это приводит к полному окислению поверхности буферного слоя монокристаллического кремния и восстановлению 5 монослоев исходного оксида олова до металлического состояния.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 21-53-12042 ННИО\_а.*

## МЕТОД ФОТОЛЮМИНИСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ НАНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ В МОДЕЛЬНЫХ ЖИДКОСТЯХ

О. Д. Гюппенен<sup>1✉</sup>, П. П. Путинцев<sup>1</sup>, Д. Е. МаксUTOва<sup>1</sup>,  
Н. В. Первушин<sup>1,2</sup>, М. Б. Гонгальский<sup>1</sup>, Я. В. Евстратова<sup>3</sup>,  
А. А. Кудрявцев<sup>1,3</sup>, Б. Животовский<sup>2</sup>, Л. А. Осминкина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Факультет фундаментальной медицины, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт Теоретической и Экспериментальной Биофизики РАН,  
Пуцзино, Российская Федерация, Россия

guppenen.od19@physics.msu.ru<sup>✉</sup>, тел.: +7 (999) 925-88-41

В настоящей работе методом фотолюминесцентной спектроскопии изучены процессы растворения нанокристаллов кремния (нк-Si) при их инкубации в фосфатном солевом буфере (PBS) 37 °С и живых клетках. Одним из уникальных и наиболее подробно исследованных свойств пористого кремния (ПК) является его эффективная фотолюминесценция (ФЛ) в видимом диапазоне спектра. Данное явление было впервые обнаружено и описано Pickering и др. в 1984 году [1]. Шесть спустя Canham [2] публикует данные исследования ФЛ ПК в видимом диапазоне спектра при комнатной температуре и объясняет их с точки зрения квантово-размерного эффекта. Спектр ФЛ ПК представляет собой широкую (0.3—0.4 эВ) полосу с максимумом спектра в пределах от 1.2 до 3.5 эВ в зависимости от условий приготовления. Положение максимума спектра люминесценции зависит от размеров кремниевых нанокристаллов, как правило, сдвигается в коротковолновую область с их уменьшением [2].

В представленной работе кремниевые наночастицы (КНЧ) были получены ультразвуковой диспергацией в воде кремниевых нанонитей (КНН) различной пористости. КНН изготавливались методом металл-стимулированного химического травления пластин кристаллического кремния (с-

Si). Полученные измельчением КНН пористые и непористые наночастиц (КНЧ) инкубировали в фосфатном буфере (PBS) 37 °С или с живыми клетками.

По максимумам спектров ФЛ КНЧ, снятым при их различных временах инкубации, были рассчитаны размеры КНЧ. В пористых КНЧ быстро наблюдался голубой сдвиг максимума ФЛ, и резкое падение ее интенсивности уже после 24 часов инкубации. Рассчитанный размер нк-Si составил 3.1 нм после 24 часов. Непористые КНЧ изначально не демонстрировали ФЛ, однако после 4 дней инкубации ФЛ в красной области была зарегистрирована, что связывается с уменьшением размеров нк-Si при их растворении. При дальнейшей инкубации КНЧ происходил также голубой сдвиг максимума ФЛ и появление оксидной люминесценции на коротких длинах волн, что указывает на постепенном растворении крупных нанокристаллов кремния.

*Работа выполнена под руководством с. н. с. Осминкиной Л. А. и н. с. Гонгальского М. Б. при поддержке гранта РФФ № 19-72-10131.*

1. Pickering C., et. al. «Optical studies of the structure of porous silicon films formed in p-type degenerate and non-degenerate silicon»// J. Phys. C: Sol. St. Phys., 1984, v.17, № 10, pp.6535—6552.

2. Canham L. T., «Silicon Quantum Wire Array Fabrication by Electrochemical and Chemical Dissolution of Wafers» //Appl. Phys. Lett., 1990, v.57, № 10, pp.1046—1048.

# ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАНУЛИРОВАННЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ



Э. П. Домашевская<sup>1</sup>, С. А. Ивков<sup>1✉</sup>, П. В. Середин<sup>1</sup>, А. В. Ситников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ВГУ, Воронеж, Россия

<sup>2</sup>ВГТУ, Воронеж, Россия

ivkov@phys.vsu.ru<sup>✉</sup>, тел.: +7 (951) 555-01-75

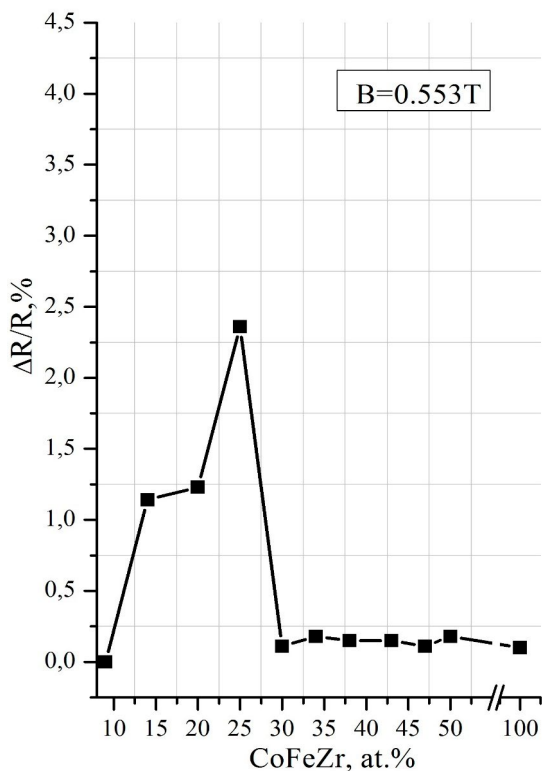
Исследования особенностей структурных и электромагнитных свойств многослойных наносистем и гранулированных нанокomпозитов остаются актуальными до настоящего времени. Многие научные группы из различных стран мира занимаются исследованиями эффекта туннельного магнитосопротивления (ТМС) и аномального эффекта Холла в гранулированных нанокomпозитах различных составов металл-диэлектрик [1—3].

В лаборатории физики твердого тела ВГТУ в процессе ионно-лучевого распыления в атмосфере аргона были получены в едином цикле композиты металл-диэлектрик  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  в широком диапазоне относительного содержания металлической составляющей к диэлектрику  $\text{MgF}_2$  ( $9 \leq x$ , ат.%  $\leq 50$ ) на стеклянных подложках. Толщины получаемых таким образом слоев гранулированных композитов варьировались в пределах (1—4) мкм.

В предыдущих работах [4] мы исследовали структурные свойства представленных нанокomпозитов с помощью метода рентгеновской дифракции, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и др. В данной работе мы провели исследования электрофизических свойств нанокomпозитов  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ . Для осуществления этой задачи использовалась установка ЕСОPIA HMS-3000 и др.

Образцы с составами  $x$ , соответствующими области перколяции, проявляют магниторезистивный эффект разной величины (рис. 1). Нанокomпозит  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{25}(\text{MgF}_2)_{75}$  проявил максимальный эффект ТМС, равный 2,5 % в поле 5 кЭ. Максимальное значение ТМС в образце с концентрацией металлической составляющей  $x = 25$  ат.% совпадает с началом

образования нанокристаллов металлической составляющей в композитах при этом значении  $x$  на стеклянных подложках [4].



**Рис. 1.** Концентрационная зависимость магниторезистивного эффекта образцов системы  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10x})(\text{MgF}_2)_{100-x}$

1. Y. Cao, A. Umetsu, N. Kobayashi, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **2017**, 111, 122901.
2. M. Miyamoto, T. Kubo, Y. Fujishiro, et al., *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*, **2018**, V.138, N.12, 655—661.
3. Y. Cao, N. Kobayashi, S. Ohnuma, H. Masumoto., *Appl. Phys. Lett.*, **2020**, 117, 072904.
4. Domashevskaya E. P., Ivkov S. A., Sitnikov A. V., Kozakov A. T., et al., *Journal of Alloys and Compounds*, **2021**, 870, 159398, 61:2, 211—219.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЭМИССИОННЫХ СПЕКТРОВ СОЕДИНЕНИЯ $\text{CuO}$

**В. Р. Радина<sup>✉</sup>, С. И. Курганский**

*Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия*  
*viminova@inbox.ru<sup>✉</sup>, тел.: +7 (473) 220-83-63*

Среди металлов медь занимает особое место из-за высокой электропроводности и теплопроводности. По электропроводности медь уступает только серебру и поэтому является важнейшим проводниковым материалом. Она обладает высокой коррозионной стойкостью, технологичностью, сравнительно низкой стоимостью, что обуславливает ее широкое применение в промышленности, как в чистом виде, так и в виде сплавов.

Медь может находиться в двух стехиометрических оксидных фазах  $\text{Cu}_2\text{O}$  и  $\text{CuO}$ . Оксид меди (II) обладает большей стабильностью и повышенными функциональными свойствами, что обуславливает значительный интерес исследователей к этому соединению. Соединение  $\text{CuO}$  применяется в области фотоэлектрических технологий, для расщепления воды, а также для создания солнечных батарей. В связи с этим, важно знать электронное строение этого вещества.

В данной работе представлены результаты теоретического исследования XES (X-ray emission spectroscopy) спектров соединения  $\text{CuO}$  в сравнении с экспериментальными данными [1].

Моноксид меди имеет моноклинную сингонию кристаллической решётки и относится к пространственной группе  $C 2/c$  [2]. Атом кислорода связан с четырьмя атомами меди, расположенными в вершинах искаженного тетраэдра. Элементарная ячейка моноксида меди содержит 4 формульные единицы.

Расчет электронной структуры оксида меди проводился методом линейаризованных присоединенных плоских волн (ЛППВ) в программном пакете Wien2k [3] с использованием обобщенного градиентного приближения (GGA) для обменно-корреляционной энергии. Для сравнения был выполнен также расчет XES-спектров оксида меди с использованием по-

тенциала  $mbJ$  [3], дающим, как правило, более точное значение энергетической щели для полупроводников.

Согласно дипольным правилам отбора,  $Cu L_3$ -спектр отражает распределение  $Cu 3d$ -,  $4s$ -состояний в валентной зоне. Результаты нашего расчета показали, что теоретически рассчитанный  $Cu L_3$ -спектр хорошо согласуется с экспериментальным как по общей форме, так и по относительной интенсивности в верхней и нижней частях валентной зоны. XES  $Cu L_3$ -спектр имеет один ярко выраженный максимум при энергии  $\sim -3,5$  эВ. Оба варианта расчета спектра одинаково хорошо согласуются с экспериментом.

О  $K$ -спектр отражает распределение  $2p$ -состояний кислорода в валентной зоне. Для О  $K$ -спектра в соединении  $CuO$  характерны два пика — при энергиях  $-5,5$  эВ и  $-3$  эВ. Эффект расщепления неметаллических  $p$ -состояний вследствие их взаимодействия с  $d$ -состояниями металла известен как  $d$ - $p$ -резонанс [4]. Пики экспериментального спектра наилучшим образом совпадают с пиками спектра, который был рассчитан без использования потенциала  $mbJ$ .

*Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения № 075-15-2021-1351.*

1. Mariot J.-M., Barnole V., Hague C. F., Vetter G., and Queyroux F., Phys. B — Condensed Matter, **1988**, 75, 1—9.
2. Asbrink S., Norrby L. — J., Acta Cryst., **1970**, 26, 8—15.
3. Schwarz K., Blaha P., Madsen G. K.H., Comput. Phys. Commun., **2002**, 147, 71—76.
4. Domashevskaya E. P., Terekhov V. A. Physica status solidi (b), **1981**, 105, 121—127.

## ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА СТЕПЕНЬ ОКИСЛЕННОСТИ ОКСИДА ГРАФЕНА: ОЦЕНКА МЕТОДОМ РФЭС

**Р. Г. Валеев<sup>1</sup>, А. А. Елисеев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия

<sup>2</sup>МГУ им.М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
*rishatvaleev@mail.ru*<sup>✉</sup>, тел.: 8 (3412) 430163

Последние годы активно разрабатываются двумерные мембраны для осушения газов, нанофильтрации, осматических процессов [1]. Среди других 2D материалов оксид графена (Graphene Oxide — GO) выделяется теоретическим и практическим интересом из-за простоты получения, низкой стоимости, возможности варьирования межслоевого расстояния, селективности и возможности модификации поверхности различными функциональными группами [2]. Например, GO-мембраны позволяют очистить воду от 97,5 % солей натрия, что превосходит свойства большинства мембран на основе существующих полимерных материалов [3].

Главную роль в проницаемости и селективности мембран оксида графена играет расстояние между отдельными слоями [4], однако вклад поверхностных функциональных групп (—ОН, —С=О, —О=С—ОН) также значительно влияет на транспортные свойства мембран [5] и их количество задается степенью окисленности оксида графена, большое влияние на которое также оказывает наличие внешних факторов: температура, влажность, световое воздействие, вакуумная выдержка.

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) в настоящее время переживает настоящий бум и как метод анализа химического состава веществ, так и оценки валентного состояния химических элементов, входящих в соединения. Кроме того, он позволяет с высокой точностью оценить вклады различных функциональных групп в формирование химических связей углеродного компонента GO [6].

Таким образом, в работе представлены результаты РФЭС исследований степени окисленности оксида графена, который подвергался длитель-

ной выдержке в вакууме, температурному отжигу до 300 °С, воздействию ультрафиолетового излучения.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-19105.*

1. Song N., Gao X., Ma Z., Wang X., Wei Y., Gao C., *Desalination*, 2018, 437, 59—72.
2. Eliseev A. A., Poyarkov E. A., Chernova A. A., Eliseev A. A., Chumakov O., Konovalov A. P., Petukhov D. I., *2D Materials*, 2019, 6, 035039.
3. Li W., Wu W., Li Z., *ACS Nano*, 2018, 12, 9309—9317.
4. Liang S., Mu L., Chen L., Jiang J., Yang Y., Fang H., *Chem. — An Asian J.*, 2020, 15, 2346—2349.
5. Dreyer D. R., Park S., Bielawski C. W., Ruoff R. S., *Chem. Soc. Rev.*, 2010, 39, 228—240.
6. Chernova E. A., Petukhov D. I., Chumakov A. P., Kirianova A. V., Sadilov I. S., Kapitanov O. O., Boytsova O. V., Valeev R. G., Roth S. V., Eliseev A. A., Eliseev A. A., *Carbon*, 2021, 183, 404—414.

УДК 538.91

## **АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ EELS СПЕКТРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В РЕЖИМЕ ОТРАЖЕНИЯ**

**И. К. Аверкиев<sup>✉</sup>, О. Р. Бакиева**

*Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,  
Ижевск, Россия  
averkiev1997@mail.ru<sup>✉</sup>, тел.: 8 (3412) 430163*

Ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (UPS), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS), спектроскопия поглощения рентгеновского излучения (XAS) и многие другие варианты использования рентгеновского излучения являются основными методами исследования физико-химических параметров вещества в конденсированном состоянии. Однако использование методики, основанной на длинновол-

новом или коротковолновом излучении всегда ограничено природой используемых фотонов [1, 2]. Этой проблемы можно избежать, используя спектроскопию потерь энергии электронов (EELS), которая позволяет исследовать электронную и атомную структуру в том числе сильно локализованных особенностей. В частности, в спектроскопии потерь энергии электронов реализованы методы:

1) спектроскопия потерь энергии валентных электронов (VEELS — Valence Electron Energy Loss Spectroscopy), реализована в области низких потерь энергии электронов ( $\sim 50$  эВ) и предоставляет информацию, аналогичную ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии, и содержит сведения о зонной структуре. Кроме характерных пиков плазменных потерь, данная область отображает плотность незанятых состояний над уровнем Ферми [3].

2) метод анализа протяженных тонких структур энергетических потерь энергии электронов (EXELFS — Extended Electron Energy Loss Fine Structure). Эта структура формируется за краем возбуждения внутреннего уровня атома вещества, и поскольку природа формирования аналогична XAFS спектрам, она содержит информацию о параметрах локальной атомной структуры исследуемого объекта — длины химической связи, координационные числа и параметры дисперсии межатомных расстояний [4].

В настоящей работе проводилось исследование изменений электронной и локальной атомной структуры соединения  $\text{Ti}_2\text{AlC}$ . Были получены спектры энергетических потерь электронов в режиме обратного отражения от поверхности образца в диапазоне до 600 эВ в шкале потерь энергии вторичного электрона. Полученные параметры локальной атомной структуры показали уменьшение длин связи и координационных чисел для пар атомов C—C, C—Ti и Al—Ti. Анализ области малых потерь энергии электронов позволил определить изменения в электронной структуре. Определены энергии поверхностного и объемного плазмона, также определены энергии межзонных переходов поверхностных групп. В результате было сделано предположение, что атомы титана образуют октаэдрические структуры вокруг атомов углерода и атомов алюминия.

*Работа выполнена по плану НИИР № 121030100002-0.*

1. De Angelis F., Das G., Candeloro P., et. al. *Nat. Nanotechnol.* 2010, 5, 67.
2. W. A. Murray, W. L. Barnes, *Adv. Mater.* 2007 19, 3771.

3. Herrera-Perez G., Ornelas-Gutierrez C., et. al. *Micron*, 2021, 149, 103124.  
4. Bakieva O. R., Nemtsova O. M. *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* 2018, 222, 15—23.

УДК 538.91

## ПОЛУЧЕНИЕ СТАБИЛЬНЫХ ВОДНЫХ СУСПЕНЗИЙ НАНОЧАСТИЦ КРЕМНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ЦИТОТОКСИЧНОСТИ

**Д. Е. МаксUTOва<sup>1✉</sup>, Н. В. ПервУшин<sup>2</sup>,  
М. Б. Гонгальский<sup>1</sup>, Я. В. Евстратова<sup>3</sup>, А. А. Кудрявцев<sup>3</sup>,  
Б. Животовский<sup>2</sup>, Л. А. Осминкина<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Факультет фундаментальной медицины, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт Теоретической и Экспериментальной Биофизики РАН,  
Пуццино, Россия

*maksutova.de16@physics.msu.ru<sup>✉</sup>, тел.: +7 (977) 100-92-00*

Многие новые продукты на основе пористого кремния, такие как препараты для тераностики, пасты для анодов аккумуляторов, солнцезащитные средства, косметические средства и электронные чернила, требуют стабильных суспензии частиц и коллоидов. Также очень важно исследовать детально токсичность полученных материалов. В настоящей работе представлен метод получения стабильных коллоидных растворов кремниевых наночастиц (КНЧ), исследованы их структурные свойства и цитотоксичность по отношению к клеткам MCF *in vitro* при пролонгированных временах инкубации с клетками.

Водные суспензии КНЧ были получены механическим измельчением в воде пленок пористого кремния с помощью шаровой мельницы, или ультразвуковым измельчением массивов пористых нанонитей кремния [1]. С помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показа-

но, что НЧ ПК имеют диаметр около 100 нм, пористую структуру и состоят из мелких кремниевых нанокристаллов нк-Si и пор.

Согласно данным динамического рассеяния света, средний размер (диаметр) наночастиц в суспензии составлял около 100 нм, при этом заряд поверхности наночастиц был электроотрицательным — 64 мВ. Нанокристаллическая структура КНЧ была подтверждена также с помощью данных спектроскопии комбинационного рассеяния (КРС). В то время как спектр КРС кристаллического кремния (с-Si) представляет собой узкую линию на  $520\text{ см}^{-1}$ , КНЧ характеризуются более широкими спектрами с положением пика КРС на частоте  $518\text{ см}^{-1}$ . Такой низкочастотный сдвиг и уширение спектра КРС обычно связывают с конфайнментом фононов в нанокристаллах кремния с размерами  $2\div 4\text{ нм}$ . ИК-спектры поглощения наночастиц показывают, что их поверхность преимущественно покрыта кислородом, о чем свидетельствует наличие пиков, ответственных за колебания Si-O-Si на частотах  $1070\text{ см}^{-1}$ .

Показано, что КНЧ могут эффективно накапливаться раковых клетках и, следовательно, использоваться для их люминесцентной диагностики. С помощью широкого набора биологических методов *in vitro* показано, что полученные КНЧ не проявляют токсических свойств вплоть до концентраций 800 мг/мл и 10 дней их инкубации с клетками рака груди MCF-7.

Полученные результаты используются для разработки биodeградируемых систем доставки лекарств на основе пористых кремниевых наночастиц.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-72-10131.*

1. МаксUTOва Д. Е., Цурикова У. А., Гонгальский М. Б., Евстратова Я. В., Кудрявцев А. А., Осминкина Л. А. Метод спектроскопии комбинационного рассеяния света для мониторинга процесса растворения нанокристаллов кремния в модельных жидкостях и живых клетках. // Ученые записки физического факультета Московского Университета, том 2, с. 2120501-1-2120501-7 (2021).

**ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ  
НАНОЧАСТИЦ КРЕМНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ  
СПОСОБАХ ПОЛУЧЕНИЯ И ИХ  
ИНТЕГРАЦИИ С КУЛЬТУРАМИ КЛЕТОК  
МЛЕКОПИТАЮЩИХ В ФОРМИРУЕМЫХ  
IN VITRO ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛАХ**

**С. С. Титова<sup>1✉</sup>, Д. А. Коюда<sup>1</sup>, Л. А. Осминкина<sup>2</sup>, Е. В. Паринова<sup>1</sup>,  
О. А. Чувенкова<sup>1</sup>, Р. Г. Чумаков<sup>3</sup>, А. М. Лебедев<sup>3</sup>, С. В. Канникин<sup>1</sup>,  
А. И. Чукавин<sup>4</sup>, А. Н. Бельтюков<sup>4</sup>, С. Ю. Турищев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Воронежский государственный университет, физический факультет,  
Воронеж, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет, физический факультет,  
Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Москва, Россия*

<sup>4</sup>*Удмуртский Федеральный Исследовательский Центр Уральского  
отделения Российской академии наук, Ижевск, Россия.*

*titova@phys.vsu.ru<sup>✉</sup>, тел.: +7 (908) 145-97-73*

Кремний является основополагающим материалом электроники. Развитие технологий позволило создавать структуры на основе кремния с размерами менее 100 нм. Таким образом, увеличение площади поверхности, характерное для наноструктур, приводит к выявлению у наноматериала новых свойств, которые в свою очередь, обуславливают появление альтернативных методов применения таких материалов.

Для наноструктур на основе кремния помимо фотолуминесценции, был обнаружен ряд особых биологических свойств, таких как биodeградация, сенсбилизация, биодоступность, биосовместимость. Такие свойства предполагают возможность использования наночастиц кремния в биомедицине и тераностике различных заболеваний.

Результатом совмещения неорганических наночастиц с биологическими, природоподобными объектами являются новые — нанобиогибридные

структуры. При взаимодействии наночастиц и клеток актуальным и интересным является изучение изменений состава и структуры поверхности, потому данная работа нацелена на изучение состава, структуры и физико-химического состояния поверхности наночастиц кремния в составе биогибридного материала, изучение влияния способа высушивания как возможность изменения режимов взаимодействия и внедрения наночастиц в биологическую, в том числе, клеточную структуру.

При таких масштабных и сложных исследованиях необходимо использование поверхностно-чувствительных методов, которые позволят изучать структуру поверхности как внедряемых неорганических наночастиц, так и нанобиогибридного объекта в целом. Такими методами стали методами растровой электронной микроскопии, спектроскопии ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения (XANES).

На основании полученных результатов можно сказать, что способ получения наночастиц влияет на их поверхностную структуру, что позволяет подобрать оптимальные условия для их дальнейшего совмещения с природоподобными объектами. В свою очередь, поверхность наночастиц кремния, внедренного в клеточную культуру, подвержена некоторым изменениям.

*Исследование выполнено в рамках проекта РНФ 19-72-20180. Методическая проработка синхротронных исследований выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения № 075-15-2021-135.*

## **ВЛИЯНИЕ ИОННО-ЛУЧЕВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТОНКИХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК НА ИЗОЛИРУЮЩИХ ПОДЛОЖКАХ**

**Т. С. Картапова<sup>✉</sup>, Ф. З. Гильмутдинов**

*ФГБУН «УдмФИЦ» УрО РАН, г. Ижевск, Россия*

*radostinka301@yandex.ru<sup>✉</sup>, тел.: +7 (951) 204-82-83*

Углерод известен человечеству с древнейших времен, прежде всего как уголь и алмаз. Как индивидуальный химический элемент углерод был признан Лавуазье в конце XVIII в. и получил свое название («Carboneum») от латинского «carbo» — уголь. Ни один элемент Периодической системы Менделеева не обладает тем разнообразием свойств, иногда прямо противоположных, которое присуще углероду. Одними из важных свойств являются механические свойства, такие как высокая твердость, высокий модуль упругости, низкий коэффициент трения и низкий износ. Столь уникальные свойства — причина того, что и чистый углерод, и содержащие его материалы служат объектами фундаментальных исследований и применяются в бесчисленных технических процессах. В связи с этим целью данной работы явилось исследование состава и структуры, топографии, измерение электропроводности пленок.

В данной работе тонкие углеродные пленки напылялись на поверхность стекла методом магнетронного распыления углеродной мишени в среде рабочего газа Ar с последующей бомбардировкой ионами азота и аргона. В процессе варьировалась доза облучения. Толщина пленок была перепроверена методом АСМ путем измерения царапин пленки. На уровне ошибки измерения на исходной пленке значения толщины коррелируют с расчетными данными при напылении.

На электронном микроскопе Quattro S проведен анализ химического состава углеродной мишени. Показано, что неконтролируемые примеси в мишени отсутствуют, в различных точках анализа обнаруживаются примеси кислорода менее 1 %, что связано с пребыванием пористой мишени на воздухе.

По данным АСМ и сканирующей электронной микроскопии углеродные пленки являются сплошными и «островковый» характер не выявлен.

Результаты измерений электропроводности показали, что облучение ионами азота приводит к увеличению исходного электросопротивления в 10—15 раз, после облучения ионами аргона в той же дозе — более чем в 30 раз. Прослеживается корреляция изменения электросопротивления углеродных пленок до и после облучения с данными АСМ по среднему размеру элементов топографии.

В связи с этим была предпринята попытка определения различий в составе и структуре методами Раман-спектроскопии и РФЭС.

По данным РФЭС, существенных различий в пленках нет. Сателлитная структура в области  $\pi$  и  $\sigma$  плазмонов, а также увеличение ширины основных пиков C1s свидетельствуют о том, что мы изначально имеем дело с пленками преимущественно разупорядоченного углерода (не графита). Из обзорных РФЭС спектров также видно, что ионная бомбардировка пленок аргоном приводит к «диффузии» натрия из стекла в пленку. Чем больше доза, тем больше интенсивность спектра натрия. Кремний и его оксиды не наблюдаются, т. е. пленки в целом являются сплошными, и стекло сквозь пленку не просматривается.

УДК 538.91

## NANOSTRUCTURED SILICON: QUO VADIS?

**Vladimir Sivakov**

*Leibniz Institute of Photonic Technology, Dept. «Functional Interfaces»;  
Group «Silicon Nanostructures», Jena, Germany  
vladimir.sivakov@leibniz-ipht.de*

Si-based nanostructures (nanowires, nanoparticles) can be successfully applied not only in classical silicon application fields like photovoltaics, but can also be used as a powerful agent in modern optoelectronics and cancer therapeutics.

The silicon-based technology is certainly favored because of material abundance and non-toxicity at a high level of materials control, together with a huge

industrial infrastructure to account for low production/processing costs and high production yields.

In the last years, the research and development of silicon nanostructures have been attracting large interest as a promising material for various applications in the fields of optoelectronics, photonics, and photovoltaics, as well as in nanomedicine. This is because SiNSs offer bottom-up or top-down self-assembly of ordered one dimensional nanostructures (1D), the creation of new combinations of heterojunctions with sharp interfaces, including materials with large lattice mismatch, and the ability to grow semiconductor nanowires on silicon and further integration in silicon technology.

The fundamental studies are required to improve the performance of silicon nanostructures as building blocks in different application fields that will be the main focus of the presented talk. Silicon nanostructures allow a variety of advantages — from enhanced light trapping to quantum size effects — like variation of the band gap and enhanced direct band absorption. Due to the physical phenomena (light trapping, increased band gap, low reflectance) in nanostructures, new possibilities have been opened for highly effective silicon heterojunction solar cell development.

There are still a lot of fundamental problems such as surface states, electron transport, and surface recombination, which are to be studied in order to develop high efficiency solar cells, for example, based on NWs: the size and density of silicon nanostructures and the study of the 1D nanostructure optical and electrical properties. One of the most important issues is an atomic and electronic structure of the surface, which will be discussed in the proposed paper.

I intend to carry out a research focusing on the fundamental physical and chemical studies of silicon nanostructure (nanowires, nanoparticles) surfaces for the future application of these advanced nanostructures as a novel building block in green energy, (bio) sensorics and nanomedicine fields. These nanostructures are based on insights gained during the last 15 years of my research and are expected to lead to significant progress steps, by which such material will be promoted from «promising material» to effective material for the energy and bionanotechnology as well as novel building blocks in nanophysics and nanomedicine.

## НEXAFS И XPS ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА НА ПОВЕРХНОСТИ МУНТ

Д. В. Сивков<sup>1, 2✉</sup>, С. В. Некипелов<sup>2</sup>, О. В. Петрова<sup>2</sup>,  
А. С. Виноградов<sup>1</sup>, С. И. Исаенко<sup>2</sup>, П. А. Макаров<sup>2</sup>,  
А. М. Обьедков<sup>4</sup>, Б. С. Каверин<sup>4</sup>, И. В. Вилков<sup>4</sup>, С. А. Гусев<sup>5</sup>,  
А. В. Аборкин<sup>5</sup>, Р. Н. Скандаков<sup>2</sup>, В. Н. Сивков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ФИЦ Коми научный центр УрО РАН, Сыктывкар, Россия

<sup>3</sup>Институт металлоорганической химии им. Г. А. Разуваева РАН,  
Нижний Новгород, Россия

<sup>4</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>5</sup>Владимирский государственный университет  
им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, Владимир, Россия

d.sivkov@spbu.ru<sup>✉</sup>, тел.: +7 (821) 242-843-52

Проведены исследования структуры и свойств композитных материалов на основе МУНТ, покрытых карбидом вольфрама с использованием методов ультрамягкой рентгеновской спектроскопии. XPS исследования были выполнены с использованием лабораторного спектрометра с системой компенсации заряда образца, а NEXAFS — с использованием Русско-Немецкого дипольного канала синхротронного излучения на BESSY-II.

Исходные МУНТ были синтезированы с использованием метода МОСVD и исследовались методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии (РЭМ, ПЭМ) и рентгеновской дифракции (РД). Определено, что внешняя поверхность МУНТ образована графеновыми слоями с расстоянием между ними около 0,34 нм. Внешний диаметр МУНТ и диаметр их внутреннего канала составляют 80 нм и 6—10 нм, соответственно. Длина МУНТ варьируется от сотен микрометров до нескольких миллиметров. Внутренние каналы содержат наночастицы кристаллических фаз Fe и Fe<sub>3</sub>C. Методами XPS и NEXAFS-спектроскопии

---

© Сивков Д. В., Некипелов С. В., Петрова О. В., Виноградов А. С., Исаенко С. И., Макаров П. А., Обьедков А. М., Каверин Б. С., Вилков И. В., Гусев С. А., Аборкин А. В., Скандаков Р. Н., Сивков В. Н., 2021

обнаружено, что внешняя поверхность МУНТ остается чистой и содержит менее 3 % атомов кислорода в виде оксидов углерода.

Данные XPS, NEXAFS-спектроскопии и комбинационного рассеяния показали окисление покрытий из карбида вольфрама на воздухе и образование покрытий  $\text{WO}_{3-x}$  толщиной 3,3 нм. Обнаружено, что поверхность МУНТ покрыта слоем карбида вольфрама, состоящим из нестехиометрических наночастиц  $\text{WC}_{1-x}$ . Структура границы раздела МУНТ—(пиролитическое покрытие) состоит из трех слоев: переходного слоя, в котором атомы углерода внешней поверхности МУНТ образуют связи с атомами вольфрама слоя покрытия; слоя покрытия из карбида вольфрама  $\text{WC}_{0.88}$ ; и внешнего слоя оксида вольфрама  $\text{WO}_{2.77}$ . Нестехиометрическая адгезия наночастиц  $\text{WC}_{1-x}$  обеспечивается химической связью между атомами углерода наружного слоя МУНТ и атомами вольфрама покрытия.

*Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-32-50062 и № 18-33-00776, частичной поддержке РНФ, проект № 18-79-10227, двусторонней программы RGL на BESSY II, проект № 2019-1-19107863, а также госзадания для ИМХ РАН (тема № 45.8). Результаты исследования опубликованы в [Sivkov D. et al. // Appl. Sci., 2020, 10, 4736; doi:10.3390/app10144736].*

1. Sivkov D., et al., *Appl. Sci.*, **2020**, 10, 4736; doi:10.3390/app10144736.

## ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГИБРИДНЫХ СТРУКТУР С НАНОЧАСТИЦАМИ ЖЕЛЕЗО-КИСЛОРОД НА ОСНОВЕ МОЛЕКУЛ ФЕРРИТИНА И КЛЕТОК E.COLI

Е. А. Беликов<sup>1</sup>✉, Н. В. Праслова<sup>1</sup>, Е. В. Паринова<sup>1</sup>, Д. А. Коюда<sup>1</sup>,  
А. К. Пислярук<sup>1</sup>, О. А. Чувенкова<sup>1</sup>, Е. В. Преображенская<sup>2</sup>,  
С. С. Антипов<sup>1,3</sup>, С. Ю. Требунских<sup>1</sup>, В. Сиваков<sup>4</sup>, С. Ю. Турищев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия,

<sup>2</sup>Институт биофизики клетки РАН, Пущино, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет технологий и управления,  
Москва, Россия

<sup>4</sup>Лейбниц институт фотонных технологий, Йена, Германия

bp4nth3r@mail.ru✉, тел.: +7 (910) 289-61-37

С развитием науки и техники технологические устройства становятся все меньше, а их функционал увеличивается. Ученые часто прибегают к новым способам для улучшения производительности устройств. В области электроники для улучшения функциональных характеристик используют гибридные материалы. Бактериальные культуры *Escherichia coli* и получаемый из них в процессе синтеза белок DPS является уникальным наноразмерным объектом, включающим в себя органическую оболочку и внутреннюю полость, в которой формируется минерализованное ядро, состоящее из ионов  $Fe^{3+}$ , представляющее широкий практический и научный интерес. Получение информации об исходной бактерии, ее морфологических особенностях, а именно поверхности мембраны источника такого рода гибридных объектов, клеточной культуры *Escherichia coli*, также крайне востребовано. Более того, важным является и получение данных о ее атомном и электронном строении. Удобными инструментами для выполнения этих задач являются сканирующая электронная микроскопия (Scanning Electron Microscopy — SEM), успешно применяемая для изучения морфологических особенностей разных объектов, в том числе биологического происхождения. Важно получить данные о физико-хими-

---

© Беликов Е. А., Праслова Н. В., Паринова Е. В., Коюда Д. А., Пислярук А. К., Чувенкова О. А., Преображенская Е. В., Антипов С. С., Требунских С. Ю., Сиваков В., Турищев С. Ю., 2021

ческом, атомном и электронном строении клеточной культуры, для этого могут быть использованы рентгеноэлектронные методы, например рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS — X-ray photoelectron spectroscopy), которая обладает высокой чувствительностью к локальному окружению атомов заданного сорта. В данной работе был применен метод фотоэмиссионной электронной микроскопии (PhotoEmission Electron Microscopy — PEEM), являющийся сочетанием двух таких подходов, позволяющих получать «точечную» информацию не только об атомном и электронном строении, а также и о морфологии малых объектов, в том числе клеток, что крайне актуально.

В данной работе представлены результаты PEEM и XPS исследований клеток *E.coli* K12 MG1665 и молекул белка Dps в сочетании с контролем свойств методами SEM и XPS. При этом SEM исследования были проведены до и после измерений XPS и PEEM. Исходные пробы осаждались на чистые подложки кремния и хранились в лабораторных условиях. Измерения XPS проводились при AlK $\alpha$  возбуждении (1486.61 eV), в ходе контрольных измерений SEM использовалось ускоряющее напряжение от 2,5 до 20 кВ. Получение изображений методом PEEM производилось при излучении ртутной лампы ~5 эВ.

Исследования SEM позволили получить данные, свидетельствующие о четком распределении клеток по подложке, были получены изображения поверхности с высоким разрешением отдельных клеток *E.coli*. При проведении эксперимента XPS не было выявлено каких-либо загрязнений поверхности, показано наличие всех характерных компонентов осажденной культуры. Данные PEEM продемонстрировали возможность эффективного получения изображений биообъектов: массива клеток *E.coli*. Полученные данные PEEM хорошо соотносятся с данными, полученными ранее. Исследования SEM, проведенные после спектромикроскопических исследований, продемонстрировали частичную деградацию мембраны бактерии. Полученные результаты дают возможность эффективно, и в перспективе химически селективно, с использованием синхротронного излучения, проводить картирование поверхности единичной клетки.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗБАВЛЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА (In, Fe)Sb КАК ИНЖЕКТОРА СПИНОВОГО СВЕТОДИОДА

**М. В. Вель<sup>✉</sup>, М. В. Дорохин, В. П. Лесников, А. В. Кудрин**

*ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия*

*mikhail28ved@gmail.com<sup>✉</sup>, тел.: +7 (910) 106-69-98*

В настоящее время разработка и развитие спиновых светоизлучающих диодов (ССИД), являющихся источниками циркулярно-поляризованной люминесценции, представляет значительный практический интерес. Традиционно, в качестве инжекторов спин-поляризованных носителей в ССИД используются многослойные структуры на основе ферромагнитных металлов, которые имеют ряд недостатков [1]. В качестве альтернативы предлагается использование новых материалов, а именно разбавленных магнитных полупроводников (РМП), которые представляют собой немагнитные материалы, легированные магнитными примесями, и, следовательно, сочетающие магнитные и полупроводниковые свойства. Основным преимуществом РМП является совместимость с современными полупроводниковыми технологиями [2].

В настоящей работе образцы для исследования представляли собой полупроводниковые гетероструктуры, выращенные на подложке p-GaAs с квантовой ямой  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ , методом МОС-гидридной эпитаксии. В качестве ферромагнитного инжектора использовался слой РМП (In, Fe) Sb, который наносился методом импульсного лазерного осаждения. Между гетероструктурой и инжектором был нанесён тонкий защитный слой MgO. На последнем этапе была сформирована диодная структура с использованием термического испарения для металлизации, фотолитографии и химического травления для формирования меза-структур.

Структурные свойства образцов были исследованы с помощью просвечивающего электронного микроскопа Jeol JEM-2100F [3]. Распределение составляющих элементов было получено методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) в процессе микроскопических исследований. Структура демонстрирует высокое кристаллическое

качество буферного слоя GaAs, квантовой ямы  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  и спейсерного слоя GaAs. Диэлектрический слой MgO и слой РМП (In, Fe)Sb являются поликристаллическими. ЭДС исследования показало достаточно равномерное распределение элементов в слое РМП, содержание Fe составило  $13 \pm 4$  ат. % [3].

На диодных меза-структурах были исследованы зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесценции  $P_{\text{EL}}$  от магнитного поля, в диапазоне температур от 10 до 300 К. Зависимость  $P_{\text{EL}}(B)$  подобна магнитополевой зависимости слоя (In, Fe)Sb. Максимальная степень циркулярной поляризации, связанная с насыщением намагниченности, составила  $\sim 0.7$  % и наблюдалась при температуре 10 К. Такой тип зависимости  $P_{\text{EL}}(B)$  связан с магнитными свойствами (In, Fe)Sb, а относительно высокое значение степени поляризации обусловлено инжекцией спин-поляризованных электронов из ферромагнитного слоя (In, Fe)Sb. В аналогичном образце, но без слоя MgO, электролюминесценция не наблюдалась в диапазоне токов диода 1—200 мА. Предположительно, MgO является защитным слоем, который предотвращает негативное воздействие импульсного лазерного осаждения на излучательные характеристики структур.

*Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 21-79-20186).*

1. S. H. Liang, et al., *Phys.Rev. B.*, 2014, 90, 085310.
2. Zutic I., Fabian J., Das Sarma S., *Rev. Mod. Phys.*, 2004, 76, 323.
3. М. В. Ведь и др., *Письма в ЖТФ*, 2020, 46(14), 17.

## СПЕКТРОСКОПИЯ НА КУРЧАТОВСКОМ ИСТОЧНИКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**Р. Г. Чумаков<sup>✉</sup>, А. М. Лебедев, В. Г. Станкевич**

*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*

*ratibor.chumakov@gmail.com<sup>✉</sup>, тел.: +7 (985) 914-36-42*

Фотоэлектронная и мягкая рентгеновская спектроскопия зарекомендовали себя как простой и надежный способ изучения физико-химических свойств поверхностей для решения задач материаловедения, физики твердого тела, физики поверхности, наносистем, органической, неорганической и каталитической химии, гибридных и слоистых систем, спинтроники и природоподобных технологий. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия чрезвычайно чувствительна к химическому и валентному составу тонких поверхностных слоев толщиной до 5 нм, что делает ее незаменимой для анализа новых функциональных наносистем, поверхностей и элементов микроэлектроники. Спектроскопия рентгеновского поглощения (XAS, NEXAFS) исследует не только химический состав образцов и валентное состояние элементов, но также из-за поляризационных свойств света также ориентацию химических связей в образце, заполненные электронные состояния и локальное окружение атомов, которое дает уникальную информацию как об упорядоченных объектах, таких как самоорганизованные монослои (SAM), так и о слабоупорядоченных объектах, например твердых растворах, расплавах и биметаллических наночастицах.

В Курчатовском комплексе синхротронно-нейтронных исследований работает экспериментальная синхротронная станция НаноФЭС [1] [2], специализирующаяся на спектроскопических исследованиях образцов. Станция работает в диапазоне энергий фотонов от 25 до 1500 эВ и предназначена для решения фундаментальных задач в области физики твердого тела, науки о поверхности и наносистем, а также для разработки технологических процессов в микро- и нанoeлектронике. На станции реализованы методы фотоэлектронной спектроскопии (PES, UPS), в том числе с угловым разрешением (ARPES), рентгеновской абсорбционной спектро-

скопии (NEXAFS) и сканирующей зондовой микроскопии. Станция оснащена широким спектром дополнительного оборудования для пробоподготовки, очистки и модификации поверхности образцов.

В докладе представлены оптические схемы станций, технические характеристики, экспериментальные возможности, а также примеры наиболее интересных экспериментальных результатов.

1. R. Chumakov, K. Menshikov, A. Lebedev, et al., Acta Crystallogr. Sect. A Found. Adv., **2017**, 73, 567.

2. А. М. Лебедев, К. А. Меньшиков, В. Г. Назин, В. Г. Станкевич, М. Б. Цетлин, Р. Г. Чумаков, Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования, **2021**, 10, 44.

УДК 538.91

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ И ОБЪЕМНОЙ ЧАСТИ МАССИВОВ КРЕМНИЕВЫХ НАНОНИТЕЙ СИНХРОТРОННЫМИ МЕТОДАМИ XANES И XPS**

**А. К. Пелагина<sup>1</sup>, Е. В. Паринава<sup>1</sup>, Д. А. Коюда<sup>1</sup>,  
В. Сиваков<sup>2</sup>, Р. Овсянников<sup>3</sup>, Д. Смирнов<sup>4</sup>, А. Макарова<sup>4</sup>,  
D. Yermukhamed<sup>5</sup>, T. Ming<sup>3</sup>, С. Ю. Турищев<sup>1</sup>**

*pisliaruk@phys.vsu.ru*

<sup>1</sup>*Воронежский государственный университет, Воронеж*

<sup>2</sup>*Лейбниц Институт Фотонных Технологий, Йена, Германия*

<sup>3</sup>*Хельмгольц Центр Берлин, Берлин, Германия*

<sup>4</sup>*Дрезден Университет Технологии, Дрезден, Германия*

<sup>5</sup>*Аль-Фараби Казахстанский Национальный  
Университет, Алматы, Казахстан*

Массивы нанонитевидного кремния (НК), сформированные методом металл-ассистированного жидкофазного химического травления (MAWCE), являются перспективным наноструктурированным объектом. Эти объекты обладают такими физико-химическими свойствами. Перспективными являются и структуры, в которых массивы НК используют

ся для функционализации их чрезвычайно развитой поверхности, которая достигается путем осаждения или покрытия перспективными материалами матрицы нитевидного кремния.

Актуальными вопросами являются исследования атомного и электронного строения экспериментальными рентгеноспектральными методами, дающими прямую информацию о специфике локального атомного окружения и физико-химическом состоянии. Такими методами являются — метод спектроскопии ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения (XANES — X-ray absorption near edge structure) и метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS — X-ray Photoelectron Spectroscopy) Использование высокоинтенсивного синхротронного излучения установок класса «мегасайенс» является необходимым условием регистрации спектров высокого разрешения. С другой стороны, исследования наноструктур, таких как НК, требуют понимания специфики атомного и электронного строения в глубине массива нанообъектов, там, где они имеют развитую поверхность, недоступную в целом для диагностических возможностей метода XANES и XPS и иных методик, обладающих поверхностной чувствительностью (фото- и Оже- электронная спектроскопия, др.).

В работе нами предложен метод, позволяющий получить информацию о физико-химическом состоянии, атомном и электронном строении глубоких слоев. Морфология образцов НК, была изучена методом сканирующей электронной микроскопии. Далее для достижения внутренней («внутри-объемной») части формируемого массива НК поверхностно-чувствительными методами XANES и XPS половина площади поверхности каждого образца механически удалялась путем однократного проведения специально подготовленным лезвием в перчаточном шкафу (glove-box) в инертной атмосфере аргона. Далее механически модифицированные образцы через шлюзовую камеру устанавливались в объем многокамерной системы спектрометра Российско-германского канала синхротронного накопительного кольца BESSY II (Helmotz-Zentrum-Berlin) без контакта с атмосферой.

Были получены Si L<sub>2,3</sub> и ОК спектры XANES, XPS спектры остовных уровней Si 2p высокого разрешения с нетронутой и механически модифицированной частей подготовленных проб. Полученные рентгеноспектральные данные показали различные характеристики локального окружения атомов кремния и кислорода в поверхностной и «объемной» части массива НК, наблюдаемые в силу различия в режимах и особенностях процессов, протекающих при формировании массивов. Продемонстри-

рована применимость предлагаемого способа изучения атомного и электронного строения объемной части наноструктур поверхностно-чувствительными методами.

УДК 538.91

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДА АНАЛИЗА ПРОТЯЖЕННОЙ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ В СИЛЬНО ОГРАНИЧЕННОМ ДИАПАЗОНЕ НА ПРИМЕРЕ $\text{TiO}_2$**

**Э. Ф. Хаметова<sup>1,2</sup>, О. Р. Бакиева<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Удмуртский Государственный Университет, Ижевск, Россия*

*<sup>2</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр*

*Уральского отделения РАН, Ижевск, Россия*

*elina.phanilevna851@gmail.com<sup>✉</sup>, тел.: +7 (965) 585-25-92*

В настоящее время EXELFS (Extended Electron Energy Loss Fine Structure — протяженная тонкая структура спектров энергетических потерь электронов протяженностью до 500 эВ и периодом осцилляций 15—20 эВ) используется для исследования локального окружения легких элементов. Однако на сегодняшний день существует проблема анализа спектров энергетических потерь электронов, содержащих несколько сигналов от возбуждения разных внутренних уровней, расположенных в одном энергетическом диапазоне. Это могут быть сигналы нескольких химических элементов в одном диапазоне кинетических энергий вторичного электрона. В этом случае существует проблема корректной обработки экспериментального сигнала. Ранее данная проблема была решена для спектров, полученных в режиме отражения от поверхности образца — были сделаны модельные расчеты и проведено сравнение с экспериментальными спектрами системы металл-металл [1].

Настоящей работа посвящена решению этой проблемы для экспериментальных спектров, снятых в геометрии эксперимента «на просвет». Предложенная методика позволяет выделять сигналы нескольких химических элементов из одного диапазона энергий. Апробация метода была проведена на EXELFS спектре диоксида титана  $\text{TiO}_2$  — рутила. Предло-

женный алгоритм обработки экспериментальных данных применим к EXAFS спектрам.

1. Nemtsova O., Bakieva O. Electron energy loss spectroscopy equation for spectra with overlapping oscillations and its solution by a regularization method, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2016, 368, 103—111. DOI: 10.1016/j.nimb.2015.12.002

УДК 538.91

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ФУЛЛЕРИТА C60 В ОБЛАСТИ NEXAFS C1S-КРАЯ ПОГЛОЩЕНИЯ

**Р. Н. Скандаков<sup>1✉</sup>, С. В. Некипелов<sup>1</sup>, О. В. Петрова<sup>1</sup>,  
В. Н. Сивков<sup>1</sup>, Д. В. Сивков<sup>1,2</sup>**

*<sup>1</sup>Физико-математический институт, ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,  
Сыктывкар, Россия*

*<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург, Россия  
scanick@yandex.ru<sup>✉</sup>, тел.: +7 (908) 329-60-82*

Фундаментальной характеристикой материала является спектральная зависимость коэффициента преломления (рефракции)  $n(E)$  в области ближней тонкой структуры рентгеновского фотопоглощения (near edge X-ray absorption fine structure, NEXAFS). В области резонансного фотопоглощения не представляется возможным непосредственное измерение  $n(E)$  из-за его малой величины ( $\sim 10^{-6}$ ), поэтому необходимо использовать косвенные методы, одним из которых является применение соотношений Крамерса-Кронига (Kramers–Kronig relations, KKR) [1, 2]. KKR позволяют определить  $n(E)$  в области NEXAFS путём интегрирования сечения поглощения  $\sigma(E)$ , которое может быть измерено в широком интервале энергий от 0 до 100 кэВ. Из спектров  $n(E)$ ,  $\sigma(E)$  могут быть определены спектральные зависимости коэффициентов отражения, фазового сдвига и атомного

форм-фактора. В работе проведены измерения спектральной зависимости сечения поглощения в области NEXAFS C1s края поглощения фуллерита C60, а для расчетов оптических постоянных использованы табличные данные по сечениям вне области резонансного поглощения и литературные данные по сечениям фуллерита C60 в оптической области спектра [3].

В работе выполнены расчеты спектральной зависимости коэффициента рефракции  $n(E)$  в области C1s порога ионизации фуллерита C60. Для получения этой спектральной зависимости необходимо иметь данные по сечениям поглощения в широком спектральном интервале. Для расчетов были использованы табличные данные по сечениям поглощения атома углерода в широком интервале 10—30 000 эВ вне краев поглощения [3] и в области энергий 0—120 эВ из работ [4—6]. В области C1s порога ионизации (280—350 эВ) использовались спектральные зависимости сечения поглощения, измеренные на Русско-Немецком канале выхода и монохроматизации излучения на BESSY II. Сечения поглощения в области энергий выше 30 КэВ были получены путем экстраполяции степенной зависимостью данных в диапазоне 10—30 КэВ из работы [3]. Все используемые данные по сечениям поглощения были приведены к абсолютной шкале в Мегабарнах согласно методике описанной ранее [7, 8].

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента РФ (МК-3796.2021.1.2), РФФИ и Республики Коми в рамках научных проектов № 19-32-60018 и 20-42-110002 р-а и Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения № 075-15-2021-1351 в части исследований NEXAFS-спектроскопии.*

1. Kramers H. A., *Atti Congr. Intern. Fisica. Como.*, 1927, 2, 545—557.
2. Kronig R., *J. Opt. Soc. Am.*, 1926, 12, 547—557.
3. Henke B. L., Gullikson E. M., Davis J. C., *At. Data Nucl. Data Tables*, 1993, 54, 181—343.
4. Kaffle B. P., Katayanagi H., Prodhan S. I. et al, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 2008, 77, 014—302.
5. Jaensch R., Kamke W., *Mol. Mat.*, 2000, 13, 163—172.
6. Yasumatsu H., Kondow T., Kitagawa H. et al, *J. Chem. Phys.*, 1996, 104, 899.
7. Kummer K., Sivkov V. N., Vyalikh D. V. et al, *Phys. Rev.*, 2009, 80, 155—433.
8. Sivkov D. V., Petrova O. V., Mingaleva A. E. et al, *Nanomaterials.*, 2020, 10, 374.

*Научное издание*

ВЫСОКОТОЧНАЯ ДИАГНОСТИКА  
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ:  
ЛАБОРАТОРНЫЕ И СИНХРОТРОННЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ

Сборник тезисов  
I Всероссийской молодежной конференции  
(г. Воронеж, 13—15 декабря 2021 г.)

Издание публикуется в авторской редакции

Подписано в печать 15.12.2021. Формат 60 × 84/16  
Усл. печ. л. 3,49. Тираж 100 экз. Заказ 268

ООО Издательско-полиграфический центр «Научная книга»  
394018, г. Воронеж, ул. Никитинская, 38, оф. 308  
Тел.: +7 (473) 200-81-02, 200-81-04  
<http://www.n-kniga.ru> E-mail: [zakaz@n-kniga.ru](mailto:zakaz@n-kniga.ru)

Отпечатано в типографии ООО ИПЦ «Научная книга»  
394026, г. Воронеж, Московский пр-т, 11/5  
Тел.: +7 (473) 220-57-15, 296-90-83  
<http://www.n-kniga.ru> E-mail: [typ@n-kniga.ru](mailto:typ@n-kniga.ru)

ISBN: 978-5-4446-1650-5



9 785444 616505