

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»



Сборник тезисов докладов
Молодежная Школа
по физике конденсированного состояния
(Школа ФКС-2026)

23 - 27 марта 2026 года, Санкт-Петербург, Зеленогорск

Гатчина, 2026

В данном выпуске представлены тезисы докладов Молодежной Школы по физике конденсированного состояния (Школа ФКС-2026), 23 - 27 марта 2026 года, Гатчина.

Сборник подготовили: Губанова Н.Н., Васильев А.И., Васильева В.Н.

Организатор: НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ

Программный комитет:

Воронин Владимир Владимирович, д.ф.-м.н. (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ) - председатель программного комитета;

Аристов Дмитрий Николаевич, д.ф.-м.н. (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ) - сопредседатель программного комитета.

Авдеев Михаил Васильевич, д.ф.-м.н. (ОИЯИ);

Волков Владимир Владимирович, д.х.н. (КККиФ НИЦ «Курчатовский институт»);

Григорьев Сергей Валентинович, д.ф.-м.н. (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ);

Демишев Сергей Васильевич, д.ф.-м.н. (ИФВД РАН);

Дмитриенко Владимир Евгеньевич, д.ф.-м.н. (КККиФ НИЦ «Курчатовский институт»);

Зобкало Игорь Александрович, к.ф.-м.н. (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ);

Кравцов Евгений Алексеевич, д. ф.-м. н. (ИФМ УрО РАН);

Кулевой Тимур Вячеславович, д.т.н. (НИЦ «Курчатовский институт» - ККТЭФ)

Курбаков Александр Иванович, д.ф.-м.н. (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ);

Марченков Никита Владимирович, к.ф.-м.н. (НИЦ «Курчатовский институт»);

Мушников Николай Варфоломеевич, д.ф.-м.н., акад. РАН (ИФМ УрО РАН);

Ниязов Рамиль Асхатович, к.ф.-м.н. (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ);

Рогожкин Сергей Васильевич, д.ф.-м.н. (НИЦ «Курчатовский институт»);

Савицкая Наталья Евгеньевна, д.ф.-м.н. НИЦ («Курчатовский институт» - ПИЯФ);

Смирнов Александр Иванович, д.ф.-м.н., член-кор. РАН (ИФП РАН);

Стишов Сергей Михайлович, д.ф.-м.н., акад. РАН (ИОФ РАН);

Чубова Надежда Михайловна, к.ф.-м.н. (НИЦ «Курчатовский институт»).

Организационный комитет:

Васильева Виктория Николаевна (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ),
председатель оргкомитета;

Васильев Андрей Иванович (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ), техническое обеспечение;

Губанова Надежда Николаевна (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ), техническое обеспечение;

Дьячков Максим Вадимович (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ), техническое обеспечение;

Земскова Елена Алексеевна (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ), финансовые вопросы;

Матвеев Василий Александрович (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ), техническое обеспечение;

Никитина Наталия Владимировна (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ), визовая поддержка;

Пшеничный Кирилл Александрович (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ), информационное обеспечение;

Усманов Олег Вадимович (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ), техническое обеспечение;

Галактионова Татьяна Викторовна (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ), экономические вопросы.

Примечание: материалы напечатаны в авторской редакции.

© НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, 2026

Нейросетевая аппроксимация электронного энергетического вклада в кооперативной модели Яна–Теллера

Г.Г. Аганин, К.Ю. Терентьев

НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

УДК: 530.145; 004.8, 538.9

В работе представлена реализация и обучение нейросетевой модели для аппроксимации электронного энергетического вклада в двумерной кооперативной модели Яна–Теллера на квадратной решётке. Цель исследования состоит в замене вычислительно затратного точного диагонализирования электронного гамильтониана при расчёте энергии и сил, используемых в стохастической динамике решётки, на быстрый нейросетевой предсказатель при сохранении симметрий и воспроизводимости, задаваемых параметрами базовой модели.

Физическая часть включает кинетический вклад электронов и локальное электрон-фононное взаимодействие с тремя модами в узле: дыхательной модой и двумя компонентами Ян-Теллеровской моды. Для заданной конфигурации полей Q строится электронный гамильтониан, выполняется его диагонализация, после чего вычисляются энергия основного состояния при фиксированном заполнении и электронные силы как градиент энергии по модам. Корректность вычисления сил подтверждена тестом конечных разностей, демонстрирующим согласование аналитического и численного градиентов при малом шаге.

Для локального представления введён дескриптор, отображающий дискретную окрестность узла радиуса в вектор фиксированной длины. Дескриптор построен на разложении локальных паттернов мод по неприводимым представлениям группы симметрии D_4 и формировании инвариантов, включая фазовую привязку к референс-коэффициентам и референс-биспектральные комбинации. Реализация валидирована набором тестов: инвариантность относительно всех восьми операций D_4 для всех узлов решётки, ковариантность относительно трансляций при периодических граничных условиях, детерминизм вычислений и численная устойчивость в предельных конфигурациях.

Модель на основе MLP (многослойный перцептрон) обучается предсказывать локальный вклад электронной энергии по дескриптору узла, суммирование локальных вкладов даёт приближение полной электронной энергии. Электронные силы получаются автоматическим дифференцированием суммарной энергии по полям Q . Функция потерь включает среднеквадратичные отклонения по энергии и силам, обеспечивая согласованность обучения по энергии и её градиенту. Обучающий набор сформирован из трёх классов конфигураций: случайных состояний, промежуточных состояний релаксации и состояний, близких к равновесным, что повышает покрытие пространства конфигураций и устойчивость обобщения. Обученная модель сохраняет требуемые симметрии за счёт инвариантного дескриптора и воспроизводит электронные силы с малой ошибкой на валидации. Практический результат заключается в существенном ускорении вычисления энергии и сил по сравнению с ED-расчётом (точная диагонализация), что обеспечивает возможность моделирования длительных траекторий динамики и последующей количественной валидации характеристик кооперативного орбитального порядка, в частности по корреляционным функциям и структурному фактору.

1. Ghosh S., Zhang S., Cheng C., Chern G.-W. Kinetics of orbital ordering in cooperative Jahn–Teller models: Machine-learning enabled large-scale simulations // *Physical Review Materials*. 2024. Vol. 8. 123602.
2. Maezono R., Nagaosa N. Jahn–Teller effect and electron correlation in manganites // *Physical Review B*. 2003. Vol. 67. 064413.

Теория неупругого рассеяния света в наночастицах неполярных кристаллов с беспорядком

Д.Д. Алексеев^{1,2}, А.Г. Яшенкин^{1,2}, О.И. Утесов³, С.В. Коняхин^{3,4}

¹*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

²*НИИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина*

³*Center for Theoretical Physics of Complex Systems, Institute for Basic Science, Daejeon, Republic of Korea*

⁴*Basic Science Program, Korea University of Science and Technology, Republic of Korea*

УДК: 543.424.2, 620.22-022.532, 538.9

Спектроскопия рамановского рассеяния света широко применяется для исследования наночастиц, однако традиционная феноменологическая модель фононного конфайнмента (PCM) не позволяет корректно описывать ряд наблюдаемых эффектов. В работе рассматриваются современные микроскопические подходы к анализу рамановских спектров неполярных нанокристаллов.

Метод основан на решении уравнения Клейна–Фока–Гордона в евклидовом пространстве (ЕКFG), интерпретируемого как континуальная теория упругости для оптических фононов. Такой подход обеспечивает вычислительную эффективность и позволяет последовательно учитывать влияние геометрических параметров наночастиц (их размера и формы) на положение и профиль рамановских пиков. В сочетании с микроскопическим определением материальных параметров модель ЕКFG демонстрирует хорошее согласие с экспериментальными спектрами наночастиц.

Развитие теории позволило включить в рассмотрение структурный беспорядок. Показано, что точечные дефекты, такие как вакансии и примесные атомы, вызывают не только уширение линий спектра, но и дополнительный сдвиг частоты, величина и знак которого определяются типом дефекта.

Предложенный формализм создаёт основу для описания более сложных систем – композитных наночастиц алмаза и частиц с частично-аморфизированной поверхностью. Для таких объектов характерно формирование сложных спектральных контуров, обусловленных суперпозицией вкладов кристаллического ядра и разупорядоченной оболочки. Континуальный метод ЕКFG и его решёточный аналог метод динамической матрицы (DMM) представляют собой физически обоснованную альтернативу упрощённым моделям и открывают возможности для интерпретации побочных пиков и аномального уширения в рамановских спектрах наночастиц.

1. S.V. Koniakhin, O.I. Utesov, I.N. Terterov, A.V. Siklitskaya, A.G. Yashenkin, D. Solnyshkov. Raman spectra of crystalline nanoparticles: replacement for the phonon confinement model // J. Phys. Chem. C 2018. V. 122. P. 19219.

2. O.I. Utesov, A.G. Yashenkin, S.V. Koniakhin. Raman spectra of nonpolar crystalline nanoparticles: elasticity theory-like approach for optical phonons // J. Phys. Chem. C. 2018. V. 122. P. 22738.

3. O.I. Utesov, A.G. Yashenkin, S.V. Koniakhin. Lifetimes of confined optical phonons and the shape of a Raman peak in disordered nanoparticles. I. Analytical treatment // Phys. Rev. B. 2020. V. 102. P. 205421.

4. S.V. Koniakhin, O.I. Utesov, A.G. Yashenkin. Lifetimes of confined optical phonons and the shape of a Raman peak in disordered nanoparticles. II. Numerical treatment // Phys. Rev. B. 2020. V. 102. P. 205422.

Магнитные свойства гексаферрита стронция, допированного РЗЭ: синтез и моделирование

М.М. Байтемиров¹, Ся Цзытянь², А.А. Митрофанов¹, А.А. Елисеев¹

¹Химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

²Факультет наук о материалах МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

УДК:538.955, 546.05

Гексаферриты являются перспективными материалами, обладающими высокой коэрцитивной силой при наноразмерах. Одним из способов улучшения магнитных свойств является допирование другими элементами, в том числе и редкоземельными. На данный момент в литературе существует более 340 примеров замещенных лантанидами гексаферритов М-типа [1]. Однако зависимость от степени замещения и самого допанта не очевидна. Также, несмотря на большое количество различных методов синтеза, в литературе практически отсутствуют данные по получению коллоидных растворов на основе однодоменных наночастиц.

В данной работе на основании литературных данных были применены методы машинного обучения для прогнозирования коэрцитивной силы частиц, для дополнения и проверки набора данных были получены и исследованы коллоидные растворы гексаферрита стронция, замещенного на европий и другие РЗЭ в позиции M^{2+} .

В качестве модели машинного обучения был взят градиентный бустинг [2]. На вход модели подавался состав и параметры синтеза (метод, температура отжига, время выдержки). Наилучшая модель демонстрирует метрики качества $R^2=0.897$ и $RMSE=691$ Э.

Для синтеза данных соединений использовался метод кристаллизации стекла с последующим растворением матрицы для получения коллоидных растворов. На каждой из стадий образцы исследовали методами РФА и магнетометрии.

В зависимости от выбранной боратной матрицы результаты синтеза крайне различаются. В матрице состава типа $SrFe_{12}O_{19} \cdot 12Sr_2B_2O_5$ образуется гексаферрит с примесями ферригидрита, исчезающий при увеличении степени допирования. При дальнейшем замещении возрастает как коэрцитивная сила, так и намагниченность насыщения. В матрице состава $SrFe_{12}O_{19} \cdot 24SrB_2O_4$ основным продуктом оказывается $\epsilon-Fe_2O_3$ с примесями $\gamma-Fe_2O_3$.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-73-10045.

1. Lobo-Guerrero A. et al. M-type hexaferrites: A review of the impact of rare earth substitution on magnetic properties // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2025. Т. 627. С. 173132.
2. Friedman J. H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine // Annals of statistics. 2001. С. 1189-1232.

Локальная атомная структура наноразмерных соединений Ti-C

О.Р. Бакиева, Т.З. Гусейнов, И.К. Аверкиев

Удмуртский ФИЦ УрО РАН, Ижевск

УДК: 538.971

Двумерные материалы обладают уникальными физическими свойствами – высокой проводимостью, прочностью, оптическими характеристиками и т.п. Этот класс открывает новые возможности для разработки инновационных решений в области нанотехнологий с целью применения в медицине, электронике, энергетике и многих других областях.

Локальная атомная структура является одной из ключевых характеристик исследуемого вещества, особенно двумерных материалов. В настоящей работе проведено исследование локального атомного окружения титана и углерода, скоординированных в двуслойных и трехслойных листах наноразмерного масштаба. Исследование проведено с помощью спектроскопии протяженных тонких структур энергетических потерь электронов (EXELFS – Extended Energy Electron Loss Fine Structure). На Оже-электронном микроанализаторе Jamp 10S (Jeol) были получены спектры за M_{2,3} краем возбуждения титана и K краем углерода. Энергия падающего электронного пучка подбиралась таким образом, чтобы спектры энергетических потерь для атомов титана и углерода регистрировались с одной глубины анализа. Проведён количественный анализ полученных EXELFS спектров, определены параметры локальной атомной структуры – межатомные расстояния, координационные числа, параметры тепловой дисперсии атомов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (регистрационный номер 124021900017-1). Использовалось оборудование ЦКП «Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий» УдмФИЦ УрО РАН.

Магнонный тепловой эффект Холла в скирмионном кристалле

Ю.В. Барамыгина¹, Д.Н. Аристов^{1,2}

¹НИИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

²Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург

УДК: 537.61, 538.931

Магнитные скирмионы – это топологически нетривиальные вихри локальной намагниченности. В широком спектре материалов они упорядочиваются в решётки, так называемые скирмионные кристаллы (СкК). Спектр элементарных возбуждений СкК также обладает нетривиальной топологией. Топологические свойства спектра приводят к возникновению в системе ряда уникальных явлений, одним из которых является тепловой эффект Холла (ТЭХ) магнонов. Этот эффект заключается в появлении потока тепла, перпендикулярного созданному в системе градиенту температуры.

Механизм появления ТЭХ в системе, где отсутствуют свободные носители заряда, предполагает наличие особых свойств системы. Например, было теоретически предсказано наличие теплового эффекта Холла магнонов в двумерном ферромагнетике со структурой решётки Кагомэ [1]. В 2022 году были опубликованы результаты эксперимента по обнаружению теплового холловского отклика в СкК [2].

В настоящей работе рассматривается двумерная модель ферромагнетика со взаимодействием Дзялошинского-Мории и внешним магнитным полем. В такой модели в некотором диапазоне параметров реализуется фаза скирмионного кристалла. Исследуется магнонный спектр СкК в подходе стереографической проекции [3]. Такой подход позволяет представить функцию, описывающую СкК, в виде суммы функций одиночных скирмионов. Отдельные ветки спектра магнонов соответствуют различным деформациям одиночных скирмионов в кристалле. Топологические свойства спектра определяются наличием таких ненулевых характеристик как кривизна Берри и числа Черна.

Мы предлагаем аналитический вывод формулы для коэффициента холловской теплопроводности в двумерной модели СкК. Исследуется линейный отклик системы на внешнее возмущение в виде градиента температуры. Полученное выражение содержит кривизну Берри, что говорит о топологическом происхождении теплового эффекта Холла в предложенной модели.

1. Katsura H., Nagaosa N., Lee P. A. Theory of the thermal Hall effect in quantum magnets // *Physical review letters*. 2010. Т. 104. №. 6. С. 066403.
2. Akazawa M. et al. Topological thermal Hall effect of magnons in magnetic skyrmion lattice // *Physical Review Research*. 2022. Т. 4. №. 4. С. 043085.
3. Timofeev V. E., Aristov D. N. Magnon band structure of skyrmion crystals and stereographic projection approach // *Physical Review B*. 2022. Т. 105. №. 2. С. 024422.

Получение ориентированных гетероструктур SiC/Au/Si на основе Si вискером

Н.А. Башлыков, И.С. Волчков, А.С. Асваров, В.М. Каневский

НИЦ «Курчатовский институт», Москва

УДК: 621.315.592.2; 548.522; 620.22, 538.9

Карбид кремния (SiC) является широкозонным полупроводником ($E_g \sim 2.4\text{--}3.2\text{eV}$ [1]) с непрямозонной структурой. Существует большое количество политипов структур на основе SiC: кубический 3C-SiC, и гексагональные 4H-SiC и 6H-SiC. Каждый из описанных политипов за счет своих уникальных свойств находит применение в различных областях микро- и нанoeлектроники. Применение в МОП-транзисторах и устройствах полевой эмиссии обуславливает интерес в получении тонких плёнок и наноструктур SiC с заданным структурным политипом на Si-подложках или на различных микро- и наноструктурах, например, таких как вискеры.

В настоящей работе объектом исследования работы являлись массивы микровискером SiC/Au/Si, методика получения которых состоит из следующих стадий:

1. Выращивание вискером Au/Si газовой фазой осаждением по механизму пар-жидкость-кристалл;

2. Нанесение тонкого слоя углерода посредством высокотемпературного отжига в присутствии смеси газов H_2/CH_4 в трёх соотношениях 15:160, 15:200, 15:260 для получения разной толщины углеродного покрытия.

Исследование структур проводилось методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией и спектроскопией комбинационного рассеяния, а также методом рентгенофазового анализа.

Было обнаружено, что на этапе нанесения пиролитического углерода только часть исходных вискером оказывалась покрытой слоем графеноподобного углерода. При этом доля покрытых углеродом вискером зависела от состава подаваемой смеси газов. Дальнейшие исследования показали, что покрытые вискеры характеризовались поллой структурой, а также изменением областей локализации золота. Мы полагаем, что такое видоизменение связано с реакцией осаждаемого углерода с материалом вискером, приводящей к образованию на поверхности покрытых вискером тонких слоев карбида кремния со структурой 6H-SiC. В то же время, вискеры, на поверхности которых не было обнаружено осажденного углерода, сохранили свою монокристаллическую структуру с нарушением внешней морфологии. Результаты работы позволяют говорить о возможности двухстадийного управляемого синтеза ориентированных гибридных планарных структур типа core/shell на основе SiC/Au/SiC.

Коллектив Авторы выражает благодарность коллегам из лаборатории НаноЭлектроМагнетизма НИИ ЯП БГУ за нанесение слоев пиролитического углерода.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

1. Cimalla V. et al. Group III nitride and SiC based MEMS and NEMS: materials properties, technology and applications // Journal of Physics D: Applied Physics. 2007. Vol. 40 (20). P. 6386 – 6434.

Лагранжев подход к описанию динамики локальной намагниченности

Д.А. Бедяев^{1,2}, В.Е. Тимофеев^{1,2}

¹НИИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

УДК: 537.9, 538.9

В последние годы особое место в физике конденсированных сред занимают объекты и явления, существенную роль в которых играет топология. Магнитные скирмионы – пример такого объекта [1]. Квазидвумерные топологически нетривиальные вихри локальной намагниченности отличаются от других равновесных конфигураций ненулевым топологическим индексом. Это значит, что магнитный скирмион невозможно непрерывно трансформировать в однородно намагниченное состояние (или магнитную спираль). Известно, что в киральных магнетиках скирмионы могут упорядочиваться в регулярные решётки, т.н. скирмионные кристаллы. С практической точки зрения решётки магнитных скирмионов интересны благодаря возможности технологического применения в магноники, для создания устройств переноса и обработки информации посредством магновов – элементарных возбуждений локальной намагниченности.

Работа посвящена исследованию динамики локальной намагниченности магнитных скирмионов в рамках лагранжевого формализма. Показано, что уравнения Эйлера-Лагранжа эквивалентны уравнению Ландау-Лившица-Гильберта. Статические конфигурации скирмионных кристаллов были построены в подходе стереографической проекции, когда образ мультискирмионной конфигурации может быть представлен в виде стереографических образов отдельных скирмионов [2].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-00083.

1. Belavin A.A., Polyakov A.M. Metastable states of two-dimensional isotropic ferromagnets // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. 1975. V. 22. P. 245.
2. Timofeev V.E., Aristov D.N. Magnon band structure of skyrmion crystals and stereographic projection approach // Phys. Rev. B. 2022. V. 105. P. 024422.

Структура и однородность тонких пленок CdTe, выращенных методами молекулярно-лучевой эпитаксии и высоковакуумного термического напыления

Е.А. Белов^{1,2}, И.С. Волчков¹, И.О. Кошелев¹, В.М. Каневский¹

¹Отделение института Кристаллографии им. А.В. Шубникова Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», Москва

²МИРЭА - Российский технологический университет, Москва

УДК: 539.234, 538.911, 548.33

Теллурид кадмия – полупроводник, обладающий оптимальной шириной запрещённой зоны, $E_g \approx 1,45\text{--}1,5$ эВ при 300 К, совпадающей с максимумом солнечного спектра, что обуславливает его широкое применение в производстве высокоэффективных солнечных батарей. Для применения фотоэлектронных преобразователей 2 поколения используются тонкопленочные структуры, в том числе на основе CdTe. При этом существует значительное количество методов получения тонких пленок, такие как методы электрохимического, химического и термического осаждения, лазерной абляции и т.п. Кинетика осаждения CdTe будет отличаться в зависимости от метода синтеза. Кроме того, однородность, структура, морфология поверхности и шероховатость тонких пленок также будут отличаться в зависимости выбранного метода синтеза. Это обуславливает интерес к исследованиям особенностей кинетики осаждения тонких пленок, полученных различными методиками.

В работы исследовались тонкие пленки CdTe, полученные методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и высоковакуумного термического напыления (ВТН). В качестве подложечного материала использовался Al_2O_3 (0001) с шероховатостью не более 0.2 нм. Целью работы являлось комплексное сравнение структуры, состава и состояния поверхности тонких пленок CdTe, выращенных методами МЛЭ и ВТН. Для решения поставленных задач был применен ряд методов: растровая электронная микроскопия (РЭМ) и атомно-силовая микроскопия (АСМ) для изучения морфологии поверхности, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДС) для определения элементного состава, рентгенофазовый анализ (РФА) для исследования кристаллической структуры и спектроскопия комбинационного рассеяния (Рамановская спектроскопия).

Однородность распределения элементов по поверхности тонких пленок исследовалась методом ЭДС. Результатом анализа являлись карты распределения элементов и таблицы количественного содержания кадмия (в атомных процентах) по поверхности образца с шагом измерения менее 1 мм. Обсуждаются различия шероховатости, а также фазового состава пленок, в том числе связь условий роста тонких пленок с толщинами, размерам кристаллитов и величинами микронапряжений. Последние были оценены с использованием методами АСМ, а также расчетов по результатам РФА с использованием оценок по методике Уильямсона-Холла.

Полученные результаты показывают различия в кинетике осаждения тонких пленок при использовании различных методов термического осаждения, а также говорят о связи особенностей кинетики с дефектной структурой пленок.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

**Влияние состава на эффект резистивного переключения в тонких пленках
нестехиометрических оксидов TiO_x**

А.Н. Бельтюков, А.И. Чукавин, Р.Г. Валеев, Т.С. Картапова

УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск

УДК: 538.9

Изменение сопротивления при протекании тока через тонкую пленку оксидов переходных металлов (в том числе и оксида титана) обусловлено миграцией кислородных вакансий, образующих проводящие пути. Поэтому стехиометрический состав оксидной пленки оказывает существенное влияние на эффекты резистивного переключения. В работе тонкие пленки оксида титана осаждались методом магнетронного напыления в среде с различным содержанием кислорода (1, 3 и 5%). Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии было показано, что полученные пленки представляют собой нестехиометрические оксиды титана с различным соотношением компонент Ti^{2+} и Ti^{3+} , а в образце, полученном при 1% кислорода, наблюдается также металлическая составляющая Ti^0 [1]. Для исследования электрических характеристик пленки осаждались на подложки с предварительно осажденным слоем золота, выполняющим роль нижнего контакта. Измерения проводились на атомно-силовом микроскопе NTegra-Solaris (NT MDT) проводящим зондом с золотым напылением. При анодной поляризации в образцах с металлической составляющей происходило формирование nanoостровков, что связывается с локальным доокислением пленки. Также было показано, что с увеличением содержания компоненты Ti^{3+} увеличивается сопротивление пленок и напряжение переключения из высокоомного в низкоомное состояние.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ №124021900017-1. Использовалось оборудование ЦКП «Поверхность и новые материалы» УдмФИЦ УрО РАН.

1. Beltiukov A.N., Chukavin A.I., Kartapova T.S., Valeev R.G. Double-angle x-ray photoelectron spectroscopy depth profiling of nonstoichiometric tiox thin films with resistive switching behavior. // ACS Applied Electronic Materials. 2026. Vol. 8, no. 2. P. 774–782.

Модернизация алгоритмов обработки данных численного эксперимента по малоугловому рассеянию нейтронов

Р.Д. Борисов^{1,2}, Л.А. Азарова^{1,2}

¹ НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

УДК: 53.08, 519.688, 538.9

Метод малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) является признанным инструментом исследования структурных неоднородностей вещества на масштабах 1–1000 нм. Он позволяет анализировать ключевые структурные характеристики материалов: размеры и морфологию нанообъектов, межчастичные взаимодействия, архитектуру молекулярных ансамблей, кластерных систем и пр. [1]. Актуальность метода стимулирует развитие математического моделирования МУРН экспериментов, являющимся ключевым инструментом для проектирования и оптимизации исследовательских установок.

Доклад посвящен разработке и модернизации алгоритмов первичной обработки, напрямую влияющих на эффективность интерпретации экспериментальных данных и, как следствие, на качество полученных результатов. В основу работы легли данные, полученные в ходе серии численных экспериментов в программном пакете McStas.

В работе рассмотрены два способа проведения МУРН эксперимента: монохроматический и времяпролетный (TOF). В отличие от традиционной монохроматической схемы, в TOF МУРН используется широкий рабочий спектр, что существенно расширяет доступный диапазон переданных импульсов Q , однако усложняет обработку за счет дополнительной степени свободы – длины волны нейтрона, определяемой по времени его регистрации на детекторе.

Предложенный алгоритм, реализованный на языке Python, был протестирован на модели раствора монодисперсных твердых сфер радиусами порядка 100–1000 Å. Для формирования импульсной структуры пучка в TOF конфигурации применялась система прерывателей типа «слепая пара» [2], для монохроматизации – многодисковой селектор скоростей. Результатом работы стал программный модуль, обеспечивающий редукцию данных с высокой точностью и сохранением статистической значимости экспериментальных точек при построении итоговых кривых рассеяния $I(Q)$.

1. Schmatz W. et al. Neutron small-angle scattering: experimental techniques and applications // Applied Crystallography. 1974. Т. 7. №. 2. С. 96-116.
2. Van Well A. A., Fredrikze H. On the resolution and intensity of a time-of-flight neutron reflectometer // Physica B: Condensed Matter. 2005. Т. 357. №. 1-2. С. 204-207.

Температурный интервал угловой магнитной фазы Γ_{24} спин-ориентационного перехода $\Gamma_4 \leftrightarrow \Gamma_2$ в смешанных редкоземельных ортоферритах

А.И. Брулёв, Р.М. Дубровин, И.А. Елисеев, Р.В. Писарев

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

УДК: 537.611.45, 538.9

Несмотря на значительные успехи полупроводниковых устройств памяти, большая часть информации в мире по-прежнему хранится на магнитных носителях. Таким образом, поиск наиболее быстрых магнитных методов чтения и записи данных остаётся ключевой задачей современного магнетизма. Перспективным решением которой является использование антиферромагнетиков, обладающих более быстрой спиновой динамикой, по сравнению с традиционно используемыми ферромагнетиками. Особое внимание среди антиферромагнетиков уделяется редкоземельным ортоферритам $R\text{FeO}_3$, сочетающим в себе поразительное разнообразие физических явлений, таких как слабый ферромагнетизм, обусловленный взаимодействием Дзялошинского-Мории, мультиферройность, линейный магнитоэлектрический эффект и многие другие. Ключевой особенностью ортоферритов является реализация различных магнитных структур подрешетки железа ниже температуры Нееля $T_N \approx 650$ К. Наиболее общими фазами являются Γ_4 и Γ_2 , в которых спины ионов Fe^{3+} ориентированы вдоль осей a и c ромбической группы $Pbnm$, соответственно. Переход между структурами происходит через угловую фазу Γ_{24} , в которой спины ионов Fe^{3+} непрерывно поворачиваются в плоскости ac [1]. Температуры спин-ориентационных переходов T_1 для $\Gamma_4 \leftrightarrow \Gamma_{24}$ и T_2 для $\Gamma_{24} \leftrightarrow \Gamma_2$, а также ширина температурного интервала $\Delta T = T_1 - T_2$ угловой фазы Γ_{24} , существенно зависят от типа редкоземельного иона. Наиболее высокие температуры переходов наблюдаются в SmFeO_3 , где $T_1 \approx 360$ К и $T_2 \approx 330$ К с $\Delta T \approx 30$ К, тогда как в TbFeO_3 они крайне низкие и составляют $T_1 \approx 9$ К и $T_2 \approx 8$ К с $\Delta T \approx 1$ К [2]. Целью данной работы является выявление механизмов, определяющих ширину температурного интервала ΔT угловой фазы Γ_{24} при изовалентном замещении редкоземельных ионов на примере смешанного ортоферрита $\text{Sm}_{0.55}\text{Tb}_{0.45}\text{FeO}_3$.

Спиновая динамика ортоферритов в центре зоны Бриллюэна, активная при комбинационном рассеянии света, представлена квази-ферромагнитной и квази-антиферромагнитной модами с характерными частотами ≈ 10 и ≈ 20 см^{-1} , соответственно. В ходе спин-ориентационного перехода $\Gamma_4 \leftrightarrow \Gamma_{24} \leftrightarrow \Gamma_2$ меняются правила отбора для магнитных возбуждений по поляризациям, при этом квази-ферромагнитная мода является мягкой. Таким образом, поляризационная спектроскопия комбинационного рассеяния света, использованная в работе, представляет собой эффективный метод для экспериментального изучения спин-ориентационных переходов. Исследования проводились на пластинках монокристалла $\text{Sm}_{0.55}\text{Tb}_{0.45}\text{FeO}_3$ с различной ориентацией в широком диапазоне температур. Анализ спектров позволил выявить аномально большую ширину температурного интервала $\Delta T \approx 220 - 130 \approx 90$ К угловой фазы Γ_{24} . Кроме того, большие значения ΔT наблюдались и в других смешанных ортоферритах, причём ширина интервала возрастает с увеличением степени замещения редкоземельных ионов [3]. Теоретический анализ позволил установить, что температуры T_1 , T_2 и, следовательно, интервал ΔT определяются значением эффективной анизотропии, величина которой, увеличивается при изовалентном замещении в результате случайного распределения редкоземельных ионов. Полученные результаты имеют большое значение для понимания механизмов спин-ориентационных переходов в редкоземельных ортоферритах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 24-72-00106.

1. Li X. et al. Terahertz spin dynamics in rare-earth orthoferrites // *Photon. Ins.* 2022. V. 1 (2). P. 1-56.
2. Li Q. et al. Recent advances of rare earth orthoferrite RFeO_3 magneto-optical single crystals // *J. Cryst. Growth.* 2025. V. 649. P. 1-13.
3. Dubrovин R.M. et al. Spin and lattice dynamics at the spin-reorientation transitions in the rare-earth orthoferrite $\text{Sm}_{0.55}\text{Tb}_{0.45}\text{FeO}_3$ // *Phys. Rev. B.* 2025. V. 112. P. 174419.

Композиционные материалы для мягкой робототехники на основе полиуретанов и функциональных нанонаполнителей

А.Н. Бугров^{1,2}

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИВС, Санкт-Петербург

² СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

УДК: 621.318.13; 541.143/.144.8, 538.9

Макромолекулы сегментированных полиуретанов (СПУ) состоят из чередующихся химически связанных друг с другом гибких и жестких блоков разной природы, что обеспечивает их микрофазовое разделение и приводит к формированию доменной структуры. Особенности надмолекулярной организации СПУ, где ассоциаты жестких блоков действуют как физические узлы сшивки для гибких фрагментов цепи, способствуют проявлению в такого рода полимерах эффекта памяти формы (ЭПФ). Полимеры с ЭПФ, будучи новым классом адаптивных материалов, получили широкое распространение в биомедицинских устройствах, аэрокосмическом приборостроении, текстильной промышленности и электронной технике из-за высокой извлекаемой деформации, низкой плотности, простой процедуры программирования формы. Известны СПУ с ЭПФ, где переключение между временной и постоянной формами происходит под действием температуры, рН среды, света, электрического тока и магнитного поля. Наиболее перспективными бесконтактными способами переключения являются индукционный нагрев и фотохимические превращения.

В данной работе были синтезированы СПУ на основе симметричных и ассиметричных диизоцианатов, сложных и простых полиэфиров, а также диаминов разного химического строения. Для эффективного разогрева полученных СПУ с ЭПФ, методом гидротермального синтеза были синтезированы суперпарамагнитные наночастицы ферритов, которые впоследствии подвергались поверхностной модификации и вводились в количестве необходимом для достижения порога перколяции в полимер в процессе поликонденсации *in-situ*. В результате были получены магнитоактивные эластомеры, которые эффективно разогревались в переменном магнитном поле в течении минуты выше 200°C. Кроме того, были синтезированы светочувствительные СПУ на основе азобензолсодержащих удлинителей цепи, а также низкомолекулярных диолов с фотодимеризуемыми группами в боковых цепях, что позволило под действием излучения определенной длины волны обратимо менять механические и поверхностные свойства полимерного материала.

Фотоэлектрические свойства пористого карбида кремния

Д.С. Бузаль, А.В. Щербак

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, Самара
УДК: 537.311.322, 538.9

Применение наноструктурированных материалов, таких как пористый кремний (ПК) и пористый карбид кремния, открывает перспективы для повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей. Фотоэлектрические преобразователи на основе пористого карбида кремния могут обладать более высокой энергетической эффективностью, что делает их привлекательными для использования в солнечных батареях, также они могут быть перспективными для работы в экстремальных условиях [1].

Целью данной работы было исследование влияния карбидизации пористого слоя кремния на фотоэлектрические свойства структур.

В работе были измерены вольтамперные характеристики образца с ПК и образца с карбидизацией пористого слоя. Измерения проводились при различных температурах: от комнатной и до 120 °С. Для обоих образцов ток с возрастанием температуры увеличивался. Ток образца с пористым слоем при максимальной температуре увеличился в 4,5 раза от изначальных значений, в случае образца с карбидизацией пористого слоя ток возрос на 50% от начальных значений. Можно сделать вывод, что карбидизация пористого слоя делает образец менее восприимчивым к увеличению температуры.

Также для обоих образцов были измерены световые ВАХ, по которым был рассчитан коэффициент заполнения FF образцов. Коэффициент заполнения определялся как отношение максимальной мощности, которую выдает ФЭП к произведению тока короткого замыкания и напряжения холостого хода и выражался в процентах. Максимальная мощность, которую выдает ФЭП, графически представляется как максимальная площадь прямоугольника, который можно вписать в кривую ВАХ. По полученным результатам коэффициент заполнения обоих образцов получился порядка 47%.

Для образца с карбидизацией пористого слоя была измерена зависимость фотоэдс от длины волны излучения. Из полученной зависимости максимум спектральной чувствительности образца достигается на длине волны равной 550 нм. Данная длина волны соответствует энергии в 2,25 эВ, что соответствует кубическому карбиду кремния с шириной запрещенной зоны равной 2,36 эВ [2].

1. Яровой Г.П., Латухина Н.В., Рогожин А.С. и др. Кремниевые фотопреобразователи для космической и авиационной отрасли // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1–2. С. 521–524.
2. Евишев А.В., Ивенин С.В. Определение ширины запрещенной зоны в карбиде кремния оптическим методом // Огарев – Online. 2014. № 22. С. 1–8.

Формирование тонких пленок TiO_x методом отжига магнетронно-осажденных пленок титана в кислород содержащей газовой смеси

Р.Г. Валеев, А.Н. Бельтюков, А.И. Чукавин, Т.С. Картапова

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск

УДК: 538.915, 538.971

Несмотря на хорошую отработанность процессов получения нестехиометрических пленок оксидов титана толщиной до 10-30 нм методом магнетронного напыления титана в кислород содержащей среде [1], существуют более простые и технологически недорогие методы, основанные на отжиге пленки титана в среде кислорода при относительно низких температурах [2]. Но одним их недостатков такого метода является плохая его контролируемость с точки зрения стехиометрии получаемой оксидной пленки, особенно для покрытий толщиной от единиц до нескольких десятков нанометров. Поэтому их получение, а также прецизионный контроль состава и структуры получаемых оксидных пленок с заданным кислородным составом при данном способе получения является нетривиальной задачей. Она может быть решена, в первую очередь, *insitu* контролем в камере синтеза, а также постростовым контролем после извлечения образца из термовакуумной установки.

Тонкие пленки нестехиометрического оксида титана активно изучаются как материалы для различных применений от биоинженерии (биосовместимые композиты, барьерные пленки между органической и неорганической средами) до энергетики и электроники (мемристоры, солнечные и топливные элементы), а также защиты окружающей среды (катализаторы и фотокатализаторы, самоочищающиеся покрытия). В зависимости от содержания в пленке кислорода она может проявлять различные свойства по электропроводности и оптическим характеристикам, поэтому от контроля стехиометрии зависят режимы, которые могут выбраны для получения образцов указанным выше методом, а непосредственно контроль может быть проведен методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

В данной работе получена и исследована серия образцов пленок оксида титана, полученных методом отжига при температуре 200°C магнетронно-осажденных пленок титана толщиной 20 нм в кислород содержащей смеси с аргоном с концентрацией окислителя от 0 до 10 объемных %. Контроль степени окисленности по толщине пленки проведен методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с применением оригинальной методики съемки спектров под различными углами [3], что позволяет получать информацию о химическом составе с различных глубин анализируемой пленки без ее травления ионами аргона. Показано, что в зависимости от содержания кислорода в реакционной смеси при отжиге можно контролируемо управлять валентным состоянием титана, определяющим его электронные свойства. Зная эти зависимости, можно синтезировать материал с заданными характеристиками, например, для использования в тонкопленочных мемристорных элементах.

Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП УдмФИЦ УрО РАН в рамках темы государственного задания Отдела ФХП ФТИ УдмФИЦ УрО РАН (№FUUE-2024-0007).

1. Gouttebaron R., Cornelissen D., Snyders R. et al. XPS study of TiO_x thin films prepared by d.c. magnetron sputtering in Ar- O_2 gas mixtures // Surf. Interface Anal. 2000. 30 (1). P.527–530.
2. Sarvadii S.Y., Gatin A.K., Kharitonov V.A., et al. Oxidation of Thin Titanium Films: Determination of the Chemical Composition of the Oxide and the Oxygen Diffusion Factor // Crystals. 2020. V. 10. P. 117.
3. Beltiukov A.N., Chukavin A.I., Kartapova T.S., Valeev R.G. Double-Angle X-ray Photoelectron Spectroscopy Depth Profiling of Nonstoichiometric TiO_x Thin Films with Resistive Switching Behavior // ACS Applied Electronic Materials. 2026, 8 (2), 774–782.

Рентгеноструктурный анализ допированных марганцем редкоземельных ортоферритов

Е.Д. Василевич^{1,2}, И.А. Зобкало²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

²НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина

УДК:538.911

Целью исследования является изучение влияния замещения ионов Fe^{3+} ионами Mn^{3+} на специфику магнитных взаимодействий в соединениях $HoFe_{1-x}Mn_xO_3$. Выяснение микроскопических механизмов, ответственных за магнитоэлектрические взаимодействия в таких веществах, является актуальной задачей современной физики твердого тела. Помимо чисто научного интереса, эти системы являются многообещающими объектами в перспективе практических применений, например, в информационных технологиях как субъект спинтроники или в энергосберегающих технологиях.

Первичным этапом исследования влияния замещения ионов Fe^{3+} ионами Mn^{3+} на магнитные свойства в соединениях $HoFe_{1-x}Mn_xO_3$ является получение исчерпывающей информации о кристаллической структуре этих веществ. В данной работе проводилось рентгеноструктурное исследование гольмиевых ортоферритов со степенью замещения $x=0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5$ при различных температурах. Методом порошковой дифракции рентгеновского излучения установлена пространственная группа соединений $HoFe_{1-x}Mn_xO_3$ для различных степеней допирования марганцем при различных температурах, уточнены параметры элементарной решётки и координаты атомов. Пространственная группа $Pnma$ (№ 62), установленная для соединения $HoFeO_3$ сохраняется и для допированных марганцем ортоферритов при степенях допирования $x=0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5$.

Наилучшей сходимости результатов уточнения кристаллической структуры методом Ритвельда с экспериментальными данными порошковой дифракции исследованных соединений удалось достичь в предположении искажения кислородного октаэдрического окружения позиции Fe/Mn. Получены зависимости длин и углов связей Fe-O-Fe, отражающие изменение степени искажения с увеличением уровня допирования.

Данные результаты послужат отправной точкой для дальнейших исследований влияния замещения ионов Fe^{3+} ионами Mn^{3+} на специфику обменных взаимодействий в соединениях $HoFe_{1-x}Mn_xO_3$, опорой для нейтронных исследований данных соединений.

Влияние постоянного магнитного поля на дислокационную структуру мельхиора

А.И. Ващенко, Ю.В. Осинская

Самарский национальный исследовательский университет им.акад. С.П. Королева, Самара
УДК: 538.9

Магнитопластический эффект представляет собой явление перемещения одиночных дислокаций в кристаллической решётке на макроскопические расстояния под воздействием магнитного поля в отсутствие иных внешних немагнитных воздействий. Данный эффект проявляется на различных структурных уровнях в кристалле, приводя к изменению основных физико-механических свойств сплавов: плотности дислокаций, параметра кристаллической решётки, микротвёрдости, предела текучести, внутреннего трения и кинетики активной деформации. Таким образом, магнитопластический эффект открывает возможность целенаправленного управления микро- и макросвойствами материалов посредством слабых магнитных полей [1, 2].

В связи с этим, перспективным направлением исследования является как поиск практических приложений магнитопластического эффекта, так и изучение его проявления в диамагнитных сплавах, содержащих значительные концентрации (более 10 вес. %) ферромагнитных легирующих примесей. Таким образом, в данной работе анализировалось влияние постоянного магнитного поля на медно-никелевый сплав (мельхиор).

Образцы исследуемого материала подвергались термической обработке по следующим режимам: закалка при температуре 900 ± 5 °С в течение 40 мин с последующим резким охлаждением в воду (20 °С) и отжиг при 600 ± 5 °С в течение 2 ч.

Микротвёрдость по методу Виккерса определяли с помощью микротвердомера HAUSER при нагрузке 100 г. Каждое значение микротвёрдости получали путем усреднения по 30 измерениям. Относительная ошибка среднего значения микротвёрдости исследуемого сплава составила 1–4 %.

В состоянии поставки значения микротвёрдости мельхиора достигают 143 кГ/мм^2 , полученное значение соответствует справочным данным. После закалки значения микротвёрдости мельхиора уменьшаются до 93 кГ/мм^2 , что скорее всего связано со снятием внутренних напряжений, обусловленных первичной прокаткой. После отжига длительностью 2 ч значения микротвёрдости практически не изменилось в пределах ошибки измерения, вполне возможно, что необходимо увеличить температуру отжига до 700 °С.

Рентгенофазовый анализ показал, что наблюдается смещение дифракционных линий α -твёрдого раствора на основе меди закалённого образца мельхиора в сторону больших углов на 1% по сравнению с состоянием поставки, при этом их полуширина уменьшается на 24 %. После отжига не наблюдается значительного смещения дифракционных линий, но их полуширина также уменьшается на 22 % по сравнению с закаленным состоянием.

Дальнейшее исследование позволит сделать вывод о взаимосвязи границ раздела фаз и МПЭ, что конкретизирует область его применения.

Планируемое продолжение исследований направлено на установление корреляции между наличием межфазных границ и проявлением МПЭ, что позволит более точно определить потенциальные области его практического использования.

1. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Петржик Е.А. Магнитопластический эффект: основные свойства и физические механизмы // Кристаллография. 2003. Т. 48 с. 838-867.
2. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Петржик Е.А., Котовский Р.К., Торничик П. Физическая кинетика движения дислокаций в немагнитных кристаллах: взгляд через магнитное окно // Успехи физических наук. 2017. Т. 187 с. 327-340.

**Исследование свойств материалов на основе взаимопроникающих сеток
полиакриламида и бактериальной целлюлозы**

В.О. Виноградова¹, Р.Ю. Смыслов², Е.М. Иванькова², Г.В. Ваганов², А.К. Хрипунов², А.Н. Бугров^{1,2}

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

²Филиал НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИВС, Санкт-Петербург

УДК: 678, 538.9

В настоящее время в качестве замены хрящевой ткани используют материалы со структурой взаимопроникающих сеток (ВПС). Данная структура имитирует строение натурального хряща. Наиболее перспективным является гибридный материал на основе полиакриламида (ПАА) и бактериальной целлюлозы (БЦ). Данный материал обладает требуемыми для хрящевой ткани механическими характеристиками, высоким коэффициентом водопоглощения, а также является биосовместимым.

Работа направлена на получение гибридного материала на основе ПАА и БЦ со структурой ВПС, исследование его механических и морфологических свойств, а также биосовместимости. При получении композитного материала были использованы различные подходы к синтезу. Один из подходов заключался в криополимеризации акриламида и сшивателя в структуре БЦ с применением различных методов пропитки, таких как капиллярная, диффузионная и с использованием инъекции. Наиболее эффективным был метод диффузионной пропитки. Для получения криогелей с механическими характеристиками максимально близкими к хрящевой ткани варьировались условия криополимеризации, соотношение мономера и сшивателя. Второй подход заключался в проведении радикальной полимеризации акриламида с сшивателем в пласте биополимера при использовании термоинициатора. Исследовали влияние метода пропитки и концентрации БЦ на получаемые свойства материала. Биологическую совместимость полученных образцов определяли с помощью МТТ-теста.

Таким образом, в ходе проекта были получены биосовместимые гели с механическими характеристиками, не уступающими натурной хрящевой ткани. Проанализированы влияние условий полимеризации, типа используемого инициатора, соотношения мономера, сшивающего агента и биополимера в составе композита на получаемые механические и морфологические характеристики. Выявлены основные корреляции состав-структура-свойства для композитных гелей БЦ-ПАА со структурой ВПС и разработана технология получения искусственной хрящевой ткани на их основе.

Получение наноструктурированных частиц оксида никеля путем термического окисления никелевых наночастиц полученных методом матричного синтеза

А.С. Волчков^{1,2}, И.М. Долуденко¹, В.М. Каневский¹

¹Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», Москва

²МИРЭА, Российский технологический университет, Москва

УДК: 538.9

Оксиды никеля исследуются во многих областях науки и техники. Переход на наноразмерные одномерные частицы может существенно увеличить светочувствительность, за счет более развитой поверхности, а также расширить возможности применения таких материалов в качестве компонентов суперконденсаторов.

В эксперименте для получения заготовок нанопроволок (НП) Ni для дальнейшего отжига использовался метод матричного синтеза, на основе электрохимического заполнения пор трековых мембран. Для синтеза использовалась специальная гальваническая ячейка и программируемый потенциостат гальваностат. В качестве матрицы использовалась трековая мембрана. Электрохимический рост никелевых наноструктур проводился с использованием электролита Уоттса. Рост проводился при разных напряжениях для определения оптимального потенциала роста. Для определения наиболее эффективного времени роста при разных потенциалах выращивались контрольные образцы, записывались хроноамперограммы и проводился анализ полученных образцов путём растровой электронной микроскопии (РЭМ). Были получены контрольные образцы с максимальным временем осаждения при соответствующих потенциалах. Данные образцы исследовались методом РЭМ. Было выявлено, что время перероста различается для разных потенциалов. При наибольшем напряжении рост происходил быстро, хаотично и неконтролируемо, при наименьшем – слишком медленно. При напряжении в 2В заполнение происходило неравномерно, поэтому наноструктуры имели хаотичную длину, часто не заполняя пору полностью. Меньшее напряжение, несмотря на большее время, предоставляло возможность равномерного роста НП. Для подготовки последующих образцов для дальнейшего термического окисления было выбрано 1,4В в течение 760с. Это соотношение позволяло получить НП длиной в ~7 мкм. После получения никелевых наночастиц, удалялась медная подложка и полимерная матрица, оставляя только никелевую взвесь, которая подготавливалась к отжигу на предметном стекле. Частицы распределялись хаотично посредством воздействия переменных магнитных полей.

Для термического окисления для отжига образцов были выбраны температуры: 350 °С, 500 °С и 700 °С. Каждая итерация проводилась на протяжении 3600с. После отжига был проведён анализ образцов методом РФА (рентгенофазовый анализ) и РЭМ. Были получены рентгенограммы, имеющие пики, характерные для NiO; на образце, отжиг которого проводился в температуре в 700 °С пики Ni не наблюдались, в отличие от остальных образцов. При этом суммарная интенсивность пиков NiO увеличивалась с увеличением температуры. При помощи РЭМ установлено, что после процесса термического окисления все наноструктуры сохранили цилиндрическую форму и не подверглись деформации, при этом, диаметр частиц увеличивался. Полученные данные говорят о возможности применения данного метода для получения наночастиц NiO с заданными геометрическими параметрами для применения их в сенсорных направлениях.

Работа проведена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Особенности полиморфизма и дефектной структуры тонких пленок CdTe на различных подложках

И.С. Волчков, И.О. Кошелев, П.В. Резникова, Д.Н. Хмеленин, В.М. Каневский

Отделение Институт Кристаллографии им. А.В. Шубникова Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», Москва

УДК: 539.234, 538.911, 548.33

Теллурид кадмия (CdTe) является перспективным полупроводниковым материалом с шириной запрещенной зоны (E_g) ~ 1.5 эВ при 300 К, а также высоким коэффициентом фотоэлектрического поглощения за счет высокой плотности материала (~ 5.85 г/см³). Так, в видимом диапазоне коэффициент поглощения составляет $5 \cdot 10^5$ см⁻¹ [1], что обуславливает интерес к тонкопленочным структурам на основе CdTe. В этом случае толщину слоя CdTe можно уменьшить до 2 мкм, что позволяет улавливать до 90% падающих фотонов. Высокий теоретический предел эффективности структур на основе CdTe (до $\sim 32\%$), а также активное использование тонкопленочного CdTe в качестве основы для фотоэлектрических модулей, определяют перспективность работ по совершенствованию технологий роста тонких пленок, а также исследованию механизмов и условий формирования дефектной структуры.

Объектами исследования являлись тонкие пленки CdTe, выращенные методом высоковакуумного термического напыления [2] на различных подложках: Si (111), Al₂O₃ (0001), силикатное стекло, а также силикатное стекло, покрытое тонким слоем ИТО или FTO. В качестве материала источника использовался поликристаллический CdTe, выращенный модифицированным методом Обреимова-Шубникова в Институте Кристаллографии им. А.В. Шубникова. Фазовый состав, а также структура и величины микронапряжений пленок исследовались методами рентгенофазового анализа, спектроскопии комбинационного рассеяния, атомно-силовой, растровой и просвечивающей электронных микроскопий, а также методом электронной дифракции.

Комплексом используемых методов было обнаружено образование преципитатов Te на всех исследуемых тонких пленках. Размеры и плотность преципитатов значительно зависят от условий роста, а также от типа подложки, что напрямую связано с кинетическими особенностями процесса роста тонких пленок, а именно: соответствие параметров решеток подложка/тонкая пленка, соотношения скоростей десорбции/сорбции, напрямую зависящие от скорости роста, а также от температурных режимов роста. Определена критическая температура подложки, при которой происходит образование высокоориентированных тонких пленок, содержащих только кубическую модификацию CdTe на гексагональных и аморфных подложках, а также условия образования смеси гексагональной и кубической модификации CdTe на подложках Al₂O₃ (0001) и силикатного стекла. Обсуждаются механизмы образования смеси вюрцитной и сфалеритной модификаций CdTe, а также условия и кинетические особенности, позволяющие контролировать доли данных модификаций в выращенных тонких пленках.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

1. Parveen S., et al. Bandgap gradient strategy with ultra-thin passivation layer (1 nm) enabling lower SRH voltage loss in perovskite/CdTe tandem solar cells // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2026. V. 208. P. 113187.
2. Koshelev I.O., et al., Textured CdTe thin films on silicon and sapphire substrates: thermal vapor deposition and structural characterization // Crystallography Reports. 2024. V. 69. P. 235–238.

Исследования фазового состава сверхпроводниковых пленок Ta-Si методом ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии

Е.И. Гайворонская¹, И.В. Польшин¹, М.И. Гайворонская¹, Е.С. Керсновский¹, С.А. Ивков¹, А.И. Чукавин^{1,2}, Н.С. Буйлов¹, А.В. Ситников³, К.А. Барков¹

¹Воронежский государственный университет, Воронеж

²УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск

³Воронежский государственный технический университет, Воронеж

УДК:538.9

В настоящее время проводятся исследования фаз системы Ta-Si для использования в качестве чувствительного слоя сверхпроводниковых однофотонных детекторов дальнего ИК излучения. В работах [1,2] показано, что фаза Ta₃Si имеет сверхпроводящий переход при T_c = 8,7 К. Также в работе [1] была получена сверхпроводящая фаза с температурой T_c = 9,3 К, образцы подвергались ударному давлению в 50-61 ГПа. Особый интерес вызывают однородные структуры, состоящие из аморфной модификации фазы Ta₃Si, так как сверхпроводящий переход в таком случае резкий и имеет более высокую температуру [1,2]. Данная работа направлена на поиск технологических условий для получения аморфной, однофазной пленки Ta₃Si. В рамках настоящего исследования продемонстрированы возможности ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (УМРЭС) для исследования данных фаз.

В данной работе пленки Ta-Si в диапазоне атомных составов от Ta₃₀Si₇₀ до Ta₈₅Si₁₅ были получены методом ионно-лучевого распыления составной мишени из пластины тантала и кремниевых навесок. Осаждение пленок осуществлялось в вакуумной камере (10⁻⁶ Торр). Исследования химического состояния поверхности и электронного строения твердых тел проводились при помощи метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Анализ фазового состава проводился методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН 4-07 и методом УМРЭС на уникальной научной установке «Рентгеновский спектрометр монохроматор РСМ-500».

Рентгеноструктурный анализ пленок Ta-Si показал, что все пленки являются аморфными. По данным УМРЭС во всех анализируемых пленках присутствует силициды тантала Ta₂Si и Ta₅Si₃. В пленке с низким содержанием Ta (~30 at%), на рентгеновских эмиссионных Si L_{2,3} спектрах приповерхностной области (10 нм) присутствуют в основном оксиды кремния, а также небольшое количество низших силицидов тантала Ta. С увеличением глубины анализа растет содержание силицидов Ta₂Si и Ta₅Si₃. Увеличение содержания Ta до ~65 at% сопровождается увеличением относительного содержания силицидов Ta₂Si и Ta₅Si₃ как в поверхностных, так и в более глубоких слоях пленки. Дальнейший рост содержания Ta до ~85 at.% не приводит к значительному изменению формы рентгеновского спектра и его фазового состава. Анализ РФЭС Ta 4f и Si 2p спектров обнаруживает в поверхностных слоях пленок Ta-Si наряду с неокисленными компонентами также и оксиды тантала и кремния. Однако методика РФЭС не позволяет идентифицировать фазы силицидов тантала в виду малой величины химического сдвига.

Таким образом, по данным УМРЭС и РФЭС пленки Ta-Si представляют собой сложную композитную структуру, содержащую фазы Ta₂Si, Ta₅Si₃, TaO_x и SiO_x. Методика УМРЭС демонстрирует возможности идентификации фаз силицидов тантала и наглядно показывает причины снижения температуры сверхпроводящего перехода в пленках Ta-Si.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10294, <https://rscf.ru/project/23-79-10294/>.

1. Murao R. et al. Superconducting phase prepared from Ta₃Si under high pressure // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2010. Т. 215. №. 1. С. 012139.
2. Dew-Hughes D. Superconducting A-15 compounds: A review // Cryogenics. 1975. Т. 15. №. 8. С. 435-454.

Анализ электронного строения и фазового состава пленок Mo-Si, полученных методом ионно-лучевого распыления

М.И. Гайворонская¹, И.В. Польшин¹, Е.И. Гайворонская¹, Е.С. Керсновский¹, С.А. Ивков¹,
А.И. Чукавин^{1,2}, Н.С. Буйлов¹, А.В. Ситников³, К.А. Барков¹

¹Воронежский государственный университет, Воронеж

²УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск

³Воронежский государственный технический университет, Воронеж

УДК:538.9

Плѐнки на основе Mo-Si нашли свое применение в технологии создания сверхпроводниковых однофотонных детекторов дальнего ИК излучения поскольку обладают сверхпроводящим переходом при криогенных температурах [1]. Однофазная плѐнка Mo₃Si переходит в сверхпроводящее состояние при температуре около 7,5 К, но при изменении фазового состава понижается температура перехода в сверхпроводящее состояние вплоть до 1 К, а также происходит увеличение ширины сверхпроводящего перехода [2]. Возможности исследования таких материалов как Mo-Si методом ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (УМРЭС), показаны в данной работе.

Образцы были получены методом ионно-лучевого распыления составной мишени, состоящей из пластины молибдена и кремниевых навесок [3]. Навески Si расположены неоднородно для получения образцов с разным содержанием Mo в пленке в едином процессе осаждения. В качестве подложки использовалась пластина кремния Si (100). Элементный анализ проводился методом энергодисперсионной спектроскопии на растровом электронном микроскопе, оснащённом приставкой для микроанализа INCA 250. Анализ формирования кристаллических фаз в пленках Mo-Si проводился методом рентгеновской дифракции. Фазовый состав пленок Mo-Si определялся по рентгеновским эмиссионным Si L_{2,3} спектрам методом УМРЭС на уникальной научной установке «Рентгеновский спектрометр монохроматор РСМ-500». Рентгеновские эмиссионные Si L_{2,3} спектры отражают парцальную плотность Si_{3s} состояний в валентной зоне, которая крайне чувствительна к локальному атомному окружению. Таким образом, методика УМРЭС позволяет идентифицировать фазы высших и низших силицидов молибдена. Исследование химического состояния поверхности пленок Mo-Si осуществлялось методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).

В результате ионно-лучевого распыления составной мишени была получена серия пленок с атомным составом от Mo₄₅Si₅₅ до Mo₈₅Si₁₅. По данным рентгеноструктурного анализа пленки Mo-Si во всем диапазоне составов являются рентгеноаморфными. Поэтому дальнейшие исследования фазового состава проводились с помощью метода УМРЭС, чувствительного к ближнему порядку. По данным УМРЭС в пленках с низким содержанием молибдена формируются фазы Mo₃Si, MoSi₂, Mo₅Si₃, а также аморфный кремний. Увеличение содержания молибдена приводит к увеличению содержания Mo₃Si, содержание которой достигает 100% в пленке Mo₈₅Si₁₅. При этом анализ РФЭС спектров Mo_{3d} и Si_{2p} обнаруживает сильное окисление молибдена и кремния вблизи поверхности пленки. Увеличение содержания молибдена приводит к росту содержания оксидов молибдена и кремния.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10294, <https://rscf.ru/project/23-79-10294/>.

1. Grotowski S. et al. Optimizing the growth conditions of superconducting MoSi thin films for single photon detection // Scientific Reports. 2025. Т. 15. №. 1. С. 2438.
2. Banerjee A. et al. Characterisation of amorphous molybdenum silicide (MoSi) superconducting thin films and nanowires // Superconductor Science and Technology. 2017. Т. 30. №. 8. С. 084010.
3. Nemoshkalenko V. V. et al. X-ray K β -and L_{2, 3}-emission bands of pure silicon and silicon in Mo/Si compounds // Physics Letters A. 1973. Т. 45. №. 5. С. 369-370.

Гальваномагнитные эффекты в гетероструктурах карбид кремния на кремнии на частоте 10 ГГц

Д.А. Герасимов, А.В. Щербак

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королёва, Самара
УДК: 537.311.322, 538.9

Исследование гальваномагнитных эффектов в перспективных полупроводниковых материалах, таких как карбид кремния (SiC), является актуальной задачей для развития экстремальной электроники и методов бесконтактной диагностики.

Структуры SiC изотипного, анизотипного типа, а также структуры с гомопереходом в объеме SiC получались методом эндотаксии в проточном реакторе с охлаждаемыми стенками. В ходе исследования было выявлено что толщина слоя SiC составила 2 мкм.

Показано, что в режиме непрерывного облучения регистрируемая радиоЭДС содержит как холловскую, так и термоэлектрическую составляющие, сравнимые по величине. При импульсном воздействии СВЧ мощности (длительность импульса 2 мкс, скважность 25000) зависимость амплитуды радиоЭДС от уровня пиковой мощности в диапазоне до 3000 Вт носит линейный характер. Чувствительность преобразователей составила от 12.3 мкВ/Вт до 17.3 мкВ/Вт.

Установлено, что при больших скважностях импульсов термоэлектрическая составляющая становится пренебрежимо малой по сравнению с ЭДС Холла. Это позволяет рассматривать гетероструктуры SiC/Si в качестве перспективных СВЧ-преобразователей для измерения импульсной мощности и бесконтактного определения электрофизических характеристик полупроводниковых материалов.

1. Лебедев А.А. Центры с глубокими уровнями в карбиде кремния // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33. № 2. С. 129–131.
2. Карбид кремния: технология, свойства, применение / под ред. А.Е. Беляева, Р.В. Конаковой. Харьков: ИСМА, 2010. 532 с.
3. Комов А.Н., Трещев В.М., Яровой Г.П. Гальваномагнитные СВЧ преобразователи. М.: Радио и связь, 2000.
4. Силаев М.А., Комов А.Н. Измерительные полупроводниковые СВЧ преобразователи. М.: Радио и связь, 1984.

Модификация сфокусированным ионным пучком мемристоров на основе гексагонального нитрида бора

Я.А. Герштейн^{1,2}, Е.В. Жаркова², М.И. Титова^{1,2}, М.А. Кащенко^{1,2}, Б.В. Коцей^{1,2}, Н.С. Жидков¹,
А.Р. Ханас^{1,2}, Е.И. Титова^{1,2}

¹МФТИ, Физтех, Долгопрудный

²Лаборатория физики программируемых функциональных материалов ООО "ЦННТ", Москва

УДК: 621.382, 538.975

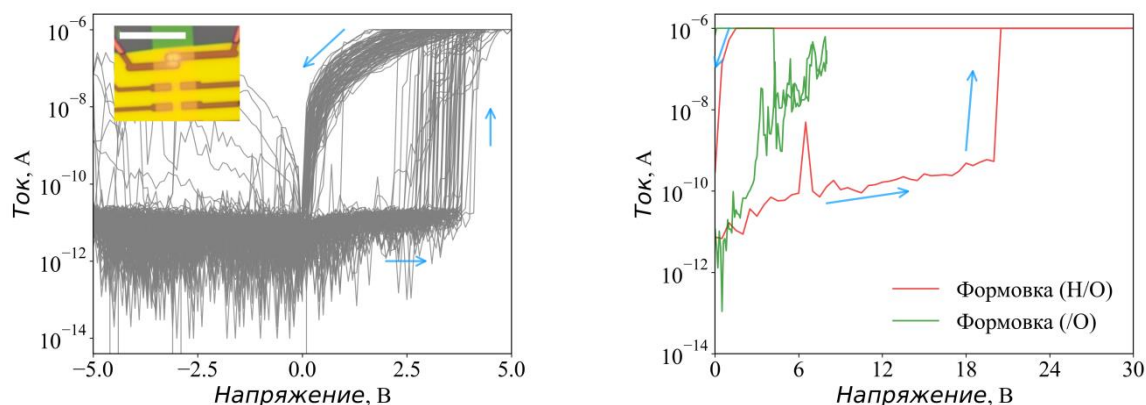


Рисунок 1. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) типичных резистивных переключений. На вставке микрофотография образца (масштаб 10 мкм) (а) и ВАХ формовки необлученного и облученного контактов (б)

Одним из ограничений архитектуры фон Неймана является значительное отставание в быстродействии блока памяти от блока процессора. Потенциальным решением могут стать вычисления в памяти. Одна из перспективных реализаций такого подхода состоит в использовании мемристоров – двухполюсных элементов, изменяющих свое сопротивление в зависимости от протекшего через них заряда [1]. Для организации резистивных переключений в мемристорах часто необходим процесс формовки, заключающийся в подаче напряжений выше рабочих для первичного формирования проводящих филаментов. Однако, высокое напряжение формовки может привести к пробое диэлектрика, снижению повторяемости и стабильности образцов, повышению энергопотребления и усложнению схем управления мемристивными ячейками [2].

В данной работе продемонстрировано, что облучение сфокусированным ионным пучком (Ga^+ или Xe^+) приводит к понижению напряжений формовки в мемристорах на основе эксфолиированного гексагонального нитрида бора и активного электрода из серебра (Рис. 1а).

Было обнаружено, что в облученных образцах наблюдается понижение напряжения формовки с более 20В до 8В. Кроме того, увеличилась доля устройств, демонстрирующих стабильные циклы переключений. При этом, характер и численные характеристики резистивных переключений в облученных и необлученных образцах не изменились.

Мемристоры с улучшенными характеристиками могут быть использованы для создания искусственных нейронов.

1. Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. The missing memristor found // Nature. 2008. T. 453. № 7191. С. 80–83.
2. Srivastava S., Thomas J.P., Heinig N.F., Leung K.T. High-Performance Single-Active-Layer Memristor Based on an Ultrananocrystalline Oxygen-Deficient TiO_x Film // ACS Applied Materials & Interfaces. 2017. T. 9. № 42. С. 36989–36996.

Фторполимеры в «2D» покрытиях

И.Б. Глебова, К.А. Полетаев, Ю.А. Фоменко, А.А. Николаев, О.А. Шилова

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС, Санкт-Петербург

УДК: 667.637.2:678.743.41, 538.9

Защитные покрытия на основе кремнийорганических полимеров отличаются высокой термостойкостью и радиационной стойкостью. Однако они не предназначены для постоянного контакта с водой или водно-паровой смесью. Для того чтобы решить сложную проблему создания покрытий на основе кремнийорганических полимеров, которые должны сохранять электроизоляционные свойства и хорошую адгезию в условиях кратковременного воздействия водно-паровой смеси при повышенном давлении и высокой температуре (до 300 – 400 °С), были использованы полифенилсилсесквиоксаны (ПФФСО), модифицированные фторсодержащими полимерами. ПФФСО – это кремнийорганические полимеры, лестничного строения, отличающиеся высокой термостойкостью. В данной работе использовались ПФССО с метилфенилсилоксановыми звеньями (ПМФССО). Органосиликатные покрытия (ОСП) на основе этих полимеров, наполненных силикатами и тугоплавкими пигментами, обеспечивают ОСП атмосферостойкость, коррозионную стойкость, огнестойкость, температуроустойчивость и радиационную стойкость, что позволяет их применять в экстремальных условиях [1].

Фторсодержащих полимеры обладают уникальным набором присущих им свойств: высокая термостойкость, исключительная химическая стойкость, влагостойкость [2]. Однако они плохо совмещаются с другими полимерами, в том числе, с кремнийорганическими. Для решения этой задачи в композицию ПМФССО с наполнителями вводились следующие фторсодержащие полимеры в следующих вариантах: политрифторхлорэтилен фторопласт-3 (Ф-3), нанодисперсный политетрафторэтилен фторопласт-4 (Ф-4) марки ФОРУМ [2], Ф-3 совместно с Ф-4 и сополимер тетрафторэтилена и винилиденфторида фторопласт-42 (Ф-42). Ф-3 был использован в виде органодисперсии о-ксилола с изопропиловым спиртом, производства ОАО «Пластполимер». Ф-42 был растворен в ацетоне, а Ф-4 вводился в композицию в виде порошка. Ф-4 втирался в поверхность покрытия, содержащие Ф-3 совместно с Ф-4. Все покрытия наносились на металлические пластины и подвергались температурной обработке при 300-350 °С.

Были исследованы адгезия и диэлектрические свойства ОСП. Поперечное электрическое сопротивление $>4,91 \cdot 10^{10}$ Ом·см², адгезия 1 балл (ГОСТ 31149-2014). Все ОСП имели достаточно хорошую твердость по ГОСТ Р 52166-2003 (от 0,3 до 0,5 отн. ед.). Состояние поверхности ОСП исследовано методом СЭМ. Во всех ОСП, полученных с использованием Ф3 и Ф-4, отсутствуют трещины на микроуровне. Частицы фторсодержащего полимера распределены равномерно по поверхности. После выдержки ОСП в камере при температуре 270 °С и давлении 5 МПа ОСП с Ф3 и Ф4 сохранили сплошность и диэлектрические свойства. Наилучшим покрытием по совокупности свойств оказалось покрытие, в которое вводилось Ф-3 совместно с Ф-4.

Также будет кратко рассказано, для чего и как создаются покрытия, основные свойства покрытий, их многофункциональность, какие трудности встречаются при создании покрытий, виды покрытий, модифицирование покрытий и компонентов, озвучивание ультразвуком при применении нанотрубок и графена, методы испытаний покрытий.

1. Патент RU № Органосиликатная композиция на основе лестничного полимера / Шилова [и др.] / заявл. 03.07.2023 г.; опубл. 25.03.24. Бюл. 9.

2. Цветников А.К., Матвеев Л.А., Машталар Д.В., Егоркин В.С. [и др] Функциональные материалы и покрытия на основе нанодисперсного политетрафторэтилена различных температурных модификаций // Вестник ДВО РАН. 2018. №5. с. 77-85.

Ферроценил-содержащие полисилоксаны для создания гибких силиконовых композитов с контролируемым удельным электрическим сопротивлением

Е.А. Головенко, Р.М. Исламова

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

УДК: 538.9, 54.02

Полимерные композиционные материалы на основе углеродных нанотрубок (УНТ) находят широкое применение в электронике, оптоэлектронике, авиа- и машиностроении, при изготовлении топливных ячеек, актуаторов. Однако основной проблемой при изготовлении композитов является неравномерное распределение наполнителя в полимерной матрице и его агрегация. Эффективного распределения наночастиц в композите можно добиться путем модификации их поверхности. Известно, что прививка полимеров к поверхности УНТ позволяет не только улучшить распределение, но и усилить совместимость между филлером и полимерной матрицей [1].

Среди полимеров, используемых для модификации УНТ особого внимания заслуживают полисилоксаны — кремнийорганические соединения, основная цепь которых состоит из чередующихся атомов кремния и кислорода. Полисилоксаны обладают гидрофобностью, биоинертностью, термо- и морозостойкостью, имеют широкий интервал рабочих температур (от -125 до $+250^{\circ}$ C). Расширение сферы практического применения полисилоксанов и материалов на их основе возможно за счёт прививки к ним редокс-активных групп, например, ферроценильных. Ферроценил-содержащие полисилоксаны (Fc-PDMS) обладают химической и термической стойкостью на воздухе и при повышенной температуре, стабильным одноэлектронным переходом, что делает их перспективными кандидатами для модификации УНТ. УНТ, модифицированные Fc-PDMS могут быть использованы в качестве электрохимических (био)сенсоров, компонентов устройств для хранения энергии ввиду присутствия редокс-активных групп. В тоже время полисилоксаны улучшат распределение модифицированных УНТ в полимерной матрице, что важно при создании гибких эластичных электропроводящих силиконовых композитов [1,2].

В данной работе проведена нековалентная модификация однослойных (ОУНТ) и многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) с помощью Fc-PDMS (содержание ферроценильных групп составляет 20 и 80 мол.%). Модификация ОУНТ и МУНТ Fc-PDMS была доказана методами спектроскопии комбинационного рассеяния и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. ОУНТ и МУНТ, модифицированные Fc-PDMS, были использованы для приготовления силиконовых композитов. Было установлено, что композиты на основе ОУНТ и МУНТ, модифицированных Fc-PDMS с 20 мол.% ферроценильных групп, обладают меньшими значениями удельного электрического сопротивления по сравнению с ОУНТ и МУНТ, модифицированных Fc-PDMS с 80 мол.% [3].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 24-13-00038.

1. Golovenko E.A., Pankin D.V., Deriabin K.V., Kirichenko S.O., Perevyazko I., Koroleva A. ., Islamova R.M. Modified with ferrocenyl-containing oligo-and polysiloxanes multi-walled carbon nanotubes for soft conductive silicone composites // *Materials Today Communications*. 2024. V. 41. P. 110429.
2. Deriabin K.V., Kocheva A. N., Golovenko E. A., Kirichenko S. O., Islamova R. M. Anionic ring-opening polymerization of ferrocenylcyclosiloxanes: a comprehensive structural study // *Reactive and Functional Polymers*. 2024. V. 204. P. 106029.
3. Golovenko E. A., Pankin D. V., Kirichenko S. O., Islamova R. M. Influence of ferrocenyl groups content in polysiloxanes on carbon nanotubes performance // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2025. V. 36. P. 1536.

Онлайн деконволюция (pile-up correction) двухэкспоненциальных импульсов детектора в ПЛИС

М.А. Голубев, В.А. Соловей

НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

УДК: 53.07, 538.9

Аналитически получены формулы для цифровых фильтров, преобразующих трёх- и четырёх-экспоненциальные импульсы к трапецеидальным, аналогичные многократно описанным [1,2] вариантам цифрового фильтра, преобразующего двухэкспоненциальные импульсы к трапецеидальным.

Сигналы, идентичные реальным сигналам детектора, оцифрованные с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) на частоте 50МГц, были фитированы линейными комбинациями двух-, трёх- и четырёх экспонент с разными коэффициентами показателя. Реальные импульсы отличаются от двухэкспоненциальных и лучше описываются трёхэкспоненциальной функцией с соответствующими временными константами.

Полученные коэффициенты использовались в качестве переменных параметров цифрового фильтра, реализованного в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), совмещённой с АЦП, преобразующего двух-, трёх- и четырёх-экспоненциальные импульсы к трапецеидальным. Визуально наименее искажены результирующие трапецеидальные импульсы в случае трёхэкспоненциальных функций. Отрицательный провал, следующий за пиком этой функции, позволяет дополнительно не заботиться о pole-zero cancellation. Возможно, в случае четырёх экспонент результаты фитирования недостаточно хорошо описывают реальный сигнал из-за большого числа фитируемых параметров.

Результаты были получены (исследование было проведено) при поддержке Министерства науки и Высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 года).

1. Jordanov V.T. Unfolding-synthesis technique for digital pulse processing. Part 1: Unfolding // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2016. № 805. С. 63–71.
2. Guo-Qiang Zeng, Jian Yang, Ming-Fu Yu, Kai-Qi Zhang, Qing Ge, Liang-Quan Ge. Digital pulse deconvolution method for current tails of NaI(Tl) detectors // Chinese Physics C. 2017. V. 41. No. 1. 016102.

Теоретическое описание эволюции дальнего порядка в сплаве Fe_3Al в процессе мегапластической деформации

М.М. Гордей, Л.С. Метлов

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Донецк

УДК: 536.7, 538.9

Влияние интенсивной пластической деформации на упорядоченные фазы в интерметаллидах является сложной и недостаточно изученной проблемой. В большинстве известных систем, таких как Ni_3Al или Cu_3Au , деформация приводит только к монотонному разрушению дальнего порядка. Однако в сплаве Fe_3Al экспериментально зафиксирован необычный двухстадийный процесс: после начального разрушения высокоупорядоченной фазы D0_3 на более поздних стадиях мегапластической деформации (МПД) наблюдается частичное восстановление упорядочения, но уже в структуре типа B2 [1]. Целью данной работы является построение феноменологической теоретической модели, способной описать эту нетривиальную эволюцию.

В рамках развиваемого подхода параметры дальнего порядка S_1 и S_2 , описывающие переходы $\text{A2} \leftrightarrow \text{B2} \leftrightarrow \text{D0}_3$, интерпретируются как плотности некоторых эффективных структурных «дефектов». Состояние системы характеризуется эффективной внутренней энергией, разложенной в ряд по степеням этих параметров, что позволяет учесть как их собственные энергии, так и взаимодействия между ними [2]. Ключевой особенностью модели является учет памяти системы о предыстории деформирования. Это достигается путем введения в правые части эволюционных уравнений Ландау-Халатникова интегральных членов, учитывающих влияние обобщенных термодинамических сил за предшествующий характерный интервал времени.

Такая постановка задачи позволяет описать не только релаксацию к стационарному состоянию, но и возможность стабилизации метастабильных состояний, возникающих в условиях интенсивного внешнего воздействия. Численный анализ системы уравнений для характерного набора параметров модели показывает, что в процессе МПД параметр S_2 , ответственный за порядок типа D0_3 , стремится к нулю. Одновременно параметр S_1 , характеризующий порядок типа B2 , выходит на ненулевое стационарное значение. Это поведение качественно согласуется с экспериментальными данными.

Таким образом, разработанная феноменологическая теоретическая модель успешно воспроизводит ключевой экспериментально обнаруженный эффект – смену механизма структурного превращения и последующую стабилизацию фазы с более низким, но отличным от нуля уровнем упорядочения (B2). Полученные результаты демонстрируют, что учет нестационарности и памяти системы является принципиально важным для корректного описания структурных превращений в условиях мегапластической деформации. Предложенный подход открывает возможность для теоретического поиска и прогнозирования поведения других упорядоченных сплавов при интенсивных внешних воздействиях.

1. Glezer A. M., Timshin I. A., Shchetinin I. V., Gorshenkov M. V., Sundeev R. V., Ezhova A. G. Unusual behavior of long-range order parameter in Fe_3Al superstructure under severe plastic deformation in Bridgman anvils // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. V. 744. P. 791–798.
2. Metlov L. S. Nonequilibrium dynamics of a two-defect system under severe load // *Physical Review E*. 2014. V. 90. P. 022124.

**Определение структурных особенностей колончатых фаз 3,4,5-
трис(алкилокси)бензолсульфонатов бария**
А.В. Горячевский¹, Н.В. Волков^{2,3}, А.В. Бакиров^{1,2}

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

²Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, Москва

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

УДК: 544.142.3+544.147.2+544.015.4+544.171.6, 538.9

На Курчатовском источнике синхротронного излучения проведены измерения малоуглового и широкоугольного рентгеновского рассеяния колончатых фаз 3,4,5-трис(алкилокси)бензолсульфонатов бария [1,2]. Варьировалась длина алкильных окончаний (от 8 до 18 атомов углерода). По данным измерений выявлена гексагональная плотная упаковка колонн в образце. Данные дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) образцов показывают наличие фазового перехода первого рода. Обнаружены изменения поперечных размеров колончатых структур при изменении температуры. Наблюдается увеличение поперечных размеров колонн и увеличение температурной стабильности с увеличением длины алкильных хвостов. ДСК показывает наличие двух фазовых переходов: превращение колончатой упорядоченной фазы в колончатую неупорядоченную и изотропизация.

Для определения конформации ионного ядра колончатой структуры было проведено квантово-химическое моделирование. Расчеты электронного строения и оптимизацию геометрии комплексов бария проводили методом теории функционала плотности (ТФП). Использовали обменный и обобщенно-градиентный корреляционный функционалы Пердью-Бюрке-Эрнзерхофа (PBE) [3], а также сбалансированный quadruple- ζ валентный базисный набор Альрикса (QZVP – quadruple-zeta, valence, polarization) [4] с поляризационными функциями и эффективным остовным потенциалом (ECP – effective core potential).

Проведены расчеты равновесной геометрии нейтрального (незаряженного) кластера $\text{Ba}(\text{SO}_3\text{C}_6\text{H}_5)_2$ в синглетном состоянии с различной симметрией – C_2 , C_s , C_i , $2 C_{2v}$ конфигурации и $2 C_{2h}$ конфигурации. Наименьшей энергией среди них обладает конфигурация с симметрией C_2 . Имеет место ионное координационное соединение – координационное число атома бария равно 4, что больше валентности бария (2). Заряд на атоме бария приближенно равен +2, заряд на лигандах $\text{SO}_3\text{C}_6\text{H}_5$ – по –1. Проведенный расчет частот в конфигурации C_2 показывает, что все частоты неотрицательны, что соответствует нежесткой системе с конфигурацией локального минимума. Все рассчитанные конфигурации оказываются внутри энергетического интервала (3.5 ккал/моль), по порядку величины сравнимого с комнатной температурой (0.6 ккал/моль), следовательно, данная система может при нормальных условиях иметь нежесткую структуру и демонстрировать в исследуемом диапазоне температур фазовые переходы с изменением пространственного расположения лигандов $\text{SO}_3\text{C}_6\text{H}_5$ относительно координационного центра.

1. Shcherbina M.A., Bakirov A.V., Yakunin A.N., Beginn U., Yan L., Möller M., Chvalun S.N. // *Soft Matter*. 2014. V. 10. P. 1746.

2. Shcherbina M.A., Bakirov A.V., Beginn U., Yan L., Zhu X., Möller M., Chvalun S.N. // *Chem. Commun.* 2017. V. 53. P. 10070–10073.

3. Perdew J.P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple // *Phys. Rev. Lett.* 1996. V. 77. P. 3865–68.

4. Weigend F., Ahlrichs R. Balanced basis sets of split valence, triple zeta valence and quadruple zeta valence quality for H to Rn: Design and assessment of accuracy // *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2005. V. 7. P. 3297–305.

Фотохромные пленки: что это и для чего? На примере тонких пленок WO₃

Н.Н. Губанова^{1,2}, В.А. Матвеев¹

¹НИИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

²Филиал НИИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИХС, Санкт-Петербург

УДК: 538.9

Фотохромные пленки (покрытия) – это тонкопленочные материалы, претерпевающие обратимые изменения цвета и прозрачности, выражающееся в светопропускании, при облучении светом. Такой материал содержит фотохромные молекулы или ионы, которые чувствительны к солнечному излучению, чаще всего к ультрафиолетовой (УФ) его компоненте. Применяются в оптических и электронных устройствах, в информационных дисплеях, как интеллектуальные материалы («умные окна», различные линзы для очков и др. оптических устройств). До недавнего времени фотохромный эффект в основном исследовался в органических материалах из-за их быстрых и сильных фотохромных превращений. Однако такие системы зачастую подвержены быстрой фотодеградаци и демонстрируют низкую стабильность в условиях эксплуатации. Более стабильными являются неорганические фотохромные соединения, обычно на основе оксидов вольфрама, молибдена и ванадия, а также оксигрида иттрия. Наиболее часто используемые способы получения таких тонких оксидных пленок – магнетронное распыление или напыление металла, с последующим его окислением.

В данной работе рассматривается золь-гель метод получения тонких пленок на основе WO₃, включая предварительную стадию получения полипероксвольфрамовой кислоты (ППВК) [1,2] и нанесения ее раствора с помощью центрифуги (spin-coating) в виде тонкого слоя с последующей термообработкой.

С помощью метода рентгеновской рефлектометрии была установлена зависимость толщины пленок от концентрации ППВК в растворе золь и температуры термофиксации, которая варьировалась от 150 до 500°C. При максимальной концентрации 20 масс.% и температуре отжига 200°C толщина пленки составила 140 нм, а при концентрации 2,5 масс.% и температуре отжига 200°C пленка получилась толщиной примерно 15 нм.

Также были получены оптические спектры пленок в диапазоне длин волн от 190 до 1100 нм, определено влияние УФ излучения на оптическую прозрачность пленок.

1. Сохович Е.В., Томаев В.В., Тарабан В.В., Плескунов И.В. Совершенствование золь-гель синтеза гидрогеля WO₃ для получения электрохромных пленок // Цветные металлы. 2023. № 8. С. 39-43.
2. Khalifa Z.S., Shaban M., Zayed M.K. Sol –gel derived WO₃ thin films by spin coating technique and their wettability // Egyptian Journal of Solids. 2022. V.44. P. 81-98.

Магнитная фазовая диаграмма соединения $\text{Fe}_{0.5}\text{Rh}_{0.5}\text{Si}$ по данным малоуглового рассеяния нейтронов

А.В. Гусева¹, Е.В. Алтынбаев^{1,2}, А.В. Цвященко²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

²Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН, Москва, Троицк

УДК: 538.955, 537.622, 538.911

Киральные магнетики со структурой типа B20 являются модельными объектами для изучения конкуренции обменных взаимодействий и формирования экзотических спиновых структур. Если архетип этого класса – MnSi – изучен детально, то данные о соединении $\text{Fe}_{0.5}\text{Rh}_{0.5}\text{Si}$ в литературе отсутствуют. Синтезированный под высоким давлением, этот материал может демонстрировать уникальные магнитные свойства. В данной работе методом малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) впервые исследована его магнитная структура и построена фазовая H-T-диаграмма.

Эксперимент выполнен на установке BL01 CSNS (Китай) [1] на поликристаллическом образце. В нулевом поле измерена температурная зависимость интенсивности рассеяния ($T = 5 - 100$ К), а при фиксированных температурах сняты полевые зависимости ($\mu_0 H = 0 - 0.13$ Тл). Анализ данных, основанный на методике определения критических полей из работы [2], позволил идентифицировать фазовые границы.

Установлено, что температура магнитного упорядочения (перехода в геликоидальное состояние) составляет $T_c = 70 \pm 5$ К. В магнитном поле выявлены три критических значения H_{c1} , H_{c1m} , H_{c2} , соответствующие переходу к конической фазе и поляризации магнитной структуры. На основе этих данных впервые построена фазовая H-T диаграмма $\text{Fe}_{0.5}\text{Rh}_{0.5}\text{Si}$.

Результаты демонстрируют, что $\text{Fe}_{0.5}\text{Rh}_{0.5}\text{Si}$ является новым представителем семейства геликоидальных магнетиков типа MnSi . Определенные параметры его фазовой диаграммы закладывают основу для дальнейших исследований, включая поиск скирмионной фазы в этом материале.

1. China Spallation Neutron Source (CSNS): официальный сайт. URL: https://english.ihep.cas.cn/csns/fa/in/202109/t20210915_283258.html (дата обращения: 01.03.2026).
2. Altynbaev E. et al. Hidden quantum phase transition in $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ge}$ evidenced by small-angle neutron scattering // Physical Review B. 2016. Т. 94. №. 17. С. 174403.

Оценка энергии отслоения CrSBr методом наноиндентирования

Д.Л. Гусенков^{1,2}, Р.Б. Моргунов^{1,2}

¹Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,
Черноголовка

²ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет),
Москва

УДК: 538.97, 620.17

Механические свойства двумерных ван-дер-ваальсовых материалов играют ключевую роль не только в устойчивости к деформации, но и в управлении функциональными характеристиками: даже слабая нагрузка модифицирует магнитные, оптические и транспортные свойства за счёт изменения межатомных расстояний и симметрии решётки. Для CrSBr известно, что давление ~ 1.4 GPa изменяет температуру Кюри на 13–15 % [1], что подчёркивает важность точного знания его механических свойств.

В работе методом наноиндентирования исследованы упруго-деформационные характеристики слоистого магнитного полупроводника CrSBr в объёмных кристаллах и на тонких пленках толщиной 20–300 нм с разной стехиометрией.

В стехиометричных кристаллах были обнаружены дискретные скачки внедрения. В зависимости от амплитуды скачков скачки были идентифицированные как микротрещины и pop-in скачки. Отсутствие данных процессов в бромдефицитных образцах, с образовавшейся фазой Cr₂S₃ говорит о том, что причиной этих скачков является слоистая структура вещества. Эти события сопровождаются формированием зон локального отслоения, визуализированных методами SEM и MFM.

На основе механической работы, совершаемой индентером во время преодоления молекулярного слоя в момент совершения скачка, с применением формулы расчета оказываемого давления на стенки трещины, оценена энергия отслоения молекулярного слоя CrSBr: 0.24 J/m², что согласуется с теоретическими предсказаниями (~ 0.21 J/m²) [2]. Это подтверждает, что наблюдаемые скачки обусловлены разрывом слабых ван-дер-ваальсовых связей между слоями, а не разрушением внутрислоистых связей.

Полученные результаты открывают путь к созданию материалов с заданными магнитными и оптическими свойствами, а также к диагностике качества кристаллов по их механическому отклику. Предложенная методика, основанная на анализе скачков внедрения при наноиндентировании, применима и к другим слоистым ван-дер-ваальсовым материалам и может быть использована для оценки их энергии отслоения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № 124013100858-3). Авторы благодарны Тюрину А.И. и Коренкову В.В. за помощь в проведении экспериментов.

1. Telford E.J., Chica D.G., Ziebel M.E. et al. Designing Magnetic Properties in CrSBr through Hydrostatic Pressure and Ligand Substitution // *Advanced Physics Research*. 2023. Vol. 2. P. 2300036.
2. Dey S., Esteras D.L., Baldovi J.J.. Tailoring the properties of the 2D ferromagnet CrSBr by lanthanide doping // *Journal of Physics: Materials*. 2025. Vol. 8. P. 025013.

Светопропускная способность металлополимерных проводящих композитов на основе трековых мембран

*И.М. Долуденко¹, И.С. Волчков¹, В.В. Краснова¹, П.Л. Подкур¹, Д.Р. Хайретдинова^{1,2},
А.К. Зиновьев^{1,3}, В.М. Каневский¹*

¹*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», Москва*

²*Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, Москва*

³*Российский технологический университет МИРЭА, Москва*

УДК: 537.9, 538.9

В данный момент композитные материалы крайне востребованы во многих областях науки и техники. Интерес к подобным структурам обусловлен возможностью комбинирования свойств различных материалов. Одним из типов таких материалов являются металлополимерные композиты (МПК) на основе наноструктур. Они могут сочетать в себе свойства полимеров, например оптическую прозрачность, и проводимость металлической компоненты. Существуют различные методы получения подобных материалов. В данной работе речь пойдет о МПК, полученных методом матричного синтеза, а именно, заполнении электрохимическим методом пор трековых мембран. Данный метод является крайне вариабельных, хорошо контролируемым и легко масштабируемым.

Одним из перспективных направлений создания подобных структур является синтез прозрачных электродов на их основе. Основным преимуществом может стать их гибкость, химическая и физическая стойкость. Однако практическое применение МПК ограничивается необходимостью определения граничных значений возможностей образования проводящих цепей из нанопроволок и достаточной светопропускной способности МПК в зависимости от степени их заполнения металлом, что и являлось целью данной работы.

На первом этапе были получены образцы МПК с разной степенью заполнения, которое контролировалось временем осаждения сплавов в поры. При этом, перед получением контрольных образцов проводилась запись хроноамперрограммы осаждения металла в поры матрицы без ограничения по времени. Исходя из анализа данной кривой определялось время осаждения контрольных образцов. Методами растровой электронной микроскопии было установлено, что времена осаждения роста в 20, 50, 100 и 200 с, соответствует средней длине фронта роста 0.73 мкм; 1.52 мкм; 2.64 мкм и 5.61 мкм соответственно. Данные значения соответствуют 10%; 25%; 50% и 100% от максимального времени заполнения.

На следующем этапе были исследованы электрические свойства полученных МПК. При этом, из-за особенностей расположения пор внутри матрицы, было выдвинуто предположения, что подобные структуры могут обладать анизотропными свойствами проводимости. Для подтверждения данного предположения проводились измерения сопротивления методом записи вольтамперных характеристик при разных углах относительно устойчивой оси большей проводимости. В результате измерений было установлено, что МПК обладают анизотропией проводимости, при этом разница между углами измерения направленными перпендикулярно друг к другу составляло больше порядка при измерении образцов с наибольшей степенью заполнения.

В завершении работы были исследованы параметры светопропускания образцов. Доказано, что светопропускание резко снижается при увеличении степени заполнения, а при 100% заполнении практически равно нулю. Также была исследована возможность наложения двух образцов с одинаковой степенью заполнения. При этом, пропускающая способность сильно снижалась для всех образцов и стремилась к нулю.

Полученные данные говорят о том, что подобные структуры могут быть применены для создания эффективных светопоглотителей, датчиков электромагнитных волн и эуранов.

Работа проведена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Исследование спектральных характеристик экспериментального канала №7 (ГЭК-7) реактора ИРТ-Т (ТПУ)

М.В. Дьячков, В.А. Ульянов, В.Г. Сыромятников, М.Р. Колхидашвили

НИИ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина

УДК:538.9

Основной целью проведенных работ являлось определение точных спектральных характеристик нейтронного пучка, выходящего из горизонтального экспериментального канала №7 (ГЭК-7) исследовательского реактора ИРТ-Т (ТПУ) Томского политехнического университета. Измерения проводились при работе реактора на мощности 6 МВт. Для получения распределения нейтронов по длинам волн применялся времяпролетный метод.

На первом этапе было проведено исследование прямого пучка, выходящего непосредственно из канала ГЭК-7. Для снижения фона в канале был установлен формирующий прямой пучок коллиматор. Результаты показали, что канал обеспечивает высокую плотность потока, однако первичный спектр сильно искажен сопутствующим фоновым излучением. Высокий уровень фона, вызванный быстрыми нейтронами и гамма-квантами, не позволял в полной мере оценить форму спектра тепловых нейтронов. Это обусловило необходимость применения дополнительных методов фильтрации для выделения чистого сигнала.

Для прецизионного определения спектральных характеристик канала в схему измерения было включено нейтронное суперзеркало Ni/Ti с параметром $m=2$ (параметр m определяет критический угол отражения, позволяя выделить нужный энергетический диапазон частиц). Оно использовалось в качестве селективного фильтра для отсеки жесткого излучения. Благодаря своим свойствам, суперзеркало отклоняло только полезную компоненту пучка, позволяя полностью очистить её от быстрых нейтронов и гамма-излучения, проходящих напрямую. Это позволило увидеть структуру распределения тепловых нейтронов, характерную для данного канала.

В ходе экспериментов были получены детальные данные о нейтронном пучке. Установлено, что спектр тепловых нейтронов канала ГЭК-7 имеет выраженный максимум в диапазоне длин волн 1,1–1,2 Å. Использование суперзеркала позволило четко зафиксировать границу спектрального распределения, и подтвердило, что после фильтрации уровень фоновых помех становится пренебрежимо малым. Сравнение прямого и отраженного пучков позволило количественно оценить долю фоновой компоненты в канале, которая эффективно отсекается на длинах волн менее 0,8 Å.

В результате исследования были успешно определены спектральные параметры канала ГЭК-7 реактора ИРТ-Т. Продемонстрировано, что штатный пучок обладает высокой интенсивностью, а применение суперзеркала Ni/Ti ($m=2$) является эффективным способом подготовки пучка для высокоточных экспериментов, требующих минимального уровня гамма-фона и отсутствия быстрых нейтронов. Полученные данные станут основой для планирования дальнейших физических исследований на данном канале и установке ТНР (тестовый нейтронный рефлектометр).

1. Муратов В.Г. и др. Модульный время-амплитудный спектрометр с интерфейсом USB 2.0. Препринт 2750. Гатчина: ПИЯФ, 2007. 13 с.

2. Дьячков М.В., Соловей В.А., Ульянов В.А. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2019. № 12. С. 1.

Влияние импульсного магнитного поля с разным типом сигнала на микротвердость и фазовый состав сплава Al-Li при искусственном старении

М.А. Еремеева, Ю.В. Осинская, С.Г. Магамедова

Самарский национальный исследовательский университет им.акад. С.П. Королева, Самара
УДК: 621.785.78:537.636

Объектом исследования являлся сплав, подвергнутый предварительной термической обработке, включающей закалку (выдержка при температуре 500 °С в течение 1 ч с последующим резким охлаждением в воде при 20 °С) и искусственному старению в импульсных магнитных полях с формой сигнала типа синус и меандр амплитудой напряженности 557.2 кА/м и частотой импульсов 2 Гц при температуре 120 °С в диапазоне времен от 2 до 8 ч.

Микротвердость по методу Виккерса определяли с помощью микротвердомера HAUSER при нагрузке 100 г. Каждое значение микротвердости получали путем усреднения по 30 измерениям. Относительная ошибка среднего значения микротвердости исследуемого материала составила 1–4 %.

Установлено, что микротвердость закаленного сплава Al-Li составляет 83 кГ/мм². Процесс старения без воздействия внешнего магнитного поля приводит к увеличению микротвердости до 114 кГ/мм², что согласуется с общепринятыми представлениями о механизмах упрочнения алюминиевых сплавов. Данное явление объясняется выделением дисперсных упрочняющих фаз, в частности Al₃Li [1], препятствующих движению дислокаций и, как следствие, повышающих прочностные характеристики сплава.

Ключевым результатом исследования является установленный факт влияния формы сигнала импульсного магнитного поля на изменение микротвердости сплава Al-Li в процессе старения. Воздействие импульсного магнитного поля с формой сигнала типа синус и меандр приводит к увеличению микротвердости на 11% и 28% соответственно, что свидетельствует о значимой зависимости эффекта от параметров магнитного поля. Наблюдаемый эффект характеризуется как «отрицательный магнитопластический эффект», выражающийся в увеличении твердости материала под воздействием магнитного поля, противоположно классическому проявлению МПЭ [2]. Предполагается, что увеличение микротвердости при старении в импульсном магнитном поле обусловлено формированием структурно-неоднородного состояния сплава с повышенной плотностью дефектов, что создает дополнительные препятствия для движения дислокаций.

Наложение импульсного магнитного поля с формой сигнала типа синус в процессе старения приводит к смещению дифракционных линий в область меньших углов на 0,037° и сопутствующее уменьшение их полуширины на 0,129°. Данное явление позволяет заключить о формировании более упорядоченной и менее дефектной кристаллической структуры. В отличие от этого, использование импульсного магнитного поля с формой сигнала типа меандр приводит к смещению линий в область больших углов на 0,150°, также сопровождаясь уменьшением полуширины на 0,026°.

1. Бунин К.П., Баранов А.А. Металлография. М: Металлургия. 1970. 256 с.
2. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Петржик Е.А. Магнитопластический эффект: основные свойства и физические механизмы // Кристаллография. 2003. Т. 48, № 5. С. 838–867.

Лазерно-индуцированная структурная динамика в монокристалле кремния
***В.Ф. Ефременко*¹, *А.Г. Куликов*¹, *Е.И. Мареев*¹, *Ф.С. Пиляк*¹, *Н.Н.Обыденнов*¹, *Ф.В. Потёмкин*²,
*Ю.В. Писаревский*¹, *В.Г. Кон*¹**

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

УДК: 538.9

Разработка и использование лазерно-синхротронных методов позволяет управлять функциональными свойствами кристаллов и регистрировать структурные изменения в них. В настоящей работе на синхротронной станции РКФМ КИСИ-Курчатов исследована динамика лазерно-индуцированных деформаций в монокристалле кремния при импульсном лазерном воздействии с использованием стробоскопической методики рентгеновской дифрактометрии с временным разрешением 1 нс.

Полученный массив данных содержит в себе информацию о состоянии кристаллической решетки по времени и глубине. Для приповерхностного рефлекса 111 с глубиной экстинкции 1,5 мкм наблюдается разупорядочение кристаллической решетки с возможной частичной аморфизацией поверхности (уменьшение интенсивности пика) и последующее распространение ударной волны (образование сателлита пика) (рис. 1). На рефлексах 333 и 555 с большей глубиной экстинкции зафиксирован процесс распространения фронта тепловых деформаций при теплопереносе в объем кристалла.

Полученные результаты могут быть применены для бесконтактной пирометрии. Управляемое формирование лазерно-индуцированных градиентов деформаций в кремниевых рентгенооптических элементах актуально для фокусировки и быстрого управления параметрами синхротронного пучка.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-73-00039).

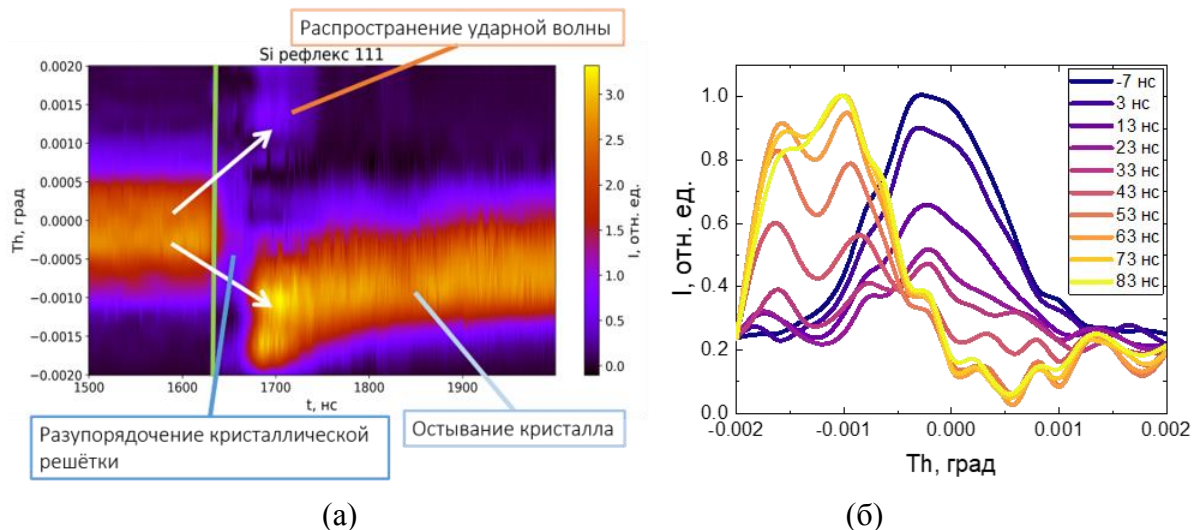


Рисунок. 1. Результат лазерно-синхротронных рентгенодифракционных экспериментов на рефлексе 111. (а) – тепловая карта интенсивности в координатах время(нс)-угол(град)-интенсивность(I), зеленая линия – момент лазерного воздействия. (б) – эволюция КДО после воздействия лазерным импульсом на монокристалл Si с шагом 10 нс.

О гравитации на больших (галактических) расстояниях

И.Л. Жогин^{1,2}

¹ Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск

² Minkowski Institute, Montréal

УДК: 530.12, 53.01, 53.02, 538.9

Барионное соотношение Талли-Фишера $\log M_{\text{bar}} = c + b \log V_{\text{flat}}$ связывает барионную массу спиральных галактик и их асимптотическую скорость вращения V_{flat} . Плоские асимптотики кривых вращения требуют больше гравитации на галактических масштабах, для чего была предложена тёмная материя, dark matter (DM). Многие астрофизики, однако, указывают на факты/наблюдения, которые противоречат этой гипотезе (DarkMatterCrisis.wordpress.com). Альтернативой, по их мнению, является модель MOND, из которой следует наклон $b=4$.

В барионную массу M_{bar} вклад дают звёзды, пыль и газ, атомарный и молекулярный (HI/HeI, H₂); для малых галактик (карликовых) важен вклад ионизованного газа (НИ; как показал Н.Гнедин, межгалактическое излучение ионизирует в них значительную часть газа), который трудно наблюдать. Определение всех вкладов это непростая задача, связанная с предположениями и моделированием. В статье [1] для 32-х галактик ($V_{\text{flat}} \approx 45 \dots 280$ км/с) был найден наклон $b \approx 3$. При этом применялись четыре метода оценки массы звёзд, масса молекулярного газа оценивалась непрямими методами (масса НИ не оценивалась).

Более низкий наклон $b \approx 2$ получен из моделирования звездообразования в галактиках (нелинейной связи их массы и светимости $L_{\text{gal}} \approx M_{\text{gal}}^2$, кроме карликовых; соотношение газа и звёзд разной массы – светимость отдельных звезд резко зависит от их массы: $L \approx M^4$), выполненного в работе [2], см. App.G. Такой наклон может означать, что на галактических расстояниях сила гравитации принимает вид $F \sim M_{\text{bar}}/R$; сравнение такой модели, названной MOGA (Modified Gravity Attraction), и MOND в работе [3] показывает, что вторая, в отличие от первой, не сохраняет импульс и момент импульса, а также приводит к нестабильности динамики, например, систем из трёх тел. MOGA возможна для 5D варианта Абсолютного Параллелизма с гравитацией 4-го порядка и расширяющейся Вселенной-на-Бране (продольная сферически-симметричная волна) [4] – ньютоновское притяжение переходит на больших расстояниях, $R > L$, в $F(R) = GMm/(LR)$; L характеризует толщину Браны по доп-измерению.

Для тонкого диска (цилиндрическая симметрия) притяжение в плоскости диска, $F(R)$, зависит от массы M_R , ограничиваемой этим радиусом: $F/m = GM_R/(LR)$, m – тестовая масса (пренебрегаем ньютоновским вкладом, т.е. простая модель силы $\sim 1/R$). На оси (однородного) диска радиуса a притяжение равно $F(Z)/m = GM_a Z/(L a^2) \ln(1 + a^2/Z^2)$.

Для однородного шара (bulge) радиуса a сила притяжения равна (положим $GMm/L=1$) $F(R) = 3/(8a) \{ a/R + R/a - 0.5(a/R - R/a)^2 \ln[(R+a)/|R-a|] \}$; сила максимальна при $R=a$, $F_a a = 3/4$. Безразмерная функция в скобках не меняется при замене $a/R \leftrightarrow R/a$ (некий «скейлинг»). Находим также похожие разложения в ряд для малых и больших расстояний ($R < a$, $R > a$):

$$F(R) = R/a^2 \{ 1 - (R/a)^2/5 - \dots - 3(R/a)^{2n}/[(2n-1)(2n+1)(2n+3)] - \dots \} = 1/R \{ 1 - (a/R)^2/5 - \dots \}.$$

Логарифмический рост потенциала останавливается, когда «уплотнение» меняется на «разрежение» (underdensity), т.е. пустоту, проявляющуюся как отрицательная масса. Наша Галактика находится в КВС-пустоте (void; одной из крупнейших), с заметным смещением от её центра; дефокусировка КВС-потенциалом создаёт «диполи», зависящие от z (redshift).

1. Ponomareva A.A. et al. From light to baryonic mass: the effect of the stellar mass-to-light ratio on the Baryonic Tully–Fisher relation // MNRAS. 2018. V. 474. P. 4366–4384.
2. Valageas P., Schaeffer R. The mass and luminosity functions of galaxies and their evolution // Astron. Astrophys. 1999. V. 345, P. 329.
3. Toxvaerd S. Approximations and modifications of celestial dynamics tested on the three-body system. arXiv:2512.03823 [gr-qc] (see also arXiv:2403.02848 [astro-ph.GA]).
4. Жогин И.Л. Продольные волны в пятимерном Абсолютном Параллелизме и космология релятивистски расширяющейся браны // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2025. № 2. С. 40–51. (stfi.ru; см. также презентацию на PIRT-25: doi.org/10.13140/RG.2.2.20072.79360).

Влияние состава и кристаллической структуры на формирование магнитных свойств феррита висмута, легированного празеодимом

А.А. Зубрилин, И.А. Вербенко, Д.В. Лымарь

НИИ физики Южного федерального университета, Ростов-на-Дону

УДК: 537.9, 538.9

Феррит висмута (BiFeO_3) представляет собой мультиферроик, сохраняющий сегнетоэлектрические и антиферромагнитные свойства при достаточно высоких температурах ($T_C=830$ °С, $T_N=370$ °С). Однако его практическое ограничено термодинамической неустойчивостью, приводящей к образованию примесных фаз. Введение редкоземельных элементов в BiFeO_3 с одной стороны стабилизирует кристаллическую структуру и снижает концентрацию примесных фаз, с другой — приводит к усилению магнитных свойств за счёт появления слабого ферромагнетизма.

В работе исследованы структурные и магнитные свойства керамических твёрдых растворов системы $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{FeO}_3$, $x = 0.10-0.26$, $\Delta x=0.02$.

Серия образцов синтезирована методом твёрдофазных реакций в две стадии ($T_1=550$ °С и $T_2=830$ °С) с последующим спеканием ($T_{\text{сп.}}=890-920$ °С). Структурные параметры определены методом рентгеновской порошковой дифракции (ДРОН-3, излучение $\text{Co}_{K\alpha}$), микроструктура исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии (Carl Zeiss EVO 40), магнитные характеристики измерены на вибрационном магнитометре (LakeShore VSM 7404) при комнатной температуре.

Установлено, что замещение ионов висмута на празеодим индуцирует структурный переход из ромбоэдрической фазы в ромбическую при критической концентрации $x \approx 0.14$. В интервале $0.14 \leq x \leq 0.22$ наблюдается морфотропная область с сосуществованием обеих фаз, при $x > 0.22$ формируется однофазная ромбическая структура.

Ключевым результатом является нелинейная эволюция магнитных свойств. В ромбоэдрической фазе ($x < 0.14$) образцы демонстрируют параметры, типичные для антиферромагнетика ($M_S \approx 0.09-0.12$ emu/g, $H_c < 400$ Э). При переходе в морфотропную область наблюдается резкое усиление намагниченности: M_S возрастает до 0.206 emu/g ($x = 0.20$), H_c достигает 4979 Э. Особый интерес представляет состав $x = 0.22$, где при формировании однофазной ромбической структуры фиксируется максимальная намагниченность $M_S = 0.530$ emu/g — в 5.7 раза выше, чем в слаболегированном образце. Отношение M_r/M_S растёт от 0.013 до 0.407 ($x = 0.24$), что указывает на переход к упорядоченной магнитной структуре с повышенной анизотропией.[1]

Усиление магнетизма, предположительно, объясняется совместным действием двух факторов: (1) искажением связей Fe–O–Fe и ослаблением антиферромагнитного суперобменного взаимодействия согласно правилам Гуденафа–Канамори [2]; (2) подавлением спиральной циклоидной модуляции и переориентацией спинов вдоль оси c при переходе в ромбическую фазу [1]. Резкий скачок M_S при $x = 0.22$ коррелирует с полным подавлением циклоиды в однофазной ромбической структуре.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2026-0022). Использовано оборудование Центра коллективного пользования НИИ физики Южного федерального университета «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел».

1. Singh O., Agarwal A., Das A., Sanghi S., Jindal A. Evolution of structural and magnetic phases in Nd doped BiFeO_3 multiferroics with sintering time // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. Vol. 442. P. 200–207.
2. Гуденаф Дж. Б. Магнетизм и химическая связь // пер. с англ. Д. М. Мазо, Б. Е. Левина ; под ред. Б. Е. Левина, С. С. Горелика. Москва : Металлургия, 1968. 325 с.

Эффективные немонокристаллические тандемные солнечные элементы на основе органики и перовскитов

В.С. Иванов, Д. Сапори

Физико-технический мегафакультет, Университет ИТМО, Санкт-Петербург

УДК: 621.383.51, 538.9

В настоящее время использование галогенидных перовскитов в тандемных солнечных элементах является перспективным для получения экономичных солнечных элементов с КПД >30% [1]. Современные исследования в основном посвящены поиску и оптимизации материалов для тандемных солнечных элементов, но лишь немногие работы сосредоточены на тандемной архитектуре – способе подключения ячеек. В случае монокристаллического подключения обычно рассматривается последовательное соединение ячеек [2]. Однако, использование таких структур ограничено условием согласования тока, что сужает выбор поглотителей и ставит под сомнение характеристики устройства в реальных условиях, где наблюдаются спектральные вариации [3]. В данной работе исследуется возможность параллельного соединения двух поглотителей с близкими энергиями запрещенной зоны: $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (1,59 эВ) и PM6:Y6 (1,36 эВ). Экспериментально показано, что при суммировании токов напряжение холостого хода (V_{xx}) тандемного элемента стремится к снижению до самого низкого значения V_{xx} отдельной ячейки. Было проведено моделирование на основе эквивалентной схемы с одним диодом, чтобы исследовать условия согласования напряжений и влияние последовательных сопротивлений субъячеек на характеристики тандема. Результаты показывают, что для предотвращения потерь в энергоэффективности предпочтительнее использовать напряжения холостого хода, близкие к требуемым. Наконец, было предложено решение, позволяющее комбинировать поглотители с различными энергиями запрещенной зоны: объединение ячеек для управления напряжением холостого хода субъячеек при сохранении той же активной площади. Благодаря такой стратегии продемонстрирована немонокристаллическая архитектура тандема с почти 21% энергоэффективности в параллельном соединении, что открывает путь к созданию эффективных монокристаллических тандемов в параллельном соединении.

1. Yadav S. et al. Optoelectronic modeling of all-perovskite tandem solar cells with design rules to achieve >30% efficiency // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2022. V. 242. 111780.
2. Etxebarria I. et al. Series vs parallel connected organic tandem solar cells: Cell performance and impact on the design and operation of functional modules // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2014. V. 130. P. 495–504.
3. Wei J. et al. Toward Current Matching in Tandem Dye-Sensitized Solar Cells // *Materials*. 2020. V. 13. No. 13. 2936.

Механизмы деформационного упрочнения композитов Cu-NbTi под действием пакетной гидроэкструзии

М.М. Ивахненко¹, З.А. Самойленко², Е.И. Пушенко², Н.Н. Ивахненко^{3,4}, М.Ю. Бадекин⁴

¹ГБУДО Донецкая малая академия наук, Донецк

²ФГБНУ «Донецкий физико-технический технический институт им. А.А. Галкина», Донецк

³ФГАОУ ВО Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва

⁴ФГБОУ ВО РГАУ МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва

УДК 538.9

Сверхпроводящие композиты на основе сплава ниобий-титан, армированные медной матрицей, продолжают оставаться одними из наиболее востребованных материалов [1].

В работе предложена методика получения многоволоконистых композитов, основанная на многократном цикле совместной деформации и сборки, обеспечивающем формирование однородной волокнистой структуры. В качестве матрицы использовали медь высокой чистоты ($\geq 99,99$ мас.%), а упрочняющим компонентом служил интерметаллидный сплав Nb–Ti (50 мас.% Ti), синтезированный методом дуговой плавки в атмосфере аргона с последующей электронно-лучевой переплавкой для повышения гомогенности и чистоты слитка [2]. Применяли метод кручения в камере Бриджмена при гидростатическом давлении 75 атм, скорости вращения Пуассона 0,5 об/мин и числе оборотов до 5, что исключало значительный нагрев образца. Фазовый состав исследовали методом рентгеновской дифракции [3].

Было замечено, что изменения в свойствах материала обусловлены не химическими превращениями или образованием новых фаз, а структурной перестройкой на микро- и наноуровне. Рентгеноструктурный анализ подтверждает стабильность фазового состава на всех стадиях обработки: в образцах присутствуют только две кристаллические фазы — гранецентрированная кубическая медь и объёмноцентрированный твёрдый раствор Nb(Ti). Наблюдается уширение дифракционных пиков с ростом числа оборотов, что свидетельствует об измельчении кристаллитов до ультрамелкозернистого и нанокристаллического состояния, а также о накоплении высоких микронапряжений вследствие плотной сетки дислокаций. Снижение интенсивности пиков Nb(Ti) при $n=5$ напрямую коррелирует с экстремальным дроблением Nb–Ti-включений. Эти структурные изменения находят прямое отражение в механических свойствах, в частности в зависимости микротвёрдости от числа оборотов. Начальное снижение твёрдости при $n=0.5-1$ объясняется разупрочнением за счёт дробления крупных включений и возможной локальной рекристаллизации меди. Минимум твёрдости при $n=2$ соответствует состоянию максимальной структурной перестройки, когда фазы уже диспергированы, но упрочняющие механизмы ещё не доминируют. Резкий рост твёрдости при $n=5$ (>4 ГПа) является следствием деформационного упрочнения.

Таким образом, основной механизм упрочнения композита Cu–NbTi носит структурный характер. Химическая стабильность фаз сохраняется на всём протяжении обработки, но их морфология, размер, распределение и характер границ претерпевают изменения. Именно эти факторы определяют сочетание высокой прочности и сохранения функциональных свойств.

1. Коржов В.П. Низкотемпературные сверхпроводящие материалы / В.П. Коржов // Перспективные материалы и технологии: в 2 томах / под. ред. Рубаника В.В. Том 2. Витебск: Витебский государственный технологический университет. 2019. С. 295-313.

2. Жабин А.Н. и др. Волокнистые композиционные материалы с металлической матрицей (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. №. 6 (100). С. 27-35.

3. Самойленко З.А. и др. Разнообразие беспорядка и разномасштабного порядка при вариациях интенсивной деформации меди // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. № 1. С. 82-90.

Определение локального атомного и электронного строения фазы Cu_3Si с использованием метода ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии
Е.С. Керсновский¹, Г.П. Потуданский¹, И.В. Польшин¹, С.А. Ивков¹, Н.С. Буйлов¹, А.Е. Никонов², А.В. Ситников², К.А. Барков¹

¹*Воронежский государственный университет, Воронеж*

²*Воронежский государственный технический университет, Воронеж*

УДК:538.9

Фаза Cu_3Si представляет особый интерес в качестве перспективного анодного материала для нового типа литий-ионных аккумуляторов [1]. Однако, фаза Cu_3Si имеет три полиморфные модификации $\eta\text{-Cu}_3\text{Si}$, $\eta'\text{-Cu}_3\text{Si}$ и $\eta''\text{-Cu}_3\text{Si}$, кристаллическая структура которых на сегодняшний день однозначно не определена и предполагает два варианта элементарной ячейки ($P\text{-}3m1$)[2] и $\eta'(R\text{-}3)$ [3]. При этом согласно литературным данным [2] при формировании тонких плёнок Cu-Si формируется только фаза Cu_3Si , но какая именно ее модификация установить крайне сложно ввиду схожести дифракционных картин от разных полиморфов данной фазы. Таким образом определение типа элементарной ячейки фазы Cu_3Si , сформированной в тонких пленках, является важной и нерешенной задачей.

В рамках данной работы получение фазы Cu_3Si в тонких пленках осуществлялось методом ионно-лучевого распыления составной мишени на подложки $\text{Si}(100)$ в вакууме при давлении $1 \cdot 10^{-5}$ torr. Присутствие кристаллической фазы Cu_3Si в полученных пленках определялось методом рентгеновской дифракции (РД) на дифрактометре с $\text{Cu } K\alpha_{1,2}$ излучением ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). Исследование электронного строения ближнего порядка фазы Cu_3Si проводилось методом ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (УМРЭС) на рентгеновском спектрометре-монохроматоре РСМ-500 по $\text{Si } L_{2,3}$ -спектрам, отражающим парциальную плотность $\text{Si } 3s$ состояний в валентной зоне. Расчет рентгеновских эмиссионных $\text{Si } L_{2,3}$ -спектров фаз $\eta\text{-Cu}_3\text{Si}$, $\eta'\text{-Cu}_3\text{Si}$ проводился в рамках теории функционала плотности методом линейаризованных присоединенных плоских волн [4].

В ходе работы были сформированы плёнки $\text{Cu}_x\text{Si}_{100-x}$ в пределах содержания меди от 9 ат. % до 53 ат. %. По данным РД во всех плёнках $\text{Cu}_x\text{Si}_{100-x}$ сформировалась фаза Cu_3Si , при этом увеличение содержания меди в пленках привело к росту интенсивности максимума от фазы Cu_3Si . Однако по данным РД невозможно определить какой тип элементарной ячейки $\eta(P\text{-}3m1)$ или $\eta'(R\text{-}3)$ у фазы Cu_3Si в полученных пленках $\text{Cu}_x\text{Si}_{100-x}$. Поэтому для определения типа элементарной ячейки фазы Cu_3Si дальнейшие исследования были сфокусированы на ближнем порядке расположения атомов. Для этого в рамках теории функционала плотности были теоретически рассчитаны $\text{Si } L_{2,3}$ -спектры эмиссии Cu_3Si для полиморфов $\eta(P\text{-}3m1)$ и $\eta'(R\text{-}3)$. Корректно описать экспериментальный $\text{Si } L_{2,3}$ -спектры, полученный методом УМРЭС, удалось только с использованием теоретически рассчитанного спектра для $\eta\text{-Cu}_3\text{Si}$ со структурой ($P\text{-}3m1$). Таким образом можно сделать вывод, что ближний порядок фазы Cu_3Si в тонких пленках $\text{Cu}_x\text{Si}_{100-x}$ образован элементарной ячейкой $\eta\text{-Cu}_3\text{Si}(P\text{-}3m1)$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10294.

1. Liu L., Li M., Chu L., Jiang B., Lin R. Facile fabrication of flexible Si-based nanocomposite films as high-rate anodes by layer-by-layer self-assembly // Appl. Surf. Sci. 2019. vol. 476. pp. 501–512.
2. Wen C., Spaepen F. In-situ electron microscopy of the phases of Cu_3Si // Philos. Mag. 2007. vol. 87, no. 35, pp. 5581–5589.
3. An Z., Kamezawa C., Hirai M., Kusaka M., Iwami M. Valence Band Density of States of Cu_3Si Studied by Soft X-Ray Emission Spectroscopy and a First-Principle Molecular Orbital Calculation // J. Phys. Soc. Japan. 2002. vol. 71. no. 12. pp. 2948–2952.
4. Kurganskii S.I., Pereslavl'tseva N.S., Levitskaya E.V., Yurakov Y.A., Rudneva I.G., Domashevskaya E.P. Electronic structure of rhenium disilicides // J. Phys. Condens. Matter. 2002. vol. 14. no. 27. pp. 6833–6839.

Рентгенографическое исследование структуры бактериальной целлюлозы для создания нанокompозитов

В.В. Киселев^{1,2}, А.И. Прусский², А.К. Хрипунов³, Н.Н. Рожкова¹

¹Карельский научный центр РАН, Петрозаводск

²Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск

³Филиал НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИВС, Санкт-Петербург

УДК: 538.9

Бактериальная целлюлоза (БЦ) — это биополимер, исследовательский интерес к которому объясняется его кристаллической наноструктурой и такими свойствами, как биосовместимость, биоразлагаемость и способность удерживать воду, что перспективно для различных биотехнологических и биомедицинских применений [1]. Особое внимание привлекает возможность использования БЦ в качестве матрицы для биологически активных наночастиц при создании раневых покрытий. Конечные свойства материала существенно зависят от условий обработки. Опираясь на апробированные методики моделирования структуры различных целлюлозных материалов [2], в работе это было показано на БЦ.

Объектом исследования были гелеобразные пленки бактериальной целлюлозы, полученные с использованием штамма *Komagataeibacter rhaeticus*. Для изучения влияния на структуру материала были применены четыре различных режима сушки, отличающихся температурой и временем обработки. Структуру образцов исследовали методом рентгеновской дифракции (дифрактометр типа ДРОН, CuK α -излучение) в геометриях на отражение и прохождение. Рассчитывали степень кристалличности (СК) и области когерентного рассеяния (ОКР), были построены плоскости поперечного сечения в плоскости **ab**. Морфологию поверхности изучали методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии, термические свойства оценивали с помощью синхронного термического анализа, а также проводили измерения водопоглощения образцов. Для сравнительного анализа надмолекулярной структуры были выбраны образцы БЦ после лиофильной и воздушной сушки, поскольку эти методы позволяют получить наименее деформированные и однородные материалы. Методом Руланда была рассчитана степень кристалличности (СК), а методом Шеррера области когерентного рассеяния (ОКР). Для сублимированных образцов СК ~ 81%, площадь схемы поперечного сечения $S_1 \sim 1983 \text{ \AA}^2$, тогда как для конвективно высушенных эти показатели выше: ~92% и $S_2 \sim 1995 \text{ \AA}^2$. В обоих случаях S составляет $\sim 50 \times S_{ab}$ (где $S_{ab} = 39,5 \text{ \AA}^2$ – площадь поперечного сечения элементарной ячейки целлюлозы I α). Следующие методы анализа подтвердили, что конвективная сушка приводит к формированию плотной структуры с температурой деструкции $\sim 353^\circ\text{C}$, тогда как криогенная и лиофильная сушка позволяют сохранить пористость образца, для которого характерна более низкая температура горения $\sim 332^\circ\text{C}$ и высокие показатели водопоглощения.

В работе установлено, что базовая кристаллическая решетка (целлюлоза I α) инвариантна к типу обработки, тогда как надмолекулярная организация напрямую зависит от метода сушки. Это позволяет направленно получать либо высокопористые сорбенты (лиофильная сушка), либо плотные термостабильные пленки (воздушная сушка), сохраняя однородную основу для последующей модификации наночастицами.

Работа выполняется в рамках бюджетной темы FWME-0222-2019-0065.

1. Smyslov R. Y. et al. Composite hydrogels based on bacterial cellulose and poly-1-vinyl-1, 2, 4-triazole/phosphoric acid: Supramolecular structure as studied by small angle scattering // *Biomimetics*. 2023. Т. 8. №. 7. С. 520.
2. Прусский А. И. и др. Исследование структуры порошковых наноцеллюлоз, выделенных из промышленных отходов, методами рентгеновской дифракции и компьютерного моделирования // *Журнал технической физики*. 2026. Т. 96. №. 2. С. 317-329.
3. Mohamad S. et al. Influence of drying method on the crystal structure and thermal property of oil palm frond juice-based bacterial cellulose // *Journal of Materials Science*. 2022. Т. 57. №. 2. С. 1462-1473.

Об эффектах кристаллизации в тонких прозрачных проводящих пленках SnO₂

*А.С. Коваленко^{1,2}, А.И. Кушакова^{1,2}, А.М. Николаев¹, Н.Н. Губанова^{1,3}, В.А. Матвеев³,
А.Г. Иванова¹, О.А. Загребельный¹, Е.А. Бондарь⁴, Е.А. Дмитриева⁴, О.А. Шилова^{1,2}*

¹Филиал НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИХС, Санкт-Петербург

²СПбГТИ (ТУ), Санкт-Петербург

³НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина

⁴КазНИТУ, Алматы

УДК: 539.232, 538.9

Пленки диоксида олова являются перспективным материалом для использования в перовскитовых солнечных элементах, сенсорных дисплеях и других электронных устройствах в качестве прозрачного электропроводящего слоя благодаря высокой прозрачности, низкому удельному сопротивлению, доступности и нетоксичности. Для использования в данных приложениях необходимо, чтобы пленки SnO₂ были хорошо окристаллизованы, прозрачны и обладали низким удельным сопротивлением. Для достижения кристаллической структуры и высокой проводимости пленок при их синтезе используют инициаторы кристаллизации, такие как NH₄OH и NH₄F, однако при введении данных компонентов существует проблемы сохранения высокой прозрачности. В связи с этим целью данной работы является получение тонких кристаллических пленок SnO₂ с высокой прозрачностью и низким удельным сопротивлением.

Кристаллические пленки SnO₂ формировали на стеклянных подложках методом центрифугирования и на подложках из полиэтилентерефталата методом спрей-пиролиза из золь-гель систем на основе SnCl₄ в этиловом спирте. В качестве инициатора кристаллизации использовали NH₄OH (от 0,1 до 1,6 об.%) [1,2]. Также кристаллические пленки SnO₂ на стеклянных подложках получали из золь-гель систем на основе SnCl₂ в этиловом, изопропиловом и бутиловом спиртах методом центрифугирования с последующей термообработкой при 450 °С. В данном случае в качестве инициатора кристаллизации использовали NH₄F (от 5 до 15 ат. %) [3]. Для полученных пленок исследовали фазовый состав, морфологию, прозрачность и удельное поверхностное сопротивление.

Было выявлено, что при получении пленок SnO₂ из золь-гель систем на основе SnCl₄ с использованием NH₄OH в качестве инициатора кристаллизации в пленках помимо SnO₂ присутствуют кристаллы скелетной формы роста: NH₄Cl [1] или (NH₄)₂[SnCl₆] со структурой перовскита [2]. При увеличении количества вводимого в систему NH₄OH от 0,1 до 1,6 об. % размер образующихся кристаллов увеличивается от ~10 мкм до ~200-300 мкм, что приводит к значительному снижению прозрачности образующихся пленок с ~90 % до ~70 % в видимой области спектра (при 550 нм) [1,2]. При получении пленок SnO₂ из золь-гель систем на основе SnCl₂ в этиловом, изопропиловом и бутиловом спиртах и использовании NH₄F в качестве инициатора кристаллизации в пленках SnO₂ присутствуют вкрапления металлического олова, что, скорее всего, связано с диспропорционированием SnO на SnO₂ и Sn [3]. Результаты исследования и статистическая обработка данных (с достоверностью 95 %) показали, что основным фактором, влияющим на морфологию, прозрачность и удельное поверхностное сопротивление пленок SnO₂, является тип органического растворителя.

Таким образом, оптимальное сочетание свойств (прозрачность ~84 %, удельное поверхностное сопротивление ~3·10⁹ Ω/□) было достигнуто для пленок SnO₂, полученных из золь-гель систем на основе SnCl₂ в изопропиловом спирте с содержанием 10 ат.% фтора [3].

1. Kovalenko A.S. et al. Optimization of SnCl₂:NH₄F-Derived Sols for Preparation of Thin Transparent Conductive Crystallized SnO₂ Films // Coatings. 2026. V. 16. No. 2. P. 210.
2. Dmitriyeva E.A. et al. Structure and Properties of Thin Films Prepared on Flexible Substrates from SnCl₄-Derived Solutions // Coatings. 2024. V. 14. P. 1343.
3. Bondar' E.A. et al. Composition and Morphology of Transparent Thin Films Prepared from Water-Ethanol Sols Based on Tin(IV) Compounds // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2025. V. 70. No. 2. P. 121–129.

Влияние концентрации атомов хрома на эффект обменного смещения в ферримагнетике Fe_2CrSe_4

В.А. Комарова, Д.А. Шишкин, Н.В. Баранов

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург

УДК: 537.9, 538.9

Эффект обменного смещения (ЭОС) – это смещение петли гистерезиса вдоль оси магнитного поля, наблюдаемое в магнитогетерогенных системах. Обычно этот эффект связывают с формированием однонаправленной обменной анизотропии из-за взаимодействия на границах раздела ферромагнитной (ФМ) и антиферромагнитной (АФ) фаз с разными температурами упорядочения при наличии достаточной магнитокристаллической анизотропии в АФ фазе. Данный эффект известен уже более 60 лет, однако интерес к нему не ослабевает, что связано с его практическим применением в микроэлектронике и с поисками новых материалов на его основе [1].

Недавно нами было обнаружено наличие точки компенсации намагниченности при $T_K \approx 140$ К и большой эффект обменного смещения в соединении Fe_2CrSe_4 , которое обладает ферримагнитным упорядочением при температурах ниже 300 К. При температуре 2 К смещение петель магнитного гистерезиса достигало величины $H_{EB} = 6.6$ кЭ [2], что, по-видимому, связано с гетерогенным магнитным состоянием образца из-за неоднородного распределения атомов железа и хрома. Эффект возникает даже после охлаждения в нулевом внешнем магнитном поле. Установлено, что на величину ЭОС образца Fe_2CrSe_4 сильное влияние оказывают дополнительные термообработки. Для выяснения механизма обменного смещения в этом соединении и определения основных факторов, оказывающих влияние на величину эффекта, в настоящей работе выполнен синтез образцов с отклонением концентрации атомов хрома в соединении Fe_2CrSe_4 и проведено исследование их структуры и магнитных свойств, а также проведены эксперименты по дифракции нейтронов на образце Fe_2CrSe_4 для установления распределения атомов хрома и железа в катионной подрешетке.

Соединения были получены методом твердофазного синтеза в вакуумированных ампулах при температуре 900°C с последующим отжигом. Кристаллическая структура исследована с помощью рентгеноструктурного анализа (дифрактометр Bruker D8 Advance), а также с помощью порошковой нейтронной дифракции на импульсном реакторе ИБР-2М на установке ДРВ в ЛНФ имени И.М. Франка в г. Дубна. Измерения намагниченности проводились в интервале температур от 2 К до 350 К в полях до 90 кЭ с помощью PPMS DynaCool компании Quantum Design, а также в интервале температур от 80 К до 400 К в полях до 17 кЭ с помощью вибромагнитометра Lake Shore VSM 7407.

Анализ рентгеновских данных с помощью программы Fullprof показал, что все полученные соединения изоструктурны исходному (пространственная группа $I2/m$). Температуры перехода в ферримагнитное состояние для $\text{Fe}_{2.1}\text{Cr}_{0.9}\text{Se}_4$ и $\text{Fe}_{1.9}\text{Cr}_{1.1}\text{Se}_4$ равны 317 К и 301 К соответственно, для исходного $T_N = 300$ К. Точка компенсации при увеличении концентрации хрома увеличивается до 240 К, а при уменьшении концентрации снижается до 80 К. Спонтанный эффект обменного смещения для концентрации хрома 1.1 уменьшился до 0.5 кЭ, а для Cr-0.9 практически не изменился ($H_{EB} = 6.5$ кЭ). Обработка результатов нейтронной дифракции на образце Fe_2CrSe_4 в парамагнитном состоянии выявила неравновероятное распределение атомов хрома между позициями металла $2a$ и $4i$.

Работа выполнена при поддержке государственного задания шифр «Магнит» Г.р. № 122021000034-9

1. Giri S. et al. Exchange bias effect in alloys and compounds // Journal of Physics: Condensed Matter. 2011. V. 23. No. 7. P. 073201.
2. Komarova V.A. et al. Exchange bias effect and compensation point in the bulk ferrimagnet Fe_2CrSe_4 // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2023. V. 588. P. 171511.

Исследование теплофизических свойств хладагента в твердой фазе в системах криогенного охлаждения сверхпроводниковых магнитов

А.И. Кондратьев, Д.Н. Диев, А.В. Наумов, А.В. Поляков, Д.С. Яшкин

НИЦ «Курчатовский институт», Москва

УДК: 538.9

В рамках работы по разработке системы охлаждения сверхпроводящих магнитов, проведён эксперимент для изучения теплопроводности хладагента в твердой фазе. Создан экспериментальный стенд. Применялся импульсный нагрев нагревательного элемента, замороженного в хладагент с регистрацией температурного отклика термометров в зависимости от расстояния до нагревательного элемента. Получены данные, позволившие оценить скорость распространения теплового импульса в среде и восстановить пространственно-временную картину распределения температуры. Проанализированы особенности теплопроводности исследуемого хладагента в твёрдой фазе. В дальнейшем эти данные будут использованы для изучения перехода в нормальное состояние сверхпроводящего магнита с разработанной системой охлаждения.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Удивительные пористые стекла — неорганическая губка, которая впитывает все!

М.Ю. Конон, Т.В. Антропова

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИХС, Санкт-Петербург

УДК: 666.189.242, 538.9

Пористыми стеклами (ПС) называют силикатные (высокремнеземные) каналные наноструктуры, получаемые путем сквозного химического травления (выщелачивания) щелочборосиликатных (ЩБС) двухфазных стекол с двухкаркасной структурой с взаимопроникающими фазами, которая формируется в ходе процесса фазового разделения при наведении специальной термической обработки [1,2]. В результате химической проработки образуется стеклообразный пористый материал с губчатой структурой и содержанием SiO_2 около 96 %, обладающий однородностью химического состава, низким уровнем посторонних примесей, большой удельной поверхностью кремнеземного сорбента, термической, химической и микробиологической устойчивостью и механической прочностью [1-4]. В настоящее время ПС представляют собой единственный тип пористых сорбентов, позволяющий, исходя из его структурных особенностей, реализовать размеры пор во всем диапазоне классификации ИЮПАК [3]. ПС являются уникальными неорганическими материалами, нашедшими широкое практическое применение в мембранных и сорбционных технологиях [2]. В последние годы интерес к этим материалам усилился в связи с перспективами их применения в энерго- и ресурсосберегающих технологиях для оптики, лазерной техники, пищевой и медицинской промышленности, аналитического приборостроения [2]. Помимо этого, ПС активно используются в качестве матрицы-носителя для создания композиционных материалов самого разного назначения.

В докладе будут рассмотрены теоретические основы метастабильного фазового разделения, процессы получения ПС, области практического применения ПС. Также будут освещены различные композиционные материалы, получаемые на базе ПС, и модификация исходных ЩБС систем, для придания ПС новых полезных свойств.

Работа выполнена в рамках государственного задания Филиала НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС на 2025-2027 гг. (номер государственной регистрации №1024030700034-2-1.4.3).

1. Двухфазные стекла: структура, свойства, применение // Под. ред. Б. Г. Варшала – Л.: Наука, 1991. – 276 с.
2. Антропова Т. В. Технология пористых стекол и перспективы их применения для биохимического анализа // В кн.: Исследование, технология и использование нанопористых носителей лекарств в медицине. Шевченко В. Я. и др. СПб.: Химиздат, 2015. с. 285 – 313.
3. Janowski F., Enke D. Porous Glasses. Handbook of Porous Solids. Volume 3 Copyright WILEY-VCH Verlag GmbH, Federal Republic of Germany. 2002 Chapter 4.6. P. 1432-1542.
4. Антропова, Т.В. Неорганические функциональные стеклообразующие материалы на основе ликвидирующих щелочборосиликатных систем // В кн. «ИХС РАН-80 лет. Современные проблемы неорганической химии». Под общей редакцией академика В.Я. Шевченко. - СПб.: Арт.-Экспресс, 2016. 340с.

Лазерная печать микроструктур CdTe: спектроскопические и структурные особенности

И.О. Кошелев¹, И.С. Волчков¹, В.С. Жигарьков^{1,2}, В.М. Каневский¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва

²Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской академии наук, Москва

УДК: 548.532.78; 539.216.2; 539.23; 538.975; 621.373.8.

В настоящее время лазерная печать методом лазерно-индуцированного прямого переноса (LIFT) находит применение в различных областях науки и техники. Перспективным направлением исследований является LIFT фотолюминесцентных [1] и полупроводниковых наноматериалов [2]. Это открывает возможности использования полученных функциональных материалов в фотонике и полупроводниковой наноэлектронике.

Объектом исследования были тонкие пленки CdTe, выращенные методом термического напыления на лабораторной установке для осаждения тонких пленок, разработанной в Институте кристаллографии им. А.В. Шубникова, с использованием методики, описанной в [3]. Время осаждения варьировалось от 40 до 80 минут. Образцы выращивались на аморфных силикатных стеклянных подложках. Полученные пленки CdTe имели толщину 80 ± 5 нм, 120 ± 10 нм и 200 ± 10 нм.

Для переноса частиц CdTe с поверхности донорной подложки на акцепторную использовалась лазерная система с импульсным волоконным лазером, генерирующим гауссовы импульсы с длиной волны $\lambda = 1064$ нм, длительностью импульса $\tau = 8$ нс и качеством лазерного луча $M^2 < 1,3$. Диаметр лазерного пятна в фокусе составлял ~ 30 мкм.

Проведены исследования структурных и оптических характеристик полученных структур методами рамановской спектроскопии (РС), рентгенофазового анализа (РФА), а также атомно-силовой (АСМ) и сканирующей электронной (СЭМ) микроскопий.

Структурные и оптические исследования показали, что структура микро- и наночастиц зависит от толщины исходных пленок и условий переноса. Однородность и равномерность отпечатков могут снижаться с увеличением толщины пленки выше 120 нм. Данные РФА и РС показали, что лазерное облучение приводит к образованию различных модификаций CdTe, включая кубическую и гексагональную, а также к сохранению преципитатов Te и слоев TeO₂ с увеличением содержания Te. Это указывает на частичное разложение CdTe и его рекристаллизацию в результате лазерного облучения. РС подтверждает сохранение кристалличности CdTe и характерных фононных мод после переноса. Наблюдаемый незначительный сдвиг пиков указывает на влияние размерности и внутренних микронапряжений. По результатам АСМ наиболее выраженный отпечаток перенесенных частиц наблюдается при облучении пленки толщиной 120 нм, характеризующейся наибольшей однородностью и наименьшей шероховатостью. Исследование подтверждает наличие оптических свойств и выраженной фотолюминесценции в напечатанных структурах CdTe.

Работа демонстрирует возможность использования 3D-структур, полученных с помощью LIFT, в различных областях науки и техники, включая оптоэлектронику и фотонику.

Работа по синтезу и характеристизации тонких пленок проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» и при поддержке гранта РФФ №25-79-10125 в рамках переноса микрочастиц и характеристизации оптических свойств.

1. Zhigarkov V.S. et al. Laser Transfer of Upconversion Nanoparticles // JETP Lett. 2024. V. 120. P. 151–156.
2. Shakhthivel D. et al. Inorganic semiconducting nanostructures-based printed photodetectors // Appl. Phys. Rev. 2025. V. 12. No. 1. P. 011325.
3. Koshelev I.O. et al. Textured CdTe Thin Films on Silicon and Sapphire Substrates: Thermal Vapor Deposition and Structural Characterization // Crystallogr. Reports. 2024. V 69. P. 235–238.

Фотолюминесцентная спектроскопия, как метод оценки фотокаталитических свойств и анализа процессов термообработки структур ZnO

В.В. Краснова, А.Э. Муслимов, В.М. Каневский

НИЦ «Курчатовский институт», Москва

УДК: 541.145; 535.372, 538.9

В представленной работе продемонстрирована возможность применения метода фотолюминесцентной (ФЛ) спектроскопии для предварительной оценки перспективности фотокатализаторов (ФК) на основе микро и наноструктур ZnO, а также в анализе процессов термообработки микроструктур ZnO.

ФЛ и ФК свойства структур ZnO определяются их генерационно-рекомбинационными характеристиками в процессе поглощения электромагнитного излучения, а также особенностями диффузионного переноса носителей заряда в них, связанных с дефектно-кристаллической структурой. Было исследовано три типа структур ZnO: микроструктуры размерами 5-10 мкм (тип 1), субмикронные с размерами 100-500 нм (тип 2) и 30-50 нм (тип 3). В спектрах ФЛ структур ZnO наблюдаются три полосы: ультрафиолетовая (связанная с прямым межзонным переходом), фиолетовая (связанная в V_{Zn}) и зеленая (связанная с V_O). Образец 3 демонстрировал наиболее слабую ФЛ, свидетельствующую о низком кристаллическом качестве. Исследование ФК свойств образцов проводили в процессе деградации метиленового синего (МС) с исходной концентрацией $C_0 = 1,0$ мг/л при облучении солнечным светом (осветитель ОЛКс-150М с ксеноновой лампой ДКсШ-150, 50 мВт/см²). Сравнение ФК свойств показало, что наибольшей активностью обладает образец 2 (константа скорости $k = 0.729$ мин⁻¹), в спектре ФЛ которого присутствуют все три полосы. Наименьшей активностью обладает образец 3 ($k = 0.146$ мин⁻¹), со слабой ФЛ. Образец 1 обладал средней активностью ($k = 0.256$ мин⁻¹).

На следующем этапе работы было предложено использование ФЛ спектроскопии в анализе процессов термообработки микроструктур ZnO (тип 1). Поскольку, основным типом дефектов в ZnO являются вакансии кислорода, их концентрацию в приповерхностных слоях возможно оценить путем сравнительного измерения ФЛ на воздухе и во влажной среде. В этой модели за основу берется предполагаемое связывание молекул воды с поверхностью микроструктур ZnO посредством ион-дипольного взаимодействия. Применением фотолюминесцентной спектроскопии для микроструктур ZnO была определена критическая температура термообработки на воздухе 400°C, при достижении которой начинается деструкция кристаллической решетки ZnO в направлении от поверхности в глубь образца. Полученные результаты хорошо согласуются с данными полученными ранее другими исследователями [1, 2], и в представленной работе подтверждены сравнением спектральных особенностей фотолюминесценции микроструктур ZnO измеренных на воздухе и в воде.

Продемонстрирована взаимосвязь фотолюминесцентных и фотокаталитических свойств структур ZnO различных размеров и морфологии, и их обусловленность структурным совершенством. Показано, что ФЛ спектроскопия может быть использована для предварительной оценки перспективности структур ZnO, как фотокатализаторов. Впервые предложено использование сравнительной фотолюминесцентной спектроскопии на воздухе и в воде в анализе процессов термообработки микроструктур ZnO.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

1. Zheng Y. et al. Luminescence and Photocatalytic Activity of ZnO Nanocrystals: Correlation between Structure and Property // Inorganic Chemistry. 2007. V. 46. No. 16. P. 6675-6682.

2. Пронин И.А., Донкова Б.В., Димитров Д.Ц. и др. Взаимосвязь фотокаталитических и фотолюминесцентных свойств оксида цинка, легированного медью и марганцем // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. Вып. 7. С. 868-874.

Параметрическое рентгеновское излучение в диапазоне «окна прозрачности воды»

С.А. Куделя, В.С. Малышевский, Г.В. Фомин

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

УДК: 539.1.03, 538.9

Рассматривается рентгеновское параметрическое излучение [1] в диапазоне «Окна прозрачности воды» релятивистских электронов с энергией 10 МэВ при пролете через несколько регулярно расположенных в вакууме и параллельных друг другу одинаковых титановых пластин.

Анализ результатов расчетов показывает, что наличие поглощения приводит к тому, что излучение от регулярной стопки тонких титановых пластин формируется главным образом в последних нескольких пластинах. Поэтому достичь усиления выхода излучения более чем в десять раз при увеличении количества пластин невозможно, что и показывают результаты расчетов, а именно начиная с $N = 5$ выход излучения практически не изменяется.

1. Гарибян Г.М., Ян Ши. Рентгеновское переходное излучение. Ереван. Изд-во АН Арм. ССР. 1983. 320 с.

Влияние условий золь-гель синтеза на кристаллическую структуру и свойства прозрачных электропроводящих пленок SnO₂

*А.И. Кушакова^{1,2}, А.С. Коваленко^{1,2}, А.М. Николаев¹, Н.Н. Губанова^{1,3}, В.А. Матвеев³,
А.Г. Иванова¹, О.А. Загребельный¹, С.В. Мякин², О.А. Шилова^{1,2}*

¹Филиал НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИХС, Санкт-Петербург

²СПбГТИ (ТУ), Санкт-Петербург

³НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина

УДК: 539.232, 538.9

Тонкие прозрачные электропроводящие плёнки диоксида олова SnO₂ – одни из наиболее востребованных оксидных пленок в опто- и микроэлектронике. В последнее время особый интерес исследователей вызывают пленки с кристаллической поверхностью. Такие пленки можно получать из золь на основе хлоридов олова с добавками инициаторов кристаллизации, например, NH₄F. Однако при этом возникает проблема соблюдения баланса между целевыми характеристиками – прозрачностью и электропроводимостью. Целью данного исследования являлось установление оптимальных условий золь-гель синтеза тонких проводящих плёнок SnO₂ с закристаллизованной поверхностью, чтобы обеспечить высокую прозрачность и низкое электросопротивление пленок. Пленки формировали на стеклянных подложках из золь на основе SnCl₂·2H₂O, NH₄F и простых спиртов (этанола или изопропанола) методом спин-коатинга с последующей термообработкой при 450 °С. В процессе получения варьировали количество NH₄F (5 и 10 ат. % F) и число наносимых слоев (15, 20, 25 и 30). Исследовали морфологию поверхности, фазовый состав, прозрачность и удельное поверхностное сопротивление полученных плёнок.

По данным рентгенофазового анализа в плёнках присутствуют тетрагональный SnO₂ и металлическое олово β-Sn. Проводимость пленок обусловлена кислородными вакансиями и присутствием металлической фазы олова. Плёнки на изопропаноле отличались более однородной структурой и лучшей окристаллизованностью при толщинах свыше 20 слоёв, что обеспечивает повышенную воспроизводимость свойств и надёжный межзерновой транспорт носителей заряда по сравнению пленками, полученными с использованием этанола, для которых наблюдалось сосуществование крупных и мелких изолированных кристаллитов, приводящее к неоднородности поверхности. При этом плёнки на этаноле демонстрируют лучшие абсолютные оптические и электрические характеристики среди изученных условий: удалось достичь максимальных значений прозрачности пленок 81 % (5 ат.% F, 20 слоёв) (Рис. 1а) и минимального сопротивления 2,1·10⁸ Ω/□ (Рис. 1б).

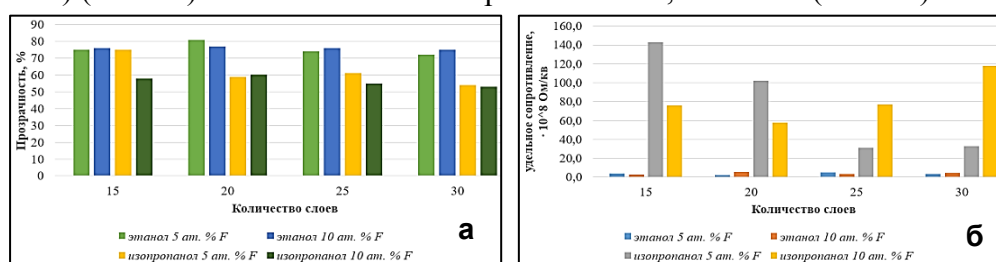


Рисунок 1. Прозрачность в видимом спектре (а) и удельное поверхностное электрическое сопротивление (б) тонких пленок SnO₂.

Полученные результаты показывают, что этанол обеспечивает наилучшее сочетание высокой прозрачности и низкого удельного поверхностного сопротивления. Однако для улучшения состояния поверхности (уменьшения неоднородности и изолированных крупных кристаллитов) целесообразно дальнейшее более тщательное изучение влияния органических растворителей – расширение их ассортимента и апробация смесей.

Композиционные материалы на основе пористых стекол и веществ со свойствами сегнетоэлектриков

М.К. Лаєрова^{1,2}, М.Ю. Конон¹

¹Филиал НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИХС, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург

УДК: 666.189.241, 537.226, 538.9

Потребность в миниатюризации электронных устройств порождает интерес к использованию сегнетоэлектриков в низкоразмерном состоянии, которые можно сформировать в пористых телах, например, в пористых стеклах (ПС) [1-4]. Этот материал, состоящий в основном из аморфного SiO₂, получают с использованием явления фазового разделения в щелочноборосиликатных стеклах. При определенных условиях (состав, температура и длительность термообработки) такие стекла разделяются на две взаимопроникающие фазы. Проработка одной из них (химически нестойкой) неорганическими кислотами ведет к образованию пор – каналов нанометрового масштаба в массиве кремнеземного каркаса. Матрицы из ПС привлекают внимание в исследованиях по созданию композиционных материалов (КМ) благодаря регулируемым размерам пор, химической, термической устойчивости и диэлектрическим свойствам. Цель настоящей работы – создание композиционных материалов на основе пористых стекол с внедренными в поровое пространство сегнетоэлектрическими соединениями.

Матрицы для КМ были получены из двухфазных стекол состава 4Na₂O·2K₂O·34V₂O₃·60SiO₂. Пластины размерами 10×10×1 мм были проработаны 3М водным раствором HCl при 50°C в условиях термостатирования для удаления химически нестойкой щелочноборатной фазы и получения материала со сквозными порами диаметром 17 нм и площадью удельной поверхности 95 м²/г. Дальнейшими этапами работы являются введение в ПС сегнетоэлектриков путем пропитки в насыщенных водно-солевых растворах и золь-гель методом, а также последующая идентификация элементов и фаз в КМ.

Работа выполнена в рамках государственного задания Филиала НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС на 2025-2027 гг. (номер государственной регистрации №1024030700034-2-1.4.3).

1. Лапшин А. Е. и др. Структура сегнетоэлектрической фазы KNO₃, сформированной в матрице нанопористого стекла // Физика и химия стекла. 2012. Т. 38. №6. С. 817-819.
2. Rysiakiewicz-Pasek E. et al. Properties of porous glasses with embedded ferroelectric materials // Journal of Non-Crystalline Solids. 2006. V. 352. No. 40-41. P. 4309-4314.
3. Rysiakiewicz-Pasek E., et al. Synthesis, structure and properties of mixed KNO₃-NaNO₃ embedded into nanoporous silica glass // Composites Part B. 2016. Vol. 91. P. 291-295.
4. Lopez J. A. R. et al. Formation of Fresnoite Nanostructures in SiO₂ Porous Glasses // AIP Conference Proceedings. 2020. V. 2308. URL: https://pubs.aip.org/aip/acp/article-pdf/doi/10.1063/5.0033304/14009691/050002_1_online.pdf (дата обращения 04.02.2026).

Структурные методы исследования комплекса 1-герматранола с $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Д.В. Лёзов¹, А.А. Золотарев², А.В. Пискунов³, Т.А. Кочина¹

¹Филиал НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИХС, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле,
Санкт-Петербург

³Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева Российской академии наук, Нижний Новгород

УДК: 546.25, 546.302, 54.057, 544.18, 538.9

Для химической науки особый интерес представляют соединения с уникальными строением и свойствами. Одними из таких веществ являются органические соединения германия с расширенной координационной сферой – герматраны [1]. В связи с проявлением герматранами специфической биологической активности, они находят все больше применения в области медицины. Стоит отметить, что биологическая активность герматранов объясняется наличием прочной трансаннулярной связи ($\text{N} \rightarrow \text{Ge}$), а ее специфика напрямую зависит от природы заместителя при атоме германия.

1-Герматранол является наиболее изученным представителем герматранов. В данном соединении реализуются два фактора: 1) формируется дополнительная координационная связь N-Ge , делая атом германия гиперкоординированным, что в дальнейшем проявляется специфичностью биологической активности; 2) за счет наличия атомов кислорода и азота, соединение может являться бидентантным лигандом в реакциях комплексообразования. Многолетние исследования показали, что 1-герматранол проявляет значительную биологическую активность широкого спектра действия: стимулирует иммунную систему, оказывает гемоглобинпротекторное и антиоксидантное действие, активирует триптофанил-тРНК-синтазу, интенсифицирует рост растений [2]. Было интересно проследить какое влияние на свойства 1-герматранола, в структуре которого присутствует d-элемент, окажет наличие в молекуле переходных биометаллов.

Цель настоящей работы заключалась в получении нового потенциально биологически активного комплекса 1-герматранола с $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, его идентификация и исследование новых форм фармакологического действия. Для реализации синтеза использовался постадийный подход: 1) синтез 1-герматранола, путем взаимодействия GeO_2 с триэтаноламином в водной среде при температуре 90°C ; 2) формирование комплексного соединения германия с биометаллом, путем взаимодействия 1-герматранола с $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ в водной или спиртовой среде ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) при температуре 90°C .

В результате синтезировано ранее неизвестное координационное соединение 1-герматранола с $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Структура охарактеризована современными физико-химическими методами анализа: ЯМР и ИК-спектроскопия, РСА.

Координация с катионом кобальта(II) приводит к некоторому перераспределению зарядов в молекуле германий-содержащего лиганда, что приводит к существенному упрочнению внутримолекулярных связей N-Ge (с 17.0 ккал/моль в свободной молекуле 1-герматранола до 27.6 ккал/моль в комплексе).

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ гос. рег. 1023032900385-8-1.4.3) филиала НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ-ИХС. Структурные исследования выполнены с использованием оборудования ресурсных центров СПбГТИ (ТУ) и СПбГУ. Теоретические исследования проводились в рамках государственного задания ИМХ РАН.

1. Воронков М. Г., Самохин Г. С., Вражнов Д. В., Кочина Т. А. Новые внутрикомплексные соединения пентакоординированного германия. гипогерматраны – Ge-замещенные ($\text{N} \rightarrow \text{Ge}$) 2-окса-5-аза-1-гермациклопентаны // Журнал общей химии. 2012. Т. 82. Вып. 1. С. 162-163.
2. Барышок В.П., Абзаева К.А., Расулов М.М., Подгорбунская Т.А. 1-Герматранол-гидрат - активатор триптофанил-тРНК-синтазы // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т. 8, N. 1. С. 153–158.

Безводный золь-гель синтез и диспергирование CeO_2 для получения гибридных катионпроводящих мембран на основе модифицированного поливинилового спирта
**О.С. Лёзова¹, А.А. Соколова², А.Е. Соколов¹, Г.П. Копица¹, В.Л. Уголков¹, О.А. Загрельный¹,
 О.А. Шилова^{1,2}, А.Г.Иванова¹**

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИХС, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт
 (технический университет), Санкт-Петербург

УДК: 544.77, 544.6.018.462.4, 538.9

Гибридные катионпроводящие мембраны, модифицированные диоксидом церия (CeO_2), перспективны для применения в твердополимерных топливных элементах (ТПТЭ), благодаря их высокой термической и окислительной устойчивости [1]. Введение наночастиц CeO_2 в полимерную матрицу обеспечивает защиту материала от деградации: частицы нейтрализуют, образующиеся при работе ТПТЭ, перекисные радикалы через обратимую реакцию $\text{Ce}^{4+} \rightleftharpoons \text{Ce}^{3+}$. В настоящее время практически отсутствуют публикации, посвящённые разработке гибридных катионпроводящих мембран на основе сшитого и сульфатированного поливинилового спирта (ПВС), содержащих CeO_2 .

Ранее нами жидкофазным методом синтеза в диметилсульфоксиде (ДМСО) были получены катионпроводящие мембраны на основе сшитого фурфуролом (ФУР) ПВС, допированного – аминсульфоновой кислотой (АСК) и тетраэтоксисиланом (ТЭОС) [2]. Соотношение функциональных компонентов варьировалось. Полученные мембраны обладали высокими значениями удельной ионной проводимости в температурном диапазоне 80-110°C и приемлемыми значениями степени набухания. Однако эти мембраны, на основе нефторированного полимера, имели низкую окислительную устойчивость в реагенте Фентона (раствор H_2O_2 и железного катализатора).

В связи с этим, целью настоящей работы являлось разработка новых термо- и окислительно стойких, с низкой степенью набухания в воде гибридных катионпроводящих мембран на основе сшитого ПВС, содержащих предварительно полученные и специальным образом диспергированные наночастицы CeO_2 .

Безводный золь-гель синтез CeO_2 проводили согласно методике [3] в бензиловом спирте. Диспергировали их в ДМСО с помощью ультразвукового и механического гомогенизаторов. Были определены условия получения монодисперсного (индекс полидисперсности равен 0.08) коллоидного раствора CeO_2 с размером частиц 84 нм. Была разработана методика синтеза гибридных мембран с коллоидным CeO_2 . Физико-химические показатели гибридных мембран состава ПВС1г/АСК0,3г/ФУР0,9мл/ТЭОС0,1мл (мембрана 1) и ПВС1г/АСК0,3г/ФУР0,9мл/ТЭОС0,1мл/ CeO_2 0,00116г (мембрана 2), а также эталонной коммерческой мембраны Нафион представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-химические показатели катионпроводящих мембран

Маркировка мембран	Максимум ионной проводимости увлажненных, См/см, при T, °C	Степень набухания, %, после выдержки в воде в течение 5 суток	Окислительная стойкость, %*	Полная ионнообменная ёмкость, эВ
1	$8,4 \cdot 10^{-2}$ (105)	70	51	0.05
2	$3,1 \cdot 10^{-2}$ (120)	66	75	0.076
Нафион	$1,4 \cdot 10^{-2}$ (40)	18	95	0.081

* - остаточная масса после выдержки в окислительной среде (реагенте Фентона) в течение 24 часов

Выявлено, что модификация ПВС-мембран CeO_2 существенно улучшает их эксплуатационные характеристики: окислительная стойкость увеличивается в 1.5 раза, уменьшается степень набухания в воде, температурный диапазон ионной проводимости

становится шире (20-140°C против 20-120°C), но при этом незначительно снижается значение максимума ионной проводимости.

Преимущество разработанных нами мембран перед коммерческой мембраной заключается в сохранении высоких значениях ионной проводимости при температурах 100-120°C.

Работа выполнена в рамках ГЗ ИХС (НИР № 1024030700041-2-1.4.3).

1. Golubenko D.V., et al. Improving the conductivity and permselectivity of ion-exchange membranes by introduction of inorganic oxide nanoparticles: Impact of acid–base properties // J. Colloid Polym. Sci. 2019. V. 297. P. 741–748.
2. Лёзова О.С., и др. Разработка ионопроводящих гибридных мембран на основе сшитого поливинилового спирта с использованием латинского квадрата // Журнал физика и химия стекла. 2021. Т. 47. №1. С.78–86.
3. Xiao H., et al. Nonaqueous Sol–Gel Synthesized Hierarchical CeO₂ Nanocrystal Microspheres as Novel Adsorbents for Wastewater Treatment // J. Phys. Chem. C. 2009. V. 113 (38). P. 16625–16630.

Фазообразование, кристаллическая структура и электрофизические свойства твёрдых растворов системы $(1-x)\text{Na}_{0,54}\text{K}_{0,46}\text{NbO}_3-x\text{Bi}_{0,5}\text{Li}_{0,5}\text{TiO}_3$

Д.В. Лымарь, Е.В. Глазунова, А.А. Зубрилин

НИИ физики Южного федерального университета, Ростов-на-Дону

УДК: 537.9, 538.9

Потребности современного приборостроения, энергетики и микроэлектроники формируют всё более возрастающие требования к используемым функциональным материалам [1]. Ключевым направлением здесь становится создание инновационных диэлектриков, сегнето- и пьезоэлектриков, обладающих улучшенными рабочими параметрами. Значимость этой задачи определяется двумя основными факторами: потребностью микроэлектронной отрасли в уменьшении габаритов компонентов при расширении их возможностей, а также потребностью в экологических материалах, адаптированных для крупносерийного выпуска. Сфера применения таких материалов охватывает энергоэффективные системы, сенсорные устройства, накопители энергии и другие направления.

Особый интерес представляют бессвинцовые сегнето- и пьезоэлектрики, способные заменить традиционный цирконат-титанат свинца (PZT). В этом контексте одними из наиболее перспективных кандидатов являются твёрдые растворы (ТР) на основе ниобата калия-натрия (KNN) [1,2], чьи параметры могут быть значительно улучшены введением и варьированием концентрации различных добавок.

Данная работа посвящена установлению корреляций «состав– структура – свойства» для ряда ТР системы $(1-x)\text{Na}_{0,54}\text{K}_{0,46}\text{NbO}_3-x\text{Bi}_{0,5}\text{Li}_{0,5}\text{TiO}_3$ (где $0,0 \leq x \leq 1,0$; шаг $\Delta x = 0,1$). Разработка материалов ориентирована на получение функциональной керамики с улучшенными пьезо- и сегнетоэлектрическими показателями для нужд современной пьезотехники и микроэлектронной промышленности.

Образцы были изготовлены с помощью двухступенчатого твердофазного метода с дальнейшим спеканием по классической керамической технологии. Термическая обработка включала три стадии: первичный отжиг при $850-900^\circ\text{C}$ продолжительностью 4 часа, вторичный отжиг при $850-1000^\circ\text{C}$ продолжительностью 4 часов и спекание при $1120-1150^\circ\text{C}$ на протяжении 2 часов (температурные режимы варьировались в зависимости от концентрации легирующего компонента).

Исследование структуры и фазовой композиции выполнено методом рентгеновской дифракции на приборе ДРОН-3 (геометрия Брэгга-Брентано, излучение $\text{CoK}\alpha$). Диэлектрические параметры измерялись в интервале температур от 25 до 600°C и частот от 1 кГц до 1 МГц с использованием LCR-метра Agilent E4980A.

В ходе исследования определено влияние легирующей добавки на фазовые переходы, структуру и диэлектрический отклик материалов. Установленные закономерности имеют практическую значимость для инженерии новых функциональных сред с управляемыми электрофизическими свойствами, востребованных в микроэлектронике.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2026-0022). Использовано оборудование Центра коллективного пользования НИИ физики Южного федерального университета «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел».

1. Zhihao Dong et al. Potassium sodium niobate-based piezoelectric ceramics conventionally sintered in the reducing atmosphere // *Ceramics International*, 2025, V. 51, No. 23, P. 37985-37999.
2. Gao X., Cheng Z., Chen Z. et al. The mechanism for the enhanced piezoelectricity in multi-elements doped (K,Na)NbO₃ ceramics // *Nat Commun*, 2021, V. 12, No. 881.

Влияние импульсного магнитного поля на процесс искусственного старения алюминиевого сплава АК9

С.Г. Магамедова, Ю.В. Осинская

Самарский национальный исследовательский университет им.акад. С.П. Королева, Самара
УДК: 621.785.78:537.636, 538.9

В качестве объекта экспериментального исследования был выбран алюминиевый сплав АК9 после предварительной термической обработки, включающей закалку путем выдержки при температуре 535 °С в течение 2 ч с последующим резким охлаждением в воду температурой 20 °С и далее искусственно состаренный в импульсном магнитном поле (ИМП) амплитудой напряженности 557,2 кА/м и частотой импульсов 2 Гц при температуре 175 °С длительностью от 2 до 8 ч.

Металлографические исследования выявили, что искусственное старение вызывает заметные изменения микроструктуры алюминиевого сплава АК9. Темные структурные составляющие на поверхности шлифа, идентифицированные как кремний с элементами эвтектики, проявляют тенденцию к формированию вытянутых иглообразных включений. При этом наблюдается значительное уменьшение их площади, которая варьируется от 16 до 38 % от общей площади, что указывает на существенные изменения по сравнению с закаленным состоянием. Применение ИМП в процессе искусственного старения не оказывает влияния на форму наблюдаемых включений. Однако, их площадь возрастает и составляет от 37 % до 49 % поверхности металлографического шлифа. Следовательно, воздействие ИМП в ходе старения способствует увеличению площади, занимаемой кремнием с элементами эвтектики, в 1,1–2,5 раза.

Определение микротвердости по методу Виккерса осуществлялось с применением микротвердомера HAUSER при фиксированной нагрузке в 100 г. Значение микротвердости рассчитывалось как среднее арифметическое по результатам 30 независимых измерений, при этом относительная погрешность среднего значения не превышала 1–4 %. Установлено, что старение приводит к закономерному увеличению микротвердости исследуемого сплава. Данный эффект обусловлен выделением дисперсных фаз, в частности, интерметаллида Mg_2Si , в процессе старения [1]. Выделяющиеся частицы выступают в роли барьеров для движения дислокаций, тем самым повышая сопротивление деформации и, следовательно, прочностные характеристики сплава. Экспериментально установлено, что максимальное значение микротвердости, достигающее 118 $кГ/мм^2$, соответствует продолжительности старения в течение 4 ч. Воздействие ИМП на стареющий сплав вызывает снижение микротвердости до 31 %, сопровождающееся повышением пластических свойств, что соответствует проявлению положительного магнитоэластического эффекта [2]. Кроме этого, обнаружено, что при наложении ИМП значения микротвердости практически не изменяются с длительностью старения.

В совокупности с данными металлографического анализа, снижение микротвердости под влиянием ИМП объясняется следующим образом: в процессе старения происходит частичное перемещение атомов кремния из α -твердого раствора на основе алюминия в фазу кремния с элементами эвтектики. Этот процесс значительно интенсифицируется при наложении ИМП, что подтверждается увеличением площади структурных составляющих кремния с элементами эвтектики, наблюдаемых на поверхности шлифа. Обедненные кремнием светлые участки шлифа становятся более мягче, что, в свою очередь, приводит к общему снижению микротвердости сплава.

1. Беляев А.И., Бочвар О.С., Буйнов Н.Н. и др. Металловедение алюминия и его сплавов. М.: Металлургия. 1983. 280 с.
2. Серебрякова А.А., Шляров В.В., Загуляев Д. В. Поведение металлов и сплавов под влиянием магнитного поля // Вестник СибГИУ. 2024. № 1(47). С. 9–18.

Динамическая устойчивость процесса двухступенчатой нуклеации и роста кристаллов

Е.В. Маковеева

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

УДК:538.911

Классическая теория нуклеации описывает кристаллизацию как одноступенчатый процесс, а именно, кристаллы зарождаются и растут непосредственно из пересыщенного раствора. Однако многочисленные экспериментальные данные последних десятилетий показали, что для ряда органических и биологических веществ (β -лактоглобулин, лизоцим, инсулин, глицин, цитрат кальция и др.) этот процесс протекает в два этапа. Сначала в растворе формируются метастабильные кластеры-предшественники (промежуточная аморфная или жидкоподобная фаза), и лишь затем внутри этих кластеров зарождаются и растут кристаллы конечной (стабильной) фазы. Такой двухступенчатый механизм меняет кинетику нуклеации и роста и, как следствие, может существенно влиять на устойчивость промышленных кристаллизаторов непрерывного действия.

Вопрос устойчивости важен на практике. Если стационарный режим теряет устойчивость, в кристаллизаторе возникают автоколебания пересыщения и распределения кристаллов по размерам, что ухудшает качество продукта. Ранее теория динамической неустойчивости развивалась только для одноступенчатого (классического) механизма. Данное исследование впервые обобщает эту теорию на случай двухступенчатой нуклеации.

Математическая модель процесса состоит из уравнения баланса масс (интегро-дифференциальное уравнение для пересыщения, учитывающее подвод свежего раствора в кристаллизатор, расход вещества на рост кристаллов и поступление примесей, подавляющих рост), уравнения популяционного баланса (гиперболическое уравнение для функции распределения кристаллов по размерам, описывающее конвективный перенос частиц в пространстве размеров со скоростью роста и отвод кристаллов из кристаллизатора), а также кинетических соотношений.

Основные результаты заключаются в следующем. Кривая нейтральной устойчивости разделяет плоскость параметров на области устойчивой работы кристаллизатора и области, где стационарный режим теряет устойчивость и возникают автоколебания. Подача примесей дестабилизирует процесс, отвод кристаллов стабилизирует процесс: увеличение скорости отвода сужает область неустойчивости. Примеси не только провоцируют колебания, но и ускоряют их. Численные расчёты выполнены для параметров кристаллизации инсулина (кинетические данные из независимых экспериментов). Результаты качественно согласуются с классической теорией для одноступенчатого механизма, но количественные границы устойчивости отличаются из-за иных значений кинетических показателей.

В результате полученные аналитические критерии позволяют прогнозировать условия, при которых стационарный режим промышленного кристаллизатора теряет устойчивость, и оптимизировать параметры процесса (скорость подвода сырья, время пребывания, режим подачи примесей) для обеспечения стабильной работы.

Анализ динамической устойчивости может быть расширен до более сложной проблемы одновременной объемной и направленной кристаллизации, когда пересыщенный/переохлажденный слой перемещается в определенном пространственном направлении в результате приложенного градиента концентрации и/или температуры [1, 2].

Данная работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (№ 24-1-4-43-1).

1. Worster M.G. Solidification of an alloy from a cooled boundary // Journal of Fluid Mechanics. 1986. V. 167. P. 481–501.
2. Nizovtseva I.G., Alexandrov D.V. The effect of density changes on crystallization with a mushy layer // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2020. V. 378. P. 20190248.

Модернизация эллипсометра ЛЭФ-3М для автоматического картирования образцов

А.В. Матевощук, В.Б. Пикулев

ФГБОУ ВО Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск

УДК:681.2, 681.5, 538.9

Эллипсометрия — оптический метод исследования поверхностей и тонких плёнок, основанный на анализе изменения поляризации света при отражении от исследуемого образца. Нами ведётся разработка автоматизированной системы управления для лазерного нуль-эллипсометра ЛЭФ-3М с использованием современных микроэлектронных компонентов и собственного программного обеспечения. Разрабатываемая система управления в автоматическом режиме позволяет проводить измерения эллипсометрических углов, решает обратную задачу эллипсометрии [1] для расчёта оптических характеристик и толщины наноразмерного покрытия исследуемых образцов, а также создаёт двумерные карты распределения рассчитанных величин.

Техническая реализация разработки внесла минимальные изменения в оптико-механическую схему эллипсометра, сохранив характеристики прибора, заявленные изготовителем. Для увеличения разрешающей способности системы регистрации сигнала на выходе ФЭУ поставлен преобразователь «напряжение-частота», реализованный на микросхеме AD654JN. В эллипсометр были интегрированы шаговые двигатели EM-336 с драйверами ULN2003A для вращения поляризатора и анализатора. Двухкоординатный сканирующий столик Agilis AG-LS25 заменил штатный столик для образцов.

Основой системы автоматизации стал микроконтроллер семейства i.MX RT1060, обеспечивающий достаточную производительность для поиска минимума интенсивности анализируемого сигнала. На лицевую панель блока управления вынесены кнопки управления и два информационных цветных экрана TFT 1.8". Управление экспериментом осуществляется с помощью внешнего компьютера, подключенного к блоку управления по USB-интерфейсу. Второй USB-порт компьютера задействован для управления сканирующим столиком. Программное обеспечение написано на языках Python и Arduino C. Графический пользовательский интерфейс реализован с использованием библиотеки PyQt 6.

Таким образом, нам удалось автоматизировать измерительный процесс и существенно улучшить функциональные возможности эллипсометра ЛЭФ-3М, который можно использовать как в учебном процессе, так и в научных исследованиях.

1. Р. Аззам, Н. Башара. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. 584 с.

Изучение рекомбинантного белка CD40L-Adiponectin с помощью малоуглового рентгеновского рассеяния

А.А. Михайлов^{1,2}, М.Г. Бязрова^{1,3}, М.М. Сухова^{1,2}, П.П. Гусева^{1,2}, М.В. Петухов⁴, Э.В. Штыкова⁴,
А.В. Филатов^{1,2}

¹ФГБУ «ГНЦ Институт иммунологии» ФМБА России, Москва

²МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

³Российский Университет Дружбы Народов, Москва

⁴Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва

УДК: 57.088.52, 571.27, 538.9

Для моделирования процесса активации В-лимфоцитов *in vitro* используют рекомбинантные белки с рецепторным доменом CD40L. Для запуска сигналинга через рецептор CD40 такие белки должны находиться в олигомеризованном состоянии [1]. Нами была разработана конструкция химерного белка CD40L-Adiponectin, в которой N-конец рецепторного домена CD40L был слит с С-концом коллагенподобного домена адипонектина. Адипонектин склонен к образованию олигомерных форм. Согласно структурным данным, олигомеры адипонектина имеют топологию букета [2].

Структурные особенности белка CD40L-Adiponectin были изучены с помощью малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) с предварительной гель-фильтрацией для обеспечения монодисперсности образца. При гель-фильтрации CD40L-Adiponectin элюируется с колонки в виде двух пиков с объемами удержания 13,4 мл и 15,8 мл. Для анализа использовали фракцию, соответствующую пику с объемом удержания 15,8 мл.

Обработку данных проводили с помощью программного пакета ATSAS [3]. Полученный профиль МУРР характерен для монодисперсных образцов. По графику Гинье была подтверждена монодисперсность образца и определен радиус инерции (R_g), равный $3,51 \pm 0,005$ нм. График Кратки представляет из себя колоколообразную кривую с дополнительным пиком с максимумом при значении вектора рассеяния (s), равном $0,23 \text{ \AA}^{-1}$, что указывает на свернутое состояние белка и отсутствие внутренней разупорядоченности. Путем анализа функции парных расстояний $P(r)$ был определен максимальный размер молекулы (D_{max}), равный 10,7 нм, и радиус инерции (R_g), равный $3,54 \pm 0,01$ нм. С помощью анализа графика Порода был определен породовский объем молекулы (V_p), который составил $190 \pm 20 \text{ нм}^3$.

По данным МУРР была восстановлена структура белка методом моделирования жесткими телами с помощью программы SASREF [4]. Белок представляет из себя гексамер, состоящий из двух идентичных тримеров, взаимодействующих N-концами. Угол между тримерами составляет $8,7^\circ$. Тример имеет глобулярную часть, состоящую из тримера рецепторных доменов CD40L, за которой следует коллагеноподобная часть, являющаяся гомотримерной спиралью. Отклонение χ^2 между модельной и экспериментальной кривыми составило 1,38, что говорит о достоверности модели. Полученная структура необходима для понимания механизма кластеризации рецепторов CD40 при активации В-лимфоцитов.

1. Haswell L et al. Analysis of the oligomeric requirement for signaling by CD40 using soluble multimeric forms of its ligand, CD154 // Eur J Immunol. 2001. V. 31. No. 10. P. 3094-3100.
2. Radjainia M. et al. Structural polymorphism of oligomeric adiponectin visualized by electron microscopy // J Mol Biol. 2008. V. 381. No. 3. P. 419-430.
3. Manalastas-Cantos K. et al. ATSAS 3.0: expanded functionality and new tools for small-angle scattering data analysis // J Appl Cryst. 2021.V. 54. P. 343-355.
4. Petoukhov M., Svergun D. Global rigid body modelling of macromolecular complexes against small-angle scattering data// Biophys. J. 2005. V. 89. P. 1237-1250.

Анализ спектра возбуждений в магнитных скирмионных структурах

А.А. Михеева^{1,2}, Д.Н. Аристов^{1,2}

¹НИИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

²Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург

УДК: 538.9, 538.91, 538.955

Магнитные скирмионы - это крошечные топологические объекты масштаба десятков нанометров, привлекающие огромное внимание исследователей в последнее десятилетие. Интерес к этой теме связан как с возможностью практической реализации этих объектов в будущих устройствах памяти [1], так и с их фундаментальными свойствами.

Спектры элементарных возбуждений (магнонов) в скирмионных кристаллах (СкК) находятся путем диагонализации гамильтониана типа Боголюбова - де Жена в присутствии калибровочного поля. Напряженность этого поля в среднем равна нулю [2]. Она характеризуется двумя вкладками - гладкой компонентой с двумя квантами потока, пронизывающими элементарную ячейку, и сингулярной, пропорциональной дельта-функции в координатном пространстве. Имея нулевое среднее поле на элементарную ячейку, можно определить магнонные спектры в обычном базисе плоских волн. Однако, при таком описании спектра учёт дельта-функциональной сингулярности требует значительных вычислительных мощностей, либо регуляризации задачи. Получаемая зонная структура уже обсуждалась в работах некоторых авторов [3,4], но понимание ряда особенностей спектров до сих пор отсутствует.

Мы предлагаем альтернативный метод расчета зонной структуры магнонов в СкК на основе базиса вырожденных уровней Ландау (УЛ). На первом этапе мы построили унитарное преобразование волновой функции для удаления сингулярности из калибровочного поля. Это привело к появлению аналога постоянного магнитного поля с двумя квантами потока на элементарную ячейку. На втором этапе мы получили формулы для матричных элементов возникающих операторов в базисе УЛ. На основе построенного унитарного преобразования и отработанного метода расчёта матричных элементов операторов в новом базисе ожидается явное численное построение матрицы гамильтониана. Предварительные оценки показывают, что для каждого волнового вектора в первой зоне Бриллюэна зонная структура дается полосчатой матрицей, т.е. обеспечивается хорошая численная сходимость спектра.

1. Vakili H., Xu J.-W., Zhou, Sakib M.N., Morshed M.G., Hartnett T., Quessab Y. Skymionics – Computing and memory technologies based on topological excitations in magnets // J. Appl. Phys. 2021. V. 130. P. 070908.
2. Timofeev V.E., Aristov D.N. Magnon band structure of skyrmion crystals and stereographic projection approach // Phys. Rev. B 2022. V. 105. P. 024422.
3. Schütte C., Garst M. Magnon-skyrmion scattering in chiral magnets // Phys. Rev. B 2014. V. 90. P. 094423.
4. Garst M., Back C., Cros V., Ebert H., Everschor-Sitte K., Fert A., Garst M., Tianping Ma., Mankovsky S., Monchesky T.L., Mostovoy M. The 2020 skyrmionics roadmap // J. Phys. D: Appl. Phys. 2020. V. 53. P. 363001.

Исследование организации хроматина в ядре опухолевой клетки по данным малоуглового рассеяния нейтронов

В.А. Морошкин^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

УДК: 577.3, 538.9

Малоугловое рассеяние нейтронов (SANS) является универсальным инструментом для изучения структурных неоднородностей вещества на масштабах от единиц до сотен нанометров. Сочетание его с методом сверхмалоуглового рассеяния нейтронов (VSANS) позволяет увеличить этот диапазон до 1000 нм. Одним из ключевых преимуществ метода служит возможность контрастного варьирования: замена H₂O на D₂O в буферном растворе меняет рассеивающую длину растворителя и позволяет избирательно выделять вклад отдельных компонент образца в суммарный сигнал рассеяния без химической модификации образца.

Объектом исследования служили ядра клеток лимфобластоидной линии NC-37. Эксперименты по малоугловому и сверхмалоугловому рассеянию нейтронов (SANS и VSANS) проводились на установках реактора CSNS (Научный центр источника нейтронов на основе расщепления, Дунгуань, 523803, Китайская Народная Республика) [1]. Образцы измерялись в трёх концентрациях буферного раствора: 100% D₂O, а также при соотношениях D₂O:H₂O = 3:2 и 2:3, что позволило разделить вклад белковых и ДНК компонент хроматина. Данные SANS и VSANS были сшиты в единую кривую рассеяния I(q).

Полученные данные были аппроксимированы комбинацией функции Гинье и степенного закона $I(q) \sim q^{-\alpha}$. Аппроксимации кривых SANS+VSANS с контрастным варьированием позволяет описать упаковку хроматина в ядрах клеток линии NC-37 в широком диапазоне пространственных масштабов. Одним из ключевых полученных результатов является извлечённый показатель степени α который может служить основой для дальнейших исследований организации хроматина в клетках различного происхождения.

Автор выражает благодарность Яшиной Е.Г. за предоставленные экспериментальные данные SANS и VSANS.

1. Zuo T. et al. The multi-slit very small angle neutron scattering instrument at the China Spallation Neutron Source // Journal of Applied Crystallography. 2024. Т. 57. №. 2. С. 380-391.

Краткий курс квантовой теории магнетизма

А.С. Москвин^{1,2}

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург

²Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург

УДК: 537.9; 538.915

В докладе дан краткий обзор принципиальных вопросов микроскопической квантовой теории магнетизма [1]:

1. Симметрия. Группы. Представления групп. Теорема Вигнера. Теорема Вигнера-Эккарта. Группа вращений. Точечные группы симметрии кристаллов.

2. Свободный атом. s -, p -, d -электроны. Токовые и нетоковые состояния. Термы. Правило Хунда. SLJ -мультиплеты. Спин-орбитальное взаимодействие.

3. Атомы в кристалле. Кристаллическое поле: роль точечной симметрии кристалла и симметрии электронных состояний. Диаграммы Танабе-Сугано. Высоко- и низкоспиновые состояния (HS and LS). Замораживание орбитального момента. Теория поля лигандов.

4. Классификация магнетиков на основе d -ионов. Магнетики A -, E - и T -типа. Взаимодействие электрон-решетка. Эффект Яна-Теллера. Ян-теллеровские магнетики.

5. Эффективный гамильтониан магнетиков A -типа. Одноионная анизотропия: сравнение квантового и классического описания. Сверхобменное взаимодействие. Гамильтониан Гейзенберга: сравнение квантового и классического описания. Биквадратичный обмен. Симметричная двухионная анизотропия. Антисимметричный обмен Дзялошинского-Мория. Взаимодействие спин-чужая орбита.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FEUZ-2026-0014).

1. Москвин А.С. Атомы в кристаллах: учеб. пособие / А. С. Москвин; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. –399 с. ISBN 978-5-7996-2377-7.

Карбидизация TiO₂ методом быстрого Джоулева нагрева

Г.Ю. Мотин, О.В. Олещук

Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск

УДК: 538.9, 629.4.084.14

Карбид титана (TiC) является востребованной армирующей фазой, как в керамических материалах [1], так и в композитах [2]. Благодаря своей высокой твёрдости (~28–32 ГПа), температуре плавления (~3140 °С), низкой плотности (4,93 г/см³), коррозионной стойкостью и отличной теплопроводностью. Образуется карбид титана по следующей высокоэкзотермической реакции $Ti + C \rightarrow TiC$, протекающей в режиме горения при температуре до 2800 °С. Добавление даже 3–6 мас.% TiC существенно повышает прочность и твёрдость материалов [3], что особенно актуально в производстве инструментов, карбидосталей, износостойких покрытий, деталей авиационных и ракетных двигателей.

Традиционные методы получения карбида титана (карботермическое восстановление, СВС), обладают рядом недостатков: требуют инертной газовой среды, требуют дорогостоящего оборудования, необходимостью длительного времени выдержки при высоких температурах. С этой стороны выгодно выглядит метод быстрого Джоулева нагрева (БДН), для его реализации достаточно пропускания кратковременного импульса тока (20–1000 мс) через прессованную порошковую заготовку, что позволяет достичь температур 2500–4000 К [4], при этом данный процесс можно проводить на открытом воздухе. Процесс протекает в герметичной реакционной камере (например, из кварца или фторопласта), БДН является энергоэффективным, доступным, быстрым и одностадийным методом синтеза карбидов металлов.

Полученный материал анализировался на рентгеновском дифрактометре ЭКРОС XRD – 9510, на трубке БСВ-33 (РИ) при напряжении 25 кВ и токе 8 мА. В качестве излучения использовали Co K α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), регистрацию дифракционных максимумов осуществляли с помощью полупроводникового координатно-чувствительного детектора. Образец вращался в режиме непрерывного сканирования в угловом диапазоне 5–140° со скоростью 3°/мин. Качественный анализ результатов экспериментального исследования, выявил наличие карбида титана как в образцах с добавлением ПТМ-1 и диоксида титана. В составе образца обнаружены фазы титана Ti, рутила TiO₂ и оксида-фторида титана TiOF₂. Методом полнопрофильного анализа с помощью программы Profex был проведён количественный рентгенофазовый анализ порошков, в ходе которого установлено, следующее. В случае ПТМ-1 обнаружено ~1% карбида титана, в случае TiO₂ выявлено ~15%, как видно дисперсность частиц влияет на процесс БДН, для получения большего выхода целевого продукта следует увеличивать максимальный ток импульса, чтобы больше порошка успело прореагировать. Для оптимального проведения БДН необходимо минимальное содержание TiO₂ порядка 40% от общего объема смеси.

1. Антипов М.С., Чижиков А.П., Константинов А.С., Бажин П.М. Металлокерамический материал на основе карбида титана для повышения стойкости шибберных затворов // Новые огнеупоры. 2021. №4. С.34-37.
2. Семенов, Б. Н., Земцова, Е. Г., Смирнов, В. М., Морозов, Н. Ф., & Смирнов, И. В. Механические свойства алюмоматричного композита, армированного карбидом титана // Paper presented at The VIII International Conference «Topical Problems of Continuum Mechanics», Цахкадзор. Armenia. 2023. P. 115-119.
3. Krishna Prasad S., Dayanand S., Rajesh M., Nagaral M., Auradi V., Selvaraj R. Preparation and mechanical characterization of TiC particles reinforced Al7075 alloy // Advances in Materials Science and Engineering. 2022. №1. p.1-11.
4. Chen W., Li J. T., Wang Z., Algozeeb W. A. et al. Ultrafast and controllable phase evolution by flash Joule heating // ACS Nano. 2021. N15. P. 11158-11167.

Гибкий композит ОУНТ/ПДМС с низким перколяционным порогом: электромеханические свойства и применение в нейроинтерфейсах

А.Д. Назаров, Д.В. Чалин, Д.Г. Шапошников

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

УДК:538.915

Композитные материалы на основе углеродных нанотрубок и эластомерных полимеров представляют собой активно развивающееся направление в материаловедении, что обусловлено сочетанием уникальных свойств, востребованным в гибкой электронике и биомедицинских интерфейсах. Особое внимание привлекает композитная система из одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) и полидиметилсилоксана (ПДМС), сочетающая высокую электропроводность углеродного наполнителя с биосовместимостью и хорошей эластичностью полимерной матрицы [1]. В данной работе исследован композит ОУНТ/ПДМС с содержанием ОУНТ 2 мас. %, полученный методом механического диспергирования с последующей вулканизацией.

Структурный анализ с помощью трансмиссионной электронной микроскопии (ТЕМ) подтвердил однородное диспергирование ОУНТ в объеме полимера без значительной агломерации, что является критически важным условием для создания проводящей перколяционной сети. Электрические измерения показали удельную проводимость 8,7 См/м, достаточную для эффективного съема биопотенциалов [2].

Для оценки функциональной применимости композитного материала был изготовлен прототип сухого электрофизиологического электрода с игольчатой поверхностью. Сравнительный анализ регистрации ЭЭГ с использованием разработанного электрода и стандартного Ag/AgCl-электрода продемонстрировал физиологическую корректность сигнала: доминирование альфа-ритма (~10 Гц) в состоянии бодрствующего покоя, адекватную передачу артефактов моргания и мышечной активности, а также низкий уровень высокочастотного шума (0,031 мкВ²/Гц на 60 Гц) [3].

Таким образом, полученный ОУНТ/ПДМС-композит представляет собой функциональный материал со сбалансированными электрофизическими и механическими свойствами, перспективный не только для создания биоинтерфейсов, но и для применения в сенсорике и носимой электронике.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант №24-72-00075.

1. Medina H., Child N. A Review of Developments in Carbon-Based Nanocomposite Electrodes for Noninvasive Electroencephalography // *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2025. Т. 25. №. 7. С. 2274.
2. Chalin D. V. et al. Flexible bulk composite materials based on single-walled carbon nanotubes with high electrical conductivity // *Physical Review Materials*. 2025. Т. 9. №. 7. С. 076001.
3. Shi Z. Y. et al. Claw-shaped flexible and low-impedance conductive polymer electrodes for EEG recordings: Anemone dry electrode // *Science China Technological Sciences*. 2023. Т. 66. №. 1. С. 255-266.

Влияние гибридных силовых полей на эксплуатационные свойства полиимидных нанокompозитов на основе оксидов металлов: исследование методом атомистической молекулярной динамики

В.М. Назарычев¹, А.Ю. Добровский¹, А.Л. Николаева¹, А.Н. Бугров^{1,2}, В.О. Виноградова^{1,2}, Н.В. Лукашева¹

¹Филиал НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИВС, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Санкт-Петербург
УДК: 541.66, 541.68, 538.9

Полиимиды представляют собой гетероциклические полимеры, отличающиеся высокой термической и химической стабильностью, а также хорошими диэлектрическими свойствами. Однако их термические и механические характеристики уступают материалам на основе металлов. В целях повышения этих характеристик разрабатываются полимерные нанокompозиты, содержащие наночастицы оксидов металлов, таких как Al_2O_3 и Fe_2O_3 . Тем не менее, молекулярные механизмы, посредством которых наночастицы улучшают свойства композитов, требуют дальнейшего изучения. Компьютерное моделирование на атомарном уровне используется для изучения взаимодействий на границе между полимером и нанонаполнителем. Это помогает найти способы улучшить взаимодействие между наночастицами оксидов металлов и полимерной матрицей. Для успешного атомистического моделирования необходимо точно определить потенциалы внутримолекулярных и межмолекулярных взаимодействий для полиимидов и наночастиц оксидов металлов.

В данной работе представлены результаты валидации параметров атомистического компьютерного моделирования моделей нанокompозитов трех термостойких полиимидов на основе диамина 4,4'-диаминодифенилоксида (ДАДФЭ) и трёх диангидридов бензол-1,2,4,5-тетракарбоновой кислоты (ПМ), бензол-1,2,4,5-тетракарбоновой кислоты (ДФО) и 1,3-бис-(3',4'-дикарбоксифенокси)бензола (Р) с добавлением наночастиц оксидов металлов: алюминия (III) $\alpha-Al_2O_3$ и железа (III) $\alpha-Fe_2O_3$. Для этого разработали модели на основе гибридных силовых полей. В основу легли два силовых поля, чаще всего используемые для моделирования оксидов металлов - ClayFF и Interface, а также два классических поля для полимеров - OPLS и Amber. Для каждого полиимидного нанокompозита создали два типа моделей. 1) Взаимодействия полимера описывались с помощью OPLS-AA, а оксида металла - с помощью ClayFF. 2) Взаимодействия полимера описывались с GAFF, а оксида металла - с Interface.

Для компьютерного моделирования был использован пакет молекулярной динамики Gromacs версии 2023.2. Были созданы образцы полимерных нанокompозитов, в которых наночастицы оксида металла образовывали периодический кристалл в плоскости XY, а полиимидные цепи располагались над поверхностью оксида, занимая пространство, перпендикулярное ему. Количество полиимидных цепей определялось таким образом, чтобы массовая доля наночастиц составляла ~ 20%. После предварительного уравнивания образцы подвергались охлаждению от температур, превышающих температуру стеклования, до комнатной температуры, после чего осуществлялась их деформация. В результате проведенных расчетов были определены значения температуры стеклования, коэффициента объемного термического расширения, модуля упругости и предела текучести нанокompозитов. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными позволило определить модели, наиболее точно воспроизводящие экспериментальные соотношения эксплуатационных характеристик полиимидных нанокompозитов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Соглашение № 24-73-10216, <https://rscf.ru/project/24-73-10216/>).

Линейно-упорядоченные ряды МУНТ в легированных оксидом европия наноструктурных углеродных плёнках $CN_x:Eu_yO_z$, выращенных с помощью DC-магнетрона

В.В. Недёркин¹, А.А. Посыпаев^{1,2}, Е.И. Шемченко¹

¹ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Донецк

²ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Донецк

УДК: 533.922, 533.924, 539.234, 67.02, 538.9

Среди перспективных наноматериалов особое внимание привлекают композитные плёночные системы на основе многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), легированных различными химическими элементами, что позволяет добавлять к собственным свойствам таких плёнок, свойства легирующих атомов. Легирование редкоземельными элементами перспективно для разработки твёрдотельных квантовых вычислительных ячеек типа «излучатель-кубит-приёмник», и открывает путь к созданию твёрдотельных, неохлаждаемых кубитов для квантовых вычислительных систем, совместимых с современными электронными вычислительными системами.

На свойства нанотрубок влияют не только их геометрические характеристики, меняя которые во время роста нанотрубок, возможно управлять всеми свойствами композитного материала [1], но и их расположение в массиве плёнки. Определение закономерностей роста углеродных наноструктурных плёнок, позволяющих получать образцы с заранее заданным упорядоченным расположением МУНТ в плёнках, является актуальной современной задачей.

Целью данной работы было исследование геометрических характеристик МУНТ в линейно-упорядоченных рядах, в полученных образцах.

Образцы были получены на модернизированной вакуумной установке ВУП-5М с DC-магнетроном в атмосфере азота и легированы оксидом европия в процессе роста ($CN_x:Eu_yO_z$) [2]. Изображения поверхности пленок $CN_x:Eu_yO_z$ [3] были получены методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью зондовой лаборатории NTEGRA Aura. Обработку и анализ АСМ-изображений осуществляли в программе ImageAnalysis.

Обычно на стандартных углеродных плёнках наблюдается хаотичное расположение нанотрубок [4]. Однако методами АСМ было обнаружено, что на поверхности исследуемых пленок присутствуют выраженные линейные структуры вертикально ориентированных МУНТ в виде упорядоченных полос.

В ходе анализа АСМ-изображений было определено: геометрические характеристики углеродных нанотрубок в обнаруженных рядах совпадают с таковыми у основной массы нанотрубок в образце; упорядоченные ряды в плёнках состоят преимущественно из пучков МУНТ; упорядочение нанотрубок в линейные ряды в плёнке может свидетельствовать о периодических процессах в плазме DC-магнетрона.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Проекта по созданию молодежных лабораторий и государственного задания FREZ-2024-0001.

1. Окунев В.Д., Самойленко З.А., Николаенко Ю.М., Дьяченко Т.А., Корнеев А.С., Пушенко Е.И. Формирование кластеров $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ в магнетронной плазме при воздействии ионно-звуковой волны на поток частиц // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 46. № 1. С. 47-51.
2. Шемченко Е.И., Лихтенштейн И.Я. Некоторые особенности морфологии поверхности наноструктурных пленок нитрида углерода, легированных оксидом европия // ФТВД. 2019. Т. 29. № 2. С. 63-71.
3. Е.И. Шемченко, А.Г. Петренко, И.Я. Лихтенштейн, Вестник Луганского национального университета им. Владимира Даля, 2018. Т.5. №11. С. 151.
4. Окунев В.Д., Самойленко З.А., Szymczak H., Дьяченко Т.А., Пушенко Е.И. Две стадии роста кластеров $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ в магнетронной плазме при модуляции потока частиц ионно-звуковой волной и осаждении его на стекло // ФТТ. 2021. Т. 63. № 4. С. 433.

Оценка влияния ионов Sr^{2+} на параметры кристаллической решетки хромитов лантана и гадолиния

Я.М. Немых, В.Ф. Кострюков

Воронежский государственный университет, Воронеж

УДК: 54.061, 538.9

Одной из востребованных категорий полупроводниковых приборов являются газовые сенсоры, способные фиксировать присутствие различных газов в воздухе [1]. Для детектирования опасных газов, перспективным направлением является исследование сложных оксидов со структурой перовскита типа ACrO_3 (где А – редкоземельные элементы La, Gd) [2]. Главной особенностью перовскитоподобных хромитов является разность размеров катионов А и В, такие соединения легко поддаются модификации с помощью допирования.

Введение ионов Sr^{2+} в кристаллическую решетку хромитов лантана и гадолиния приводит к изменению параметров элементарной ячейки, что, в свою очередь, влияет на электрофизические и газочувствительные свойства материалов. Изучение характера и степени этих деформаций является ключевым этапом для понимания механизмов формирования функциональных характеристик и разработки составов с заданными параметрами.

Образцы нанопорошков составов LaCrO_3 , $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_3$ ($x = 0,05; 0,10$), GdCrO_3 и $\text{Gd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_3$ ($x = 0,05; 0,10$) были синтезированы цитратным методом. Рентгенографические исследования проведены при комнатной температуре на дифрактометре Thermo ARL X'TRA с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения (длина волны $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$). Съемка дифрактограмм осуществлялась в интервале углов 2θ от 20 до 80° с шагом $0,02^\circ$.

Дифрактограммы всех образцов соответствуют пространственной группе Pbnm . Синтезированные образцы являются однофазными и обладают структурой перовскита.

Матричное соединение LaCrO_3 характеризуется параметрами элементарной ячейки $a = 5,492 \text{ \AA}$, $b = 5,493 \text{ \AA}$, $c = 7,768 \text{ \AA}$. При допировании ионами Sr^{2+} наблюдается немонотонное изменение параметров: для состава $\text{La}_{0,95}\text{Sr}_{0,05}\text{CrO}_3$ параметры составляют $a = 5,523 \text{ \AA}$, $b = 5,468 \text{ \AA}$, $c = 7,752 \text{ \AA}$, а для $\text{La}_{0,9}\text{Sr}_{0,1}\text{CrO}_3$ – $a = 5,488 \text{ \AA}$, $b = 5,485 \text{ \AA}$, $c = 7,765 \text{ \AA}$. Смещение пиков на дифрактограммах в сторону больших углов (порядка $0,06$ и $0,03$ град. для 5 и 10 ат.% Sr соответственно) обусловлено меньшим ионным радиусом Sr^{2+} ($1,16 \text{ \AA}$) по сравнению с La^{3+} ($1,5 \text{ \AA}$), что приводит к сжатию кристаллической решетки [3].

Для хромитов гадолиния чистый GdCrO_3 имеет параметры $a = 5,314 \text{ \AA}$, $b = 5,522 \text{ \AA}$, $c = 7,598 \text{ \AA}$. Допирование стронцием приводит к закономерному увеличению параметров: $\text{Gd}_{0,95}\text{Sr}_{0,05}\text{CrO}_3$ – $a = 5,313 \text{ \AA}$, $b = 5,525 \text{ \AA}$, $c = 7,608 \text{ \AA}$; $\text{Gd}_{0,9}\text{Sr}_{0,1}\text{CrO}_3$ – $a = 5,313 \text{ \AA}$, $b = 5,526 \text{ \AA}$, $c = 7,615 \text{ \AA}$. Смещение пиков в сторону меньших углов (порядка $0,02$ – $0,03$ град.) объясняется большим ионным радиусом Sr^{2+} по сравнению с Gd^{3+} ($0,98 \text{ \AA}$), что приводит к увеличению межплоскостных расстояний [3].

Установлено, что направленность структурных изменений при допировании Sr^{2+} определяется соотношением ионных радиусов основного и замещающего элементов. Выявленные закономерности можно использовать при разработке материалов с конкретными параметрами для применения в газочувствительных сенсорах.

1. Burgués J. Low Power Operation of Temperature-Modulated Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors // Sensors. 2018. Vol. 18, № 2. P. 15–36.
2. Prashant B. K. Fabrication of thin film sensors by spin coating using sol-gel LaCrO_3 Perovskite material modified with transition metals for sensing environmental pollutants, greenhouse gases and relative humidity // Environmental Challenges. 2021. Vol. 3. P. 1–13.
3. Бугаенко Л. Т. Почти полная система средних ионных кристаллографических радиусов и ее использование для определения потенциалов ионизации // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 2. Химия. 2008. Т. 49, №6. С. 363–384.

Явление интерференции Ааронова-Бома при высокой температуре

Р.А. Ниязов^{1,2}, И.В. Крайнов², Д.Н. Аристов^{1,2}, В.Ю. Качоровский²

¹НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

УДК: 538-915

Квантовая интерференция лежит в основе современных исследований в области физики конденсированного состояния и нанoeлектроники. Особый интерес представляют интерферометры Ааронова–Бома (АБ), реализованные в кольцевых наноструктурах. Благодаря своей чувствительности к магнитному потоку, такие системы служат идеальной платформой для изучения квантовой когерентности и создания сверхчувствительных датчиков магнитного поля [1].

В данном обзорном докладе будет представлен сравнительный анализ двух типов интерферометров АБ. Интерферометр на основе обычного проводника моделируется квазиодномерными состояниями. Ключевым механизмом, влияющим на интерференционную картину, является рассеяние электронов назад на контактах подвода. Второй тип - это интерферометр на основе топологического изолятора. Здесь проводимость обеспечивается геликоидальными краевыми состояниями, где направление движения электрона жестко связано с его спином. Благодаря защищенности от рассеяния назад на обычных дефектах, для возникновения интерференции в такой системе требуется наличие магнитного дефекта на краю.

Основное внимание будет уделено поведению системы в нетривиальном режиме высоких температур (значительно превышающих расстояние между уровнями размерного квантования в кольце). Будет продемонстрировано, что интерференция Ааронова–Бома сохраняется и в этом режиме. В докладе будут проанализированы ключевые наблюдаемые величины: кондактанс, спиновая поляризация и дробовой шум, выступающий индикатором дискретности заряда и квантовых корреляций.

Полученные результаты не только объясняют данные недавних экспериментов на двумерных топологических изоляторах [2], но и предсказывают новые эффекты, доступные для наблюдения в высокотемпературной области. Работа открывает перспективы для применения квантовых интерферометров в спинтронике, высокочувствительной магнитометрии и элементной базы для реализации квантовых вычислений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ грант № 25-12-00212.

1. Niyazov R.A., Aristov D.N., Kachorovskii V.Yu. Aharonov–Bohm Interferometry Based on Helical Edge States (Brief Review) // JETP Letters. 2021. V. 113. P. 689-700.
2. Крайнов И.В., Ниязов Р.А., Аристов Д.Н., Качоровский В.Ю. Немагнитный механизм рассеяния назад в геликоидальных краевых состояниях // Письма в ЖЭТФ. 2025. V. 122. P. 495.

Влияние легирующих элементов и внешних воздействий на процесс старения алюминиевого сплава В95пч

Д.Р. Нуретдинова, Ю.В. Осинская, С.Р. Макеев, А.А. Бойцов

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, Самара
УДК: 537.63:539.26

В последние десятилетия значительное внимание уделяется изучению физико-механических свойств алюминиевых сплавов и разработке методов целенаправленного управления ими. Алюминиевые сплавы, сочетающие малую плотность, высокую удельную прочность и коррозионную стойкость, являются ключевыми конструкционными материалами в авиа- и ракетостроении, автомобильной промышленности и других высокотехнологичных отраслях. Для управления и модификации их структурой и свойствами часто используются такие подходы, как легирование [1], различные режимы термической обработки, а также воздействие внешних полей [2].

Настоящее исследование посвящено анализу влияния легирующих элементов и постоянного магнитного поля на микротвердость и параметры тонкой структуры алюминиевого сплава В95пч после искусственного старения при температуре 140 °С в течение 2–8 ч в присутствии постоянного магнитного поля напряженностью 7 кЭ. Эксперименты проведены на двух материалах: техническом сплаве В95пч и специально выплавленном модельном сплаве системы Al–Zn–Mg (содержание цинка ~5 вес. %, магния ~2 вес. %). Старение закаленных образцов осуществлялось в специальной вакуумной печи.

Установлено, наложение постоянного магнитного поля в процессе старения промышленного сплава повышает его микротвердость до 21 % что соответствует отрицательному магнитопластическому эффекту [3]. В тоже время для модельного сплава аналогичный эффект упрочнения отсутствует. Причиной отсутствия эффекта в модельном сплаве, предположительно, является его химический состав. Присутствие легирующих элементов способно изменять свободную энергию системы, что интенсифицирует зарождение вторичных фаз [4]. Таким образом, отсутствие меди в модельном сплаве, возможно, снижает эффективность зарождения выделений второй фазы и их взаимодействию с движущимися дислокациями в присутствии постоянного магнитного поля.

Данные рентгеноструктурного анализа показали, что наложение постоянного магнитного поля на процесс старения исследуемых сплавов приводит к уменьшению значений среднего размера блоков когерентного рассеяния в 1,5–2 раза, а также к росту величин относительных микродеформаций и плотности дислокаций в 2–5 раз по сравнению со значениями, полученными в отсутствие поля. Это указывает на формировании более искаженной кристаллической структуры сплавов, состаренных в постоянном магнитном поле. Кроме того, значения плотности дислокаций в техническом сплаве на порядок выше, чем в модельном сплаве. Наиболее существенным представляется тот факт, что величина относительных микродеформаций в техническом сплаве в 4 раза выше, чем в модельном сплаве, что свидетельствует о значительно больших искажениях кристаллической решетки в промышленном сплаве в ходе процесса старения.

1. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение) / под ред. академика РАН Фридляндера И.Н. // К.: КОМИНТЕХ. 2005. 365 с.
2. Jun L., Hongyun L., Chu L., Tianshu Z., Runze W., Yue M. Effect of magnetic field on precipitation kinetics of an ultrafine grained Al–Zn–Mg–Cu alloy // Materials Science and Engineering. A. 2020. V. 798.
3. Осинская Ю.В., Покоев А.В. Влияние добавок никеля и постоянного магнитного поля на структуру и свойства состаренных медно-бериллиевых сплавов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2018. № 2. С. 58–62.
4. Алымов М.И., Елманов Г.Н., Калинин Б.А. и др. Физическое материаловедение: Учебник для вузов: В 6 т. // М.: МИФИ. 2008. Т.5. 672 с.

Обменные взаимодействия в подрешетки железа в ортоферрите DyFeO₃

А.К. Овсяников, О.В. Усманов, И.А. Зобкало

НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

УДК: 538-913

В работе проведены исследования монокристалла ортоферрита диспрозия DyFeO₃ методами неупругого рассеяния нейтронов. Эксперименты с использованием неупругого рассеяния нейтронов были выполнены на тепловых трехосных нейтронных спектрометрах IN20 в Институте Лауэ-Ланжевена (ILL) и TAIPAN в Австралийской организации по ядерной науке и технологиям (ANSTO). Оба прибора использовали монохроматор и анализатор из пиролитического графита (002) и точечный детектор ³He. Оба прибора работали в режиме постоянного $kf = 2,66 \text{ \AA}^{-1}$. Для обоих экспериментов образец с ориентацией в плоскости рассеяния HK0 был закреплен в алюминиевом держателе и помещен в оранжевый криостат. Для измерений на TAIPAN между образцом и анализатором использовался пиролитический графитовый фильтр. Для измерений на IN20 использовались сапфировый фильтр и селектор скоростей, установленный перед монохроматором. Селектор скоростей использовался для сканирования с энергией ниже 45 мэВ. Для сканирования с более высокой энергией переноса селектор был удален. Эксперименты проводились при $T = 10 \text{ K}$ и $T = 3,7 \text{ K}$, выше и ниже температуры Неэля Dy $T_N^{\text{Dy}} \sim 4 \text{ K}$. В обоих случаях наблюдались пики высокой интенсивности, соответствующие уровням кристаллического электрического поля (CEF). Для измерения пиков, соответствующих магнонам подсистемы Fe, были проведены сканирования при энергии выше 45 мэВ. Диапазон энергий 45–75 мэВ соответствует диапазону энергий, в котором лежат дисперсионные кривые в других ортоферритах [1] [2]. Таким образом, эксперимент на IN20 был сосредоточен на измерении кривых дисперсии и энергетической щели магнонов Fe, в то время как в эксперименте на TAIPAN были четко определены уровни кристаллического поля.

Для расчета величин обменных взаимодействий использовалась линейная теория спиновых волн. Уточнения значений параметров обменных взаимодействий проводились в программе SpinW. Полученные значения обменных взаимодействий внутри подсистемы Fe хорошо согласуются с известными значениями для других ортоферритов $J_b = 4.87 \text{ мЭВ}$ $J_{ac} = 4.46 \text{ мЭВ}$. Основную роль в формировании магнитной структуры ниже температуры Неэля играет суперобмен между ближайшими соседями внутри подрешетки Fe. С понижением температуры полная энергия системы уменьшается и становится эффективным обмен между подрешетками Fe и Dy - $J^{\text{Fe-Dy}}$. Анизотропия подсистемы редкоземельных элементов начинает вносить заметный вклад в общую анизотропию системы, что приводит к переориентации спинов. Тем не менее, из данных по неупругому рассеянию тепловых нейтронов не удаётся определить величину обмена $J^{\text{Fe-Dy}}$, что, вероятно, указывает на её малую величину. Однако из эксперимента были получены энергии уровней кристаллического поля иона Dy³⁺.

1. Ovsyanikov A.K., Zobkalo I.A., Schmidt W., Barilo S.N., Guretskii S.A., Hutanu V. Neutron inelastic scattering study of rare-earth orthoferrite HoFeO₃ // JMMM. 2020. V. 507. P. 166855.
2. Ovsyanikov A.K., Usmanov O.V., Zobkalo I.A., Schmidt W., Maity A., Hutanu V., Ressouche E., Shaykhutdinov K.A., Terentjev K.Yu., Semenov S.V., Meven M., Roth G., Peters L. Inelastic neutron studies and diffraction in magnetic fields of TbFeO₃ and YbFeO₃ // J. Magn. Magn. Mater. 2022. V. 563. P. 170025.

Концепция инструментария для наномасштабных исследований в рамках перспективного развития проекта КИИ DARIA

К.А. Павлов¹, Н.А. Григорьева², С.В. Григорьев¹

¹НИИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

²Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург

УДК: 53.082.79, 538.9

Одним из перспективных направлений развития проекта компактного источника нейтронов (КИИ) DARIA [1] является создание серии источников, однотипных по мощности ускорителя и нейтрон-производящей мишени, но с различным набором установок, зависящим от области применения. Параметры каждого конкретного источника при этом адаптируются, исходя из оптимума условий для проектируемого набора инструментов. Как наиболее востребованные, авторами предложены варианты КИИ DARIA для фундаментальной физики твёрдого тела, либо специализированный для биофизики, химии, исследования жидкостей и полимеров. Принципиальная схема установки МУРН для таких разновидностей источника соответствует базовой версии, разработанной ранее в ходе пилотного проекта [2], а в настоящей работе рассмотрена специфика реализации метода для указанных приложений.

Для «твердотельной» разновидности установки МУРН ключевым является наличие детектора с полноценным двумерным пространственным разрешением и опция с поляризованными нейтронами, а также система окружения образца, способная задать высокое магнитное поле и высокую и низкую температуру, так как подавляющее большинство задач в современной физике твёрдого тела связаны с явлениями магнетизма. Для «биологической» версии установки типичные объекты исследования являются, как правило, изотропными системами. Для таких экспериментов требуется по возможности широкий диапазон переданных импульсов с максимумом разрешения по модулю переданного импульса, при полной нечувствительности к его направлению из-за изотропного характера рассеяния (хаотичной ориентации частиц в растворе). Под концепцию детектора для такой установки идеально подходит конструкция с осевой симметрией колец, впервые предложенная и успешно эксплуатируемая на инструменте ЮМО в ОИЯИ (Дубна) [3]. Система окружения образца ограничивается ячейкой с автоматической сменой образцов и термостатом в диапазоне температур от -20 до +150°C.

В дополнение к малоугловым инструментам предложен рефлектометр неполяризованных нейтронов низкого разрешения с вертикальной плоскостью рассеяния, для которого заданы временные и спектральные характеристики источника, определённые как оптимальные для метода малоуглового рассеяния – установки МУРЕНА. Прототипом такой установки может служить рефлектометр РЕВЕРАНС [4] во времяпролётном режиме работы. Предложенная схема рефлектометра отвечает требованиям «биологической» версии источника, благодаря горизонтальной плоскости позиционирования образца, а в «твердотельной» вариации будет востребована в исследованиях приповерхностных слоёв за счёт сравнительно высокой интенсивности пучка для рассеяния в широкоугольном диапазоне.

1. Григорьев С.В., Коваленко Н.А., Павлов К.А., Москвин Е.В., Сыромятников В.Г., Григорьева Н.А. Нейтронные установки компактного источника нейтронов DARIA: параметры и особенности // Известия РАН. 2023. Т. 87 № 11 С. 1526–1533.

2. К.А. Павлов, Н.А. Коваленко, Л.А. Азарова, Е.А. Кравцов, Т.В. Кулевой, С.В. Григорьев, Поверхность №7. С.1-9 (2023).

3. Куклин А.И. и др. Малоугловое рассеяние на импульсном источнике нейтронов ИБР-2: настоящее и будущее // Кристаллография. 2021. Т. 66. № 2. С. 230-241.

4. Забенкин В.Н., Аксельрод Л.А., Гордеев Г.П., Диденко Г.П., Лазебник И.М. О проекте рефлектометра Реверанс на реакторе ПИК // Поверхность. 2018. № 3 С. 31-33.

Механическая спектроскопия сплавов системы Ti-Ni-Cu

Н.В. Пермяков¹, Е.К. Белоногов^{1,2}

¹Воронежский государственный университет, Воронеж

²Воронежский государственный технический университет, Воронеж

УДК: 539.213.27, 538.911, 54.03

В работе для изучения закономерностей процессов релаксации и кристаллизации сплавов системы Ti-Ni-Cu использован метод механической спектроскопии в комплексе с методами РФА, АСМ и ДБЭ. Установлены температурные зависимости коэффициента внутреннего трения Q^{-1} и относительного изменения квадрата резонансной частоты f^2/f_0^2 (соответствует изменению упругих модулей материала) быстрозакалённых аморфных лент $Ti_{49}Ni_9Cu_{42}$, и $Ti_{60}Ni_{18}Cu_{22}$. Температурная зависимость $Q^{-1}(T)$ имеет три характерные области: до $\sim 300^\circ C$ Q^{-1} остаётся низким, что доказывает стабильность аморфной структуры материала; в интервале $320-370^\circ C$ наблюдали рост Q^{-1} , связанный с релаксацией и началом структурной перестройки; в диапазоне $380-500^\circ C$ фиксируются выраженные максимумы Q^{-1} , что отвечает этапам кристаллизации и рекристаллизации. В этой области меняется характер зависимости f^2/f_0^2 от T . После завершения процесса кристаллизации наблюдали рост f^2/f_0^2 , что отражает увеличение упругих свойств кристаллической структуры материала.

По данным РФА исходные образцы имеют квазиаморфную структуру (гало в интервале $2\theta = 35-50^\circ$ и второе $70-80^\circ$). Квазиаморфные структуры [1] - предельное наноструктурирование веществ в процессе собирательной рекристаллизации.

После нагрева в вакууме до $500^\circ C$ и охлаждения выявлены дифракционные пики, свидетельствующие о формировании кристаллических фаз (γ -CuTi, TiNi, Ti). В лентах состава $Ti_{49}Ni_9Cu_{42}$ интерметаллическое соединение γ -CuTi формирует аксиальную текстуру [110]. Образование кристаллитов TiNi и Ti характерно только для лент состава $Ti_{60}Ni_{18}Cu_{22}$.

1. Иевлев В.М., Канныкин С.В., Костюченко А.В., Белоногов Е.К., Путляев В.И. Об информативности рентгеновских дифрактограмм в виде гало. // Неорганические материалы. 2020. Т. 56. № 8. с. 906–913.

Постановка эксперимента по изучению влияния самоорганизации дефектов на протекание пластической деформации в металлах

А.А. Питолин^{1,2}, К.В. Гоголинский^{1,2}

¹НИИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

УДК: 539.374.1, 538.9

Исследование процессов пластической деформации является актуальной задачей современного материаловедения, поскольку понимание фундаментальных механизмов пластичности необходимо для прогнозирования поведения конструкционных материалов, разработки новых сплавов и оптимизации технологических процессов в авиакосмической, автомобильной и других высокотехнологичных отраслях.

Пластическая деформация металлов и сплавов сопровождается рядом неравновесных явлений, влияющих на механическое поведение материала. Наиболее характерными из них являются полосы Людерса и эффект Портевена - Ле Шателье (ПЛШ), представляющие собой волны локализованной пластической деформации, распространяющиеся по образцу в процессе нагружения [1]. Данные явления определяются коллективной динамикой дефектов кристаллической структуры - дислокаций и их взаимодействий - и принципиально меняют физику деформационного процесса, аналогично тому, как турбулентность меняет динамику течения жидкости.

Арсенал существующих методов изучения эффекта ПЛШ весьма широк: оптические, термографические, акустические, магнитные, электрические и электрохимические подходы, однако каждый из них обладает существенными ограничениями [2]. Общим недостатком перечисленных методов является отсутствие структурной чувствительности на атомном уровне: ни один из них не позволяет непосредственно отслеживать эволюцию кристаллической решётки и дислокационной структуры *in situ* в момент прохождения волны пластичности.

Эффективным инструментом для преодоления этого ограничения является рентгеновская дифракция (РД), позволяющая наблюдать внутренние структурные изменения на атомарном уровне [3]. В настоящем докладе обсуждается выбор материалов, пробоподготовка и методика механических испытаний, обеспечивающие устойчивое воспроизведение эффекта ПЛШ в монокристаллических образцах. Для прямого наблюдения за коллективным поведением дефектов и эволюцией кристаллической структуры в ходе развития эффекта предлагается использовать метод РД *in situ* на синхротроне. Высокая яркость синхротронного излучения позволяет преодолеть ограничения по скорости регистрации и получить структурные данные с временным разрешением, соответствующим характерным временным масштабам динамики волн пластичности. Полученные экспериментальные данные послужат основой для построения физической модели наблюдаемых процессов.

1. Третьякова Т. В., Вильдеман В. Э. Пространственно-временная неоднородность процессов неупругого деформирования металлов // М.: физматлит. 2016. Т. 118.
2. Yilmaz A. The Portevin–Le Chatelier effect: a review of experimental findings // Science and technology of advanced materials. 2011. Т. 12. №. 6. С. 063001.
3. Sjögren-Levin E. et al. Grain-level mechanism of plastic deformation in harmonic structure materials revealed by high resolution X-ray diffraction // Acta Materialia. 2024. Т. 265. С. 119623.

Влияние примесной структуры кристаллов CdZnTe на чувствительность к воздействию магнитного поля

П.Л. Подкур¹, И.С. Волчков¹, Р.Б. Моргунов², В.Б. Кварталов¹, В.М. Каневский¹

¹НИЦ «Курчатовский Институт», Москва

²Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка

УДК: 53.098, 544.22, 621.315.592.3, 538.9

Современные технологии предъявляют все более строгие требования к материалам, используемым для изготовления функциональных элементов, например, к полупроводникам.

Технология получения наиболее распространенных полупроводников, таких как кремний, достигла значительных успехов и позволяет получать большие, бездислокационные кристаллы. Технологии получения совершенствуются и для других материалов, например, твердых растворов на основе теллурида кадмия (CdTe), однако многие ограничения не удалось преодолеть до сих пор. По этой причине рассматриваются и способы постростовой модификации, способные улучшить качество уже выращенных кристаллов. Одним из таких методов является экспозиция материала в магнитном поле. Известно, что воздействие даже слабого магнитного поля способно приводить к изменениям свойств кристаллов, однако единого механизма происходящих изменений не установлено. Цель данной работы связать наблюдаемые изменения свойств после магнитной экспозиции с процессами в дефектных комплексах, которые могут существовать в кристаллах CdZnTe ввиду особенностей его структуры.

Кристаллы CdZnTe и CdTe, выращенные в институте Кристаллографии им. А.В. Шубникова модифицированным методом Обреимова-Шубникова, были охарактеризованы и подготовлены для исследований электрических и магнитных свойств. Был охарактеризован примесный и фазовый состав образцов, с применением масс-спектрометрии, спектроскопии комбинационного рассеяния, рентгенофазового анализа. Характеризация показала наличие в образцах фаз CdZnTe или CdTe соответственно, а также примесей Fe, Ni.

Электрические свойства исследовались двухконтактным методом. Исследования проводились дважды: до воздействия импульсного магнитного поля (ИМП) и после. Исследования показали долговременное увеличение тока в образцах CdZnTe после воздействия ИМП, в образце CdTe рост тока не наблюдался. Для воздействия на кристаллы использовалось слабое ИМП, удовлетворяющее условию $\mu\beta \ll kT$, с величиной магнитной индукции $B = 1,04$ Тл, частотой импульсов $\nu = 12$ Гц, время воздействия – 10 мин. Магнитные свойства исследовались методом СКВИД-магнитометрии. При вычете диамагнитной составляющей матрицы у кристаллов CdZnTe были обнаружены ферромагнитные свойства.

Результаты магнитометрии и характеристики кристаллов позволяют предположить образование в кристаллах суперпарамагнитных кластеров, состоящих из, например, $V_{Cd}^{2-}Fe_{Cd}^{2+}$ или $V_{Cd}^{2-}Ni_{Cd}^{2+}$. Благоприятные условия для возникновения таких кластеров возникают именно в кристаллах CdZnTe, так как с ростом содержания Zn наблюдается увеличение концентрации V_{Cd} . Происходит это в результате понижения локальной симметрии, характерной для CdTe, при замещении Zn атомов Cd. Таким образом, из-за структурных изменений в кристалле, вызванных встраиванием атомов Zn, увеличивается вероятность образования катионных вакансий, что приводит к увеличению вероятности образования комплексов, вроде $V_{Cd}^{2-}Fe_{Cd}^{2+}$, $V_{Cd}^{2-}Fe_{Cd}^{3+}$. Это увеличивает концентрацию суперпарамагнитных кластеров и влияет на величину намагниченности насыщения. ИМП воздействует на указанные суперпарамагнитные кластеры, что приводит к их перестроению, и это приводит к резкому падению электросопротивления.

Результаты работы позволяют прогнозировать чувствительность полупроводниковых кристаллов воздействиям ИМП в зависимости от их структуры и наличие примесей.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Анализ режимов работы кабеля индуктивного накопителя энергии: роль анизотропии свойств ВТСП-композита

С.В. Покровский, И.В. Мартиросян, А.Ю. Малявина, Д.А. Александров

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

УДК: 538.945

Сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии (СПИН) являются перспективными устройствами для современной энергетики и открывают новые возможности для эффективного хранения энергии. Область применения таких устройств охватывает умные микросети, энергетические системы на основе возобновляемых источников энергии и энергосистемы для электротранспорта. Ключевыми факторами надёжной и эффективной работы СПИН и сверхпроводниковых накопителей выступает оптимизация кабелей и выбор условий их работы, а также продуманное охлаждение обмоток накопителя. Все это позволяет добиться более высоких критических токов и существенно сократить потери переменного тока, что повышает общую энергоэффективность системы.

В исследовании проводилось сравнение характеристик и режимов работы элементов индуктивного накопителя энергии и сверхпроводящих кабелей двух типов: CORC кабель и твистированная стопка лент на основе композитных ВТСП лент второго поколения. Для исследования использовались промышленные ВТСП-ленты второго поколения производства компании S-Innovations на основе $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ с критической температурой 92 К. Критический ток лент шириной 4 мм составляет не менее 140 А при температуре жидкого азота в собственном магнитном поле. Были проведены исследования анизотропии магнитных характеристик в широком интервале температур (5-77 К) и магнитном поле до 5 Тл, тепловых характеристик при температуре от 45 до 77 К, а также исследована угловая зависимость критического тока от магнитного поля. Рассмотренные ориентации ВТСП ленты характерны для геометрии кабелей индуктивного накопителя энергии.

Разработана модель для анализа процессов нестационарного протекания тока в сверхпроводниковых элементах на основе решения неизотермических уравнений Максвелла с использованием Н и Т-А формализмов методом конечных элементов. В модели учитываются температурная зависимость критического тока и теплоемкости, а также анизотропия теплопроводности. Переход в нормальное состояние описывается через задание ВАХ с учетом распространения нормальной зоны в сверхпроводнике.

Для моделирования охлаждения в случае жидкого азота используется гистерезисная кривая кипения в режиме пузырькового и конвективного теплообмена. Для случая криокулерного охлаждения рассматривается теплопередача по твердому телу или конвективного теплообмена с использованием газообразного гелия.

Проведен анализ влияния анизотропии тепловых, магнитных и транспортных характеристик ВТСП композитов и сборок на их основе на условия работы кабелей для индуктивного накопителя энергии, в частности рассмотрено влияние клеевых составов и паяных соединений на характеристики кабелей. Определены режимы охлаждения для случаев использования кабелей двух типов.

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2025-0008) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Исследование особенностей формирования ионно-лучевой пленки Mo-Si, методами рентгеновской дифракции и ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии

И.В. Польшин¹, Е.С. Керсновский¹, Е.И. Гайворонская¹, М.И. Гайворонская¹ С.А. Ивков¹,

Н.С. Буйлов¹, А.Е. Никонова² А.В. Ситников², К.А. Барков¹

¹Воронежский государственный университет, Воронеж

²Воронежский государственный технический университет, Воронеж

УДК:538.9

Тонкие пленки на основе Mo-Si являются одним из важнейших элементов для создания сверхпроводимых однофотонных детекторов дальнего ИК излучения [1,2]. Уникальность данного материала, делающая его перспективным для использования в качестве детектирующего слоя, заключается в увеличении диапазона регистрируемых фотонов с длиной волны более 10 мкм в сторону дальнего ИК [2]. Однако, самая высокая температура перехода материала Mo-Si в сверхпроводящее состояние наблюдается именно для фазы Mo₃Si. Более того, наибольший интерес представляет именно аморфная модификация Mo₃Si. Поэтому основной задачей ученых в этом направлении является отработка режимов получения однофазной пленки Mo₃Si. В рамках данной работы исследовались структурные свойства тонких пленок Mo-Si, полученных методом ионно-лучевого распыления.

Пленки Mo-Si были получены методом ионно-лучевого распыления составной мишени [3], которая представляет из себя молибденовую пластину длиной около 25 см с кремниевыми навесками с уменьшающимся зазором между ними. Данная конфигурация позволяет получить тонкие пленки толщиной ~100 нм с постепенно изменяющимся атомным составом. В качестве подложки использовалась пластина монокристаллического кремния Si (100) с буферным слоем SiO₂ (dSiO₂=100 нм).

Элементный состав определялся методом энергодисперсионной спектроскопии. Анализ наличия кристаллических фаз проводился методом рентгеновской дифракции. Анализ фазового состава проводился при помощи метода ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (УМРЭС), который позволяет определить электронное строение валентной зоны. Ещё одним преимуществом данного метода является возможность проводить исследования при разной глубине анализа от ~10 до ~60 нм.

Анализ фазового состава пленки Mo-Si с содержанием Mo ~75 at.% методом УМРЭС показал, что электронное строение валентной зоны при глубине анализа 20 нм соответствует эталону низшего силицида молибдена Mo₃Si [4]. При увеличении глубины анализа до ~30 и 60 нм заметна трансформация спектра, заключающаяся в увеличении плотности электронных состояний вблизи потолка валентной зоны.

Исследование образцов Mo-Si методом рентгеновской дифракции обнаружило отсутствие кристаллических фаз в пленках. При этом, по аморфному гало в области, где на рассчитанных дифрактограммах должны быть высокоинтенсивные рефлексы молибдена и силицидов молибдена, можно заключить, что фаза Mo₃Si, является аморфной.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10294, <https://rscf.ru/project/23-79-10294/>.

1. Banerjee A. et al. Characterisation of amorphous molybdenum silicide (MoSi) superconducting thin films and nanowires // Superconductor Science and Technology. 2017. Т. 30. №. 8. С. 084010.
2. Grotowski S. et al. Optimizing the growth conditions of superconducting MoSi thin films for single photon detection // Scientific Reports. 2025. Т. 15. №. 1. С. 2438.
3. Gridnev S. A. et al. Nonlinear phenomena in nano-and microheterogeneous systems // Moscow: Binom. 2012.
4. Nemoshkalenko V. V. et al. X-ray K β -and L_{2, 3}-emission bands of pure silicon and silicon in Mo/Si compounds // Physics Letters A. 1973. Т. 45. №. 5. С. 369-370.

Анализ фазового состава углеродных плёнок, синтезированных в среде чистого азота при пониженном рабочем давлении

А.А. Посыпаев^{1,2}, В.В. Недёркин¹, Е.И. Шемченко¹

¹ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Донецк

²ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Донецк

УДК: 538.9, 621.793, 535.34

Наноструктурные углеродные плёнки представляют значительный интерес благодаря сочетанию уникальных свойств углерода и квантово-размерных эффектов, что обеспечивает расширенные эксплуатационные характеристики по сравнению с традиционными материалами. Разнообразие собственных свойств определяется соотношением sp^2 - и sp^3 -структурных фрагментов, однако зависимости между структурой плёнок и параметрами их получения до конца не установлены, что обуславливает актуальность разработки методов реконструкции их наноструктуры [1-4].

Синтез образцов осуществляли при помощи ДС-магнетронного распыления графитовой мишени в атмосфере азота при напряжении разряда ~ 425 В, рабочем давлении 36–50 мТорр и токе магнетрона 45–63 мА. Время осаждения составляло 1 час. Методами ИК-спектроскопии были получены спектры поглощения полученных плёнок.

Целью исследования являлось выявление зависимости между режимами осаждения, в частности величиной тока магнетрона, и формированием фазового состава в плёнках. Анализ спектров поглощения, выполненный с применением гауссовой деконволюции, показал наличие набора связей, характерных для аморфных гидрогенизированных углеродно-азотных плёнок (a-CN:H), включая C–N, C=N, C \equiv N, C–H и N–H. Присутствие водорода, несмотря на отсутствие его в газовой среде осаждения, обусловлено загрязнением вакуумной камеры остаточными парами масла диффузионного насоса. Выявлено влияние тока магнетрона на фазовый состав. При увеличении тока до 56–57 мА и 62–63 мА фиксируется формирование алмазоподобной sp^3 -CH фазы с долей 26,43% и 13,74% соответственно, тогда как при меньших значениях тока (45–47 мА) данная фаза не обнаружена. Одновременно наблюдаются существенные изменения концентраций других типов связей (C=N, C \equiv N, N–H), что свидетельствует о нелинейном характере влияния параметров разряда на структурообразование.

Установлено, что для обеспечения воспроизводимости состава плёнок необходима дополнительная очистка вакуумного объёма от масляных загрязнений. Показано, что все образцы относятся к классу a-CN:H плёнок. При этом обнаружено, что увеличение тока магнетрона способствует формированию в плёнках алмазоподобной sp^3 -фазы углерода.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Проекта по созданию молодёжных лабораторий и государственного задания FREZ-2024-0001.

1. Robertson J., O'Reilly E.P. Electronic and atomic structure of amorphous carbon // Phys. Rev. B. 1987. Т. 35, № 6. С. 2946-2957.
2. Ivanov-Omskii V.I., Lodygin A.B., Sitnikova A.A., Suvorova A.A., Yastrebov S.G. Diamond nanocrystals in hydrogenated amorphous carbon grown by ion sputtering of graphite // Philos. Mag. B. 1997. Т. 76, № 6. С. 973-978.
3. Kauppinen J.K., Moffatt D.J., Mantsch H.H., Cameron D.G. Fourier self-deconvolution: a method for resolving intrinsically overlapped bands // Applied Spectroscopy. 1981. Т. 35, № 3. С. 271–276.
4. Шемченко Е.И., Лихтенштейн И.Я. Некоторые особенности морфологии поверхности наноструктурных пленок нитрида углерода, легированных оксидом европия // ФТВД. 2019. Т. 29, № 2. С. 63.

***Ab initio* моделирование электронной структуры $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$**

Г.П. Потуданский, Е.С. Керсновский

Воронежский государственный университет, Воронеж

УДК:538.9

Фаза $\epsilon\text{-Cu}_{15}\text{Si}_4$ представляет практический интерес для задач, связанных с реакцией и диффузией в системе Cu/Si, поскольку при взаимодействии меди с кремнием в тонкоплёночных структурах наблюдается образование силицидных фаз, включая $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$ (ϵ). Так, для системы Cu/(001)Si сообщается, что при реакционном взаимодействии формируются аморфная фаза, Cu_3Si (η'') и $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$ (ϵ) [1]. Кроме того, в работе по диффузии и интерфейсной реакции в плёнках Cu/Si(100) показано, что при повышении температуры отжига изменяется вклад Cu в силициде и в результате формируется $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$ [2]. Одновременно экспериментальное исследование фазовой диаграммы Cu–Si при $x(\text{Cu}) > 0.72$ указывает, что $\epsilon\text{-(Cu}_{15}\text{Si}_4)$ термодинамически стабильна, но кинетически затруднена из-за сложностей зародышеобразования [3], т.е. в прикладных структурах Cu/Si появление/отсутствие ϵ -фазы может определяться не только равновесием, но и кинетикой. В этой связи расчёты зонной структуры и плотности электронных состояний (DOS) $\epsilon\text{-Cu}_{15}\text{Si}_4$ актуальны как инструмент, позволяющий связать экспериментально наблюдаемое образование ϵ -фазы в Cu/Si структурах [1,2] с её электронным строением (металличность, распределение состояний Cu-3d и Si-p в валентной зоне и вблизи уровня Ферми).

В настоящей работе представлены результаты компьютерного моделирования электронной структуры $\epsilon\text{-Cu}_{15}\text{Si}_4$ - зонная структура (Band Structure) и плотности электронных состояний (DOS). Расчёты проводились в рамках теории функционала плотности (DFT) в программном пакете WIEN2k, реализующем полнопотенциальный метод линейаризованных присоединённых плоских волн (FP-LAPW) при использовании обменно-корреляционного функционала в приближении обобщенной градиентной аппроксимации (GGA-PBE).

Анализ зонной структуры показывает, что структура не обладает магнитным моментом и не имеет запрещенной зоны, а ширина валентной зоны составляет 11.8 эВ, минимум которой находится в точке Γ первой зоны Бриллюэна.

Анализ парциальных DOS для основного состояния фазы $\epsilon\text{-Cu}_{15}\text{Si}_4$ показывает, что основной вклад в формирование валентной зоны дают d -состояния меди, локализованные в интервале от -7.2 эВ до 1.1 эВ относительно уровня Ферми. s -состояния кремния локализованы преимущественно при энергиях от -11.8 эВ до -9.2 эВ относительно уровня Ферми.

Расчитанный XES Si $L_{2,3}$ показывает, что спектр имеет один главный максимум при энергии -9.5эВ и два локальных, при энергиях -3,6 эВ и -1 эВ относительно уровня Ферми.

Таким образом, расчёты XES Si $L_{2,3}$, зонной структуры и DOS для $\epsilon\text{-Cu}_{15}\text{Si}_4$ обеспечивают спектрально-электронные критерии, позволяющие интерпретировать экспериментальные спектры и надёжно идентифицировать ϵ -фазу в реальных Cu/Si структурах, где она экспериментально наблюдается как продукт интерфейсных реакций и диффузии [1,2] и где её появление может зависеть от кинетики формирования [3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10294.

1. Echigoya J., Enoki H., Satoh T., Waki T., Ohmi T., Otsuki M., Shibata T. Thin film reaction and interface structure of Cu on Si // Applied surface science. 1992. Т. 56. С. 463-468
2. Gao X. X., Jia Y. H., Li G. P. Diffusion and Interface Reaction of Cu/Si (100) Films Prepared by Cluster Beam Deposition // Chinese Physics Letters. 2011. Т. 28. №. 3. С. 03360.
3. Sufryd K., Ponweiser N., Riani P., Richter K.W., Cacciamani G., Experimental investigation of the Cu–Si phase diagram at $x(\text{Cu}) > 0.72$ // Intermetallics. 2011. Т. 19. №. 10. С. 1479-1488.

Исследование одно- и двухслойных образцов высокотемпературных сверхпроводников на основе ReBCO

*И.И. Преображенский, С.В. Шавкин
НИЦ «Курчатовский институт», Москва*

УДК: 538.9

Коммерческие провода на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) являются тонкими многослойными лентами с шириной 4 или 12 мм. Архитектура слоев может варьироваться, но обычно состоит из металлической ленты-подложки, оксидные буферные слои, ВТСП слой (оксидная керамика состава $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (ReBCO), где Re – редкоземельный элемент), защитные серебряное и медное покрытия. В основном, в производстве ВТСП второго поколения слой сверхпроводника наносят с использованием метода импульсного лазерного напыления (Pulsed Laser Deposition – PLD), который позволяет добиться воспроизводимых результатов. Для увеличения значений критического тока стремятся увеличить толщину ВТСП слоя, однако при увеличении толщины ВТСП слоя выше определенных значений критический ток начинает уменьшаться, что связано с нарушением структуры ВТСП. Бороться с этим явлением можно либо за счет подбора параметров нанесения, либо при введении различных слоев в матрицу ВТСП. Целью данной работы стало получение многослойных ВТСП лент состава ReBCO и оценка влияния состава ВТСП слоя на токовые характеристики.

Для исследования на экспериментальной технологической линии в НИЦ «Курчатовский институт» методом ABAD/PLD получали ВТСП ленты шириной 4 мм. Состав ВТСП слоя включал $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (YBCO) и $\text{Sm/DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ((Sm/Dy)BCO), которые наносили при распылении керамических мишеней методом PLD. Микроструктуру полученных образцов исследовали на растровом электронном микроскопе. Фазовый состав полученных образцов ВТСП был исследован с помощью автоматизированного дифрактометра Rigaku smartLAB с вращающимся медным анодом. Значения критического тока были определены из данных холловской магнитометрии.

Были получены одно- (YBCO или Sm/DyBCO) и двухслойные (чередование слоев YBCO и Sm/DyBCO) образцы ВТСП лент. Толщина ВТСП слоя для полученных образцов составляла 2 мкм, что часто является оптимальным для ВТСП материалов. Полученная методика позволила получить образцы с равномерным распределением тока по длине, которые могут быть перспективны в дальнейшем при разработке реактора для термоядерного синтеза.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Программное обеспечение для автоматизации установок физики конденсированного состояния РК ПИК

К.А. Пшеничный, В.А. Поляков

НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

УДК: 004.4, 538.9

В рамках строительства исследовательских станций, физики конденсированного состояния, РК ПИК на площадке ПИЯФ НИЦ КИ в качестве «технологического стека» программного обеспечения автоматизации было принято решение выбрать фреймворк Tango-Controls и систему Nicos [1]. Эти решения в настоящее время успешно внедряются и апробируются.

Структура программного обеспечения условно разделяется на три уровня иерархии. На первом - «низком» уровне происходит непосредственное управление устройствами как независимыми единицами. На втором - «среднем» уровне организуется работа SCADA системы при помощи фреймворка Tango-Controls. При помощи данного фреймворка создаются tango-device сервера, которые регистрируются в базе данных tango-database. Это программы, которые, с одной стороны, работают с устройствами (отправляют аппаратно-зависимые команды устройствам, получают ответ), с другой стороны, сами управляются при помощи «tango://» протокола. При этом tango-device сервера могут взаимодействовать между собой, отработывая, например, некоторые события или создавая программные блокировки в зависимости от условий. Третий - «высокий» уровень — пользовательский. На этом уровне работает система управления экспериментом Nicos [2], которая поддерживает tango-протокол, имеет клиент-серверную архитектуру. Пользователь может алгоритмизировать проведение эксперимента (управляя такими параметрами как температура, магнитное поле, положение осей и т.д.) в зависимости от научной задачи, и довольно гибко менять алгоритм в случае изменения условий эксперимента.

В ходе унификации аппаратного обеспечения на всех приборах физики конденсированного состояния было принято решение использовать один тип контроллеров автоматизированной системы управления. В рамках программы импортозамещения были выбраны контроллеры SD0100, драйверы движения серии SD и модули ввода/вывода (фирма ООО «Вип Технологии», г. Нижний Новгород). Преимуществом данного решения является аппаратная поддержка «tango://» протокола. В головном модуле контроллеров данной серии встроено одноплатный компьютер с архитектурой ARM, на котором располагаются необходимые tango-device сервера.

Для отработки работы программного обеспечения и тестирования отдельных узлов и элементов научных станций создан испытательный стенд. С помощью испытательного стенда можно тестировать все столы трансляции (поворотные столы, столы линейных перемещений, гониометры и т.д.) и другие системы научных станций (детекторные системы, пневматические системы, вакуумные системы).

Благодаря открытому исходному коду системы Nicos в неё интегрирована работа с программным пакетом McStas, который используется для математического моделирования нейтронных станций методом Монте-Карло. Такая интеграция позволит в будущем создавать цифровые двойники научных станций, которые в свою очередь позволят создавать учебные места для подготовки пользователей.

1. Официальный сайт фреймворка Tango-controls. URL: <https://www.tango-controls.org> (Дата обращения 9.05.2025)
2. Официальный сайт системы управления экспериментом «Nicos». URL: <https://nicos-controls.org> (Дата обращения 9.05.2025)

Измерение спин-волновой динамики в геликоидальных магнетиках с взаимодействием Дзялошинского-Мория методом малоуглового рассеяния нейтронов

К.А. Пшеничный, С.В. Григорьев

НИЦ «Курчатовский институт»- ПИЯФ, Гатчина

УДК: 538.9

Соединения $Fe_{1-x}Co_xSi$ и $Mn_{1-x}Fe_xSi$ представляют собой твердые растворы с кристаллической структурой типа B20. В этих соединениях ниже критической температуры T_c формируется несоизмеримая спиновая спираль с малым волновым вектором $k \ll 1/a_0$, где a_0 — постоянная решетки [1]. Появление такой магнитной структуры обусловлено антисимметричным обменным взаимодействием Дзялошинского-Мория (ДМ), связанным с отсутствием центра симметрии в расположении магнитных атомов марганца, железа и кобальта (модель Бака-Йенсена [2]). Согласно этой модели, спиральный порядок стабилизируется за счет ферромагнитного обменного взаимодействия и взаимодействия Дзялошинского-Мория. Волновой вектор определяется как $k = SD/A$, где A — жесткость спиновых волн, а D — константа взаимодействия Дзялошинского-Мория. С приложением магнитного поля формируется однодоменная коническая структура с $\mathbf{k} \parallel \mathbf{H}$, которая остается стабильной вплоть до критического поля H_{c2} , когда происходит переход из конического состояния в ферромагнитное. При этом $g\mu_B H_{c2} = Ak^2$ [3].

Методом малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов были экспериментально измерены волновой вектор спирали k , критическое поле H_{c2} и жесткость спиновых волн в широком температурном диапазоне для соединений $Mn_{1-x}Fe_xSi$ с $x = 0.0, 0.03, 0.06, 0.09$ [4,5], $Fe_{1-x}Co_xSi$ с $x = 0.25, 0.30, 0.50$ [6] и соединения Cu_2OSeO_3 [7]. Эксперименты показали, что модель Бака-Йенсена на количественном уровне хорошо описывает параметры системы во всем температурном диапазоне от 0 до критической температуры T_c . Установлено, что спин-волновая жесткость A слабо меняется с температурой для каждого отдельного соединения, оставаясь конечной величиной при T_c , что указывает на переход первого рода в упорядочение спиновой спирали. Жесткость спиновых волн A существенно изменяется с концентрацией x для соединений $Fe_{1-x}Co_xSi$ и $Mn_{1-x}Fe_xSi$. В докладе представлены зависимости $A(x)$ и дана интерпретация нетривиального поведения, согласующаяся с моделью Бака-Йенсена [2,3].

1. Григорьев С. и др. Нецентросимметричные кубические геликоидальные ферромагнетики $Mn_{1-y}Fe_ySi$ и $Fe_{1-x}Co_xSi$ // Физика твердого тела. 2010. Т. 52. No 5. С. 852.
2. Bak P., Jensen M.H. Theory of helical magnetic structures and phase transitions in MnSi and FeGe // J. Phys. C: Solid State Phys. 1980. V. 13. P. L881.
3. Maleyev S.V. Cubic magnets with dzyaloshinskii-moriya interaction at low temperature // Phys. Rev. B. 2006. V. 73. P. 174402.
4. Grigoriev S.V., Sukhanov A.S., Altynbaev E.V., Siegfried S.-A., Heinemann A., Kizhe P., Maleyev S.V. Spin waves in full-polarized state of Dzyaloshinskii-Moriya helimagnets: Small-angle neutron scattering study // Phys. Rev. B. 2015. V. 92. P. 220415(R).
5. Grigoriev S.V., Altynbaev E.V., Siegfried S.-A., Pschenichnyi K.A., Menzel D., Heinemann A., Chaboussant G. Spin-wave stiffness in the Dzyaloshinskii-Moriya helimagnets // Phys. Rev. B. 2018. V. 97. P. 024409.
6. Grigoriev S.V., Pschenichnyi K.A., Altynbaev E.V., Siegfried S.-A., Heinemann A., Honnecker D., Menzel D. Spin-wave stiffness of the Dzyaloshinskii-Moriya helimagnet compounds studied by small-angle neutron scattering // Phys. Rev. B. 2019. V. 100. P. 094409
7. Grigoriev S.V., Pschenichnyi K.A., Altynbaev E.V., Heinemann A., Magrez A. Spin-wave stiffness in the Dzyaloshinskii-Moriya helimagnet with ferrimagnetic ordering // Phys. Rev. B. 2019. V. 99. P. 054427.

Получение полупроводниковых пленок CdTe методами электрохимического осаждения

П.В. Резникова, И.М. Долуденко, И.С. Волчков, В.М. Каневский

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва

УДК: 546.05; 546.06; 620.3; 621.315.592.9, 538.9

Теллурид кадмия (CdTe) используется во многих областях науки и техники, в том числе широкое применение находит в солнечной энергетике. Использование CdTe в качестве элементов солнечной энергетике возможно за счет свойств материала, а именно ширины запрещенной зоны (≈ 1.45 эВ [1]), а также за счет электрических свойств в широком диапазоне ($\approx 1 - 1 \cdot 10^9$ Ом·см).

Однако получение материалов на его основе является технологически сложным, а функциональные устройства на их основе имеют относительно малую эффективность. В связи с этим интерес представляют упрощенные технологии получения и переход на низкоразмерные материалы, для увеличения эффективной площади поверхности. Целью данной работы являлась отработка методов электрохимического осаждения CdTe на плоскую поверхность, для дальнейшего использования в получении наноструктур широкой номенклатуры.

В работе проводилось исследование с использованием ряда электролитов с разным соотношением ионов Cd^{+2} и Te^{+4} , которые достигались путем изменения концентрации сернистого кадмия в электролите. За основу для электролита был взят концентрированный раствор HCl. Итоговая концентрация солей кадмия составляла 50/100/150/200 г/л с добавлением 5 г/л TeO_2 . Для определения необходимых потенциалов осаждения были получены поляризационные кривые процессов осаждения для электролита с наибольшей концентрацией соли Cd. Данное исследование и последующее электрохимическое осаждение проводилось по двухэлектродной схеме с применением нерастворимого угольного анода. Был выбран потенциал на ячейке равный 2 В.

Полученные образцы были изучены методами рентгенофазового анализа, растровой электронной микроскопии, энерго-дисперсионной спектроскопии. Также проводился анализ электрических свойств полученных образцов с определением их фоточувствительности.

Электронная микроскопия полученных пленок показала высокоразвитую зереную структуру с большими перепадами высот. Элементный анализ показал, что соотношение исследуемых атомов в осадке изменяется пропорционально изменению концентрации Cd^{+2} и составляло 40/60; 47/53; 84/16; 94/6 ат.% Cd/Te, соответственно.

Рентгенофазовый анализ показал наличие пиков CdTe на всех образцах, однако, все образцы включали также и пики чистого Cd и Te. С увеличением концентрации Cd интенсивность пиков CdTe снижалась.

Исследование электрических свойств проводилось методом записи вольт-амперных характеристик (ВАХ) при двухконтактном подключении. Показано, что образцы с концентрацией Cd 47 ат.% и выше обладают низким сопротивлением и не проявляют полупроводниковые свойства. Образец с концентрацией Cd 40 ат.% показал зависимость тока от напряжения при темновом измерении ВАХ, характерную для полупроводников. При проведении измерения ВАХ с облучением образца электромагнитными волнами видимого диапазона среднее сопротивление данного образца снизилось. Это говорит о фоточувствительности полученного осадка.

Результаты работы говорят о возможности применения разработанной методики для получения пленок CdTe и, впоследствии, наноструктур на их основе электрохимическим методом, а полученный материал будет обладать явными фоточувствительными свойствами, что позволит применять его в качестве элементов солнечной энергетике и сенсорики.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИИЦ «Курчатовский институт».

1. Oluyamo S.S. et al., Tunability of conductivity type and energy band gap of CdTe thin film in the electrodeposition technique // Materials Today: Proceedings. 2021. V. 28. No. 2. P. 558–563.

**Прецизионное определение элементного состава сложных образцов
рентген-флуоресцентным методом**

Д.А. Румянцева¹, В.Г. Зиновьев¹, Лю Дэжуй^{1,2}, И.А. Митропольский¹

¹НИИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

УДК: 539.1.06/621.039.8

Рентген-флуоресцентный анализ (РФА) обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с другими методами определения элементного состава вещества, это, в первую очередь, возможность проведения элементного анализа без учета агрегатного состояния и вида химического соединения образца. РФА отличается высокой чувствительностью или низким порогом определения содержания элементов, но сравнительно высокой погрешностью, обычно не меньше 5%. Развитие методик РФА направлено, в основном, на увеличение точности измерений.

Оригинальный РФА спектрометр с радиоизотопным источником на базе ^{109}Cd обладает рядом преимуществ по сравнению со спектрометрами, использующими рентгеновские трубки. Источник, отличаясь своей стабильностью, надежностью и портативностью, обеспечивает выход излучения порядка $10^7 - 10^8$ квант/с и выше, достаточный для решения широкого круга аналитических задач. Для регистрации вторичного излучения используется HPGe детектор с рабочей площадью 30 мм^2 , его энергетическое разрешение на линии $K\alpha(\text{Fe})$ с энергией $6,4 \text{ кэВ} - 200 \text{ эВ}$ [1]. При определении содержания элементов использовался прямой способ внешнего стандарта, связывающий концентрацию искомого элемента с интенсивностью характеристического рентгеновского излучения. Повышение чувствительности этого метода связано с учетом поправок на поглощение.

В докладе приводятся результаты РФА содержания 3d-металлов и лантаноидов в эндофуллеренах, наноалмазах, наноструктурных образцах на основе оксида меди, которые используются для контроля технологии их синтеза. Так, например, при анализе примесных элементов в образцах наноалмазов обнаружено содержание Ni с концентрацией от 0.08 до 0.51%, Cu – от 0.03 до 0.15%, Zr – 0.0014%, Eu – от 0.004 до 0.008% с относительными погрешностями, не превышающими 10%.

Содержание металлов в нейтронных суперзеркалах с лучшими поляризуемыми свойствами: Fe - 0.21(1)%; Co - 0.54(3)%; Ti - 0.72(3)%; Zr - 0.114(3)%. Эти результаты позволили установить относительное содержание металлов в слоях суперзеркала: Fe/Co - 28/72 и Ti/Zr - 86/14, с погрешностью менее 1%.

1. Зиновьев В.Г. и др. РФ-спектрометр с радиоизотопным источником // Препринт ПИЯФ №3079. 2025. 28 с.

Додекагональные квазикристаллические мозаики как среднее от двух периодических гексагональных решеток

Д.А. Рыжикова, С.Б. Рошаль

Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону

УДК: 538.911

Додекагональные квазикристаллические мозаики распространены в двумерных системах мягкой материи и обычно объясняются компромиссом между стремлениями к плотной упаковке и максимальности конфигурационной энтропии [1]. В работе предложена новая интерпретация, в основе которой лежит представление о квазикристаллической упаковке как о результате усреднения двух идентичных гексагональных периодических решеток, повернутых друг относительно друга на 30° .

В предлагаемой модели узлы мозаики лежат посередине узлов двух рассматриваемых решеток. Чтобы отбирать соответствующие пары узлов мы вводим так называемую область принятия (ОП), ограничивающую вектор расстояния от узла мозаики до узла одной из решеток. Варьируя форму и размер ОП, мы получаем различные известные типы додекагональных мозаик, включая структуры с квадратными, треугольными элементами и дополнительными плитками — щитами или ромбами.

Относительное смещение гексагональных решеток соответствует голдстоуновским степеням свободы системы и ведет к переключению позиций, что объясняет конфигурационную энтропию получаемых мозаик. Малые деформации одной решетки относительно другой снижают симметрию мозаики, например, относительное вращение решеток ведет к мозаике с симметрией C_{6v} . Всего возможно 4 подобных неприводимых относительных деформации.

Таким образом додекагональный порядок может быть интерпретирован как среднее от двух несоразмерных гексагональных порядков. Предложенный подход даёт наглядную геометрическую модель, объясняющую структурную универсальность додекагональных мозаик в системах мягкой материи и связывающую их с наблюдаемыми фазами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-12-00105-П.

1. Dotera T. Quasicrystals in soft matter // *Isr. J. Chem.* 2011. V. 51. P. 1197.

Исследование магнитооптического отклика коллоидных систем на основе наночастиц гексаферрита стронция

А.А. Семина¹, А.А. Елисеев²

¹Факультет наук о материалах МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

²Химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

УДК: 538.955, 538.958, 546.05, 546.02

Гексаферриты, или гексагональные ферриты М-типа, $XFe_{12}O_{19}$ (где $X = Ba, Sr, Pb$) являются широко известными магнитными материалами [1]. Пластинчатые наночастицы гексаферрита стронция, легированного алюминием, формируют стабильные коллоидные растворы [2], демонстрирующие сильный магнитооптический отклик [3]. Наличие этого эффекта обуславливает возможность различных высокотехнологичных применений этих объектов. В связи с этим представляет интерес постсинтетическая обработка исследуемых коллоидных растворов для контроля их магнитооптических характеристик. Таким образом, целью данной работы стало исследование магнитооптического отклика коллоидных систем на основе наночастиц гексаферрита стронция, покрытых диоксидом кремния, с добавлением оксида графена (ОГ).

Наночастицы гексаферрита стронция $SrFe_{12-x}Al_xO_{19}$ были получены в составе боратной стеклокерамики, отожженной при температуре 700 °С. Далее наночастицы были выделены из боратной матрицы путем циклической обработки 3 % HCl и диспергированы в воде с образованием стабильного коллоидного раствора с pH = 2. Данный коллоидный раствор смешивался с коллоидным раствором ОГ (pH = 2) в различных соотношениях, однако полученные системы не демонстрировали коллоидную стабильность.

Для повышения коллоидной устойчивости новые системы были получены при pH = 7. Для обеспечения коллоидной стабильности наночастиц гексаферрита в данных условиях было произведено покрытие их тонким слоем диоксида кремния методом кислотного гидролиза силиката натрия. На основе модифицированных наночастиц были получены системы с ОГ в различных массовых соотношениях $SrFe_{12-x}Al_xO_{19} : ОГ = 1:1, 3:1$ и $7:1$. Было показано, что наличие ОГ повышает коллоидную устойчивость наночастиц, покрытых SiO_2 : чем больше в системе ОГ, тем выше стабильность.

С целью изучения магнитооптических свойств полученных систем были проведены измерения временной зависимости оптической плотности коллоидных растворов при импульсном приложении магнитного поля. По результатам измерений были получены полевые зависимости относительной оптической плотности растворов при различных (параллельной и перпендикулярной) взаимных ориентациях светового пучка и вектора индукции магнитного поля.

Магнитооптический отклик коллоидных растворов на основе наночастиц, покрытых SiO_2 , ниже по модулю и быстрее достигает стационарного значения при увеличении поля в сравнении с таковым для немодифицированных частиц, что может быть обусловлено снижением фактора анизотропии. Для коллоидных систем, содержащих ОГ, магнитооптический отклик также меньше по модулю, что может быть обусловлено снижением вклада наночастиц гексаферрита в суммарную оптическую плотность коллоидных растворов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 23-073-10045.

Влияние интерслоя кремния на отражательную способность периодических многослойных структур Ni/Ti

В.В. Сидоров^{1,2}, Р.С. Плешков³, О.А. Кондратьев², П.С. Савченков^{2,1}

¹*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва*

²*Национальный исследовательский центр Курчатовский Институт, Москва*

³*Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород*

УДК: 53.083:53.088.9:004.9, 538.9

В работе исследовано влияние прослойки кремния на характеристики оптических элементов на основе периодических структур Ni/Ti. Известно, что в многослойных периодических структурах интердиффузия атомов приводит к увеличению переходных областей на границах между слоями. Это вызывает снижение коэффициента отражения, что математически учитывается посредством фактора Дебая-Уоллера. Внедрение дополнительных слоев из материалов с промежуточным значением плотности длины рассеяния, например Si, позволяет уменьшить ширину переходной области и улучшить качество интерфейсов.

С использованием методов численного моделирования были рассчитаны параметры структур Ni/Ti и Ni/Si/Ti, состоящих из 90 периодов с толщиной около 100 Å. Расчеты показали возможность подбора такой оптимальной толщины слоя кремния, при которой введение третьего компонента в структуру не приводит к снижению ее отражательной способности.

Для экспериментальной верификации результатов моделирования были изготовлены тестовые образцы периодических структур Ni/Ti и Ni/Si/Ti методом магнетронного напыления. Для полученных образцов были сняты кривые рентгеновской рефлектометрии. Путем решения обратной задачи рассеяния были восстановлены реальные структурные характеристики образцов и построены профили плотности длины рассеяния. Анализ полученных профилей подтвердил, что внедрение тонкого интерслоя кремния на границы раздела приводит к улучшению контраста профиля ядерной плотности длины рассеяния многослойной структуры, что находится в соответствии с теоретическими расчетами. Таким образом, экспериментально установлено, что модификация границ кремнием является эффективным способом повышения качества интерфейсов без снижения отражательной способности структуры.

Биосовместимые люминесцирующие наноконпозиты на основе бактериальной целлюлозы и аморфного диоксида циркония, содержащего Eu^{3+}

Р.Ю. Смыслов^{1,2}, Ю.Е. Горшкова³, Н.Н. Губанова¹, Г.П. Копица¹, А.К. Хрипунов², А.В. Мигунова⁴

¹НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

²НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИВС, Санкт-Петербург

³Объединённый институт ядерных исследований, Дубна

⁴Санкт-петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

УДК: 678, 538.9

В настоящее время перед науками о материалах стоят задачи, связанные с получением наноконпозитов для новейших медицинских технологий. Одна из таких технологий – создание современных имплантатов для осуществления органосохраняющих операций, например, в онкоортопедии при лечении остеосарком. Таким образом, в задачу представляемой работы входило изучение мезоструктуры биосовместимого люминесцирующего наноконпозиционного материала на основе целлюлозы, синтезируемой штаммом *Komagataeibacter (Gluconacetobacter) Rhaeticus* CALU-1629 и аморфного диоксида циркония.

К важнейшим задачам при создании органо-неорганических конпозитов с использованием полимерных матриц относится определение надмолекулярной структуры (НМС) материала. Надёжным структурным методом для разрешения НМС является малоугловое рассеяние. Данные по малоугловому рассеянию нейтронов (МУРН) получены в диапазоне от 0,03 до 0,3 Å^{-1} на установке YuMO (реактор ИБР-2, ОИЯИ). Качественный анализ кривых МУРН показал, что в диапазоне больших переданных импульсов выше 0,1 Å^{-1} наблюдают высокое некогерентное рассеяние водорода. Этот эффект не дает возможности проанализировать первый уровень иерархии в данной многокомпонентной органо-неорганической конпозиционной системе. С другой стороны, ранее показано [1], что в наноконпозитах на основе бактериальной целлюлозы можно наблюдать до трех уровней фрактальной иерархии, причем первый уровень имеет нижнюю масштабную границу около 10 Å . В связи с этим проведены эксперименты по малоугловому рассеянию (МУРН) на установке Xeuss 3.0 (ЛНФ, ОИЯИ). Для ряда наноконпозитов, содержащих ионы $\text{Eu}(\text{III})$, продемонстрирована люминесценция, характерная для этого редкоземельного элемента. В результате получен функциональный конпозиционный материал, потенциальные возможности которого связаны с применением в медицине.

1. Smyslov R.Y., Emel'yanov A.I., Ezbekova K.V., Korzhova S.A., Gorshkova Y.E., Khripunov A.K., Migunova A.V., Tsvigun N.V., Prozorova G.F., Veselova V.O. Composite Hydrogels Based on Bacterial Cellulose and Poly-1-vinyl-1,2,4-triazole/Phosphoric Acid: Supramolecular Structure as Studied by Small Angle Scattering // Biomimetics. 2023. V. 8. P. 520.

Калибровка радиометрического канала для неинвазивной термометрии биологических тканей в диапазоне 0,5–6 ГГц

В.Ю. Соломатина, Е.Е. Колесникова, Д.Л. Гусенков

*ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет),
Москва*

УДК: 53.082, 538.9

Тепловое микроволновое излучение биологических тканей в ближней зоне описывается модифицированным законом Рэлея–Джинса, где принимаемая мощность пропорциональна физической температуре и эффективности связи, зависящей от комплексной диэлектрической проницаемости среды. Глубина проникновения излучения обратно пропорциональна корню из произведения частоты и мнимой части диэлектрической проницаемости, что потенциально позволит настраивать зондирующую глубину [1].

Проведена калибровка радиометрического канала, включающего логарифмическую периодическую ультраширокополосную антенну, малошумящие усилители и цифровой детектор мощности. Калибровка выполнена методом двухтемпературной эталонной нагрузки на фантомах на основе водно-глицериновой смеси с контролируемой температурой (20,7-44,2 °С) и диэлектрическими свойствами, имитирующими мягкие ткани человека [2].

В ходе калибровки зарегистрирована устойчивая корреляция между температурой фантома и выходным сигналом радиометрического канала в обоих диапазонах. При измерениях на живом объекте выявлено превышение радиометрической температуры над поверхностной, измеренной инфракрасным пирометром: на частоте 933 МГц градиент составил 2,3-2,9 °С, на 5800 МГц - 0,8-1,4 °С. Это согласуется с физиологической моделью теплопередачи - более высокая температура в глубинных слоях обусловлена метаболической активностью мышечной ткани и перфузией, тогда как поверхностные слои охлаждаются за счёт конвекции [3]. Различие величины градиента между частотами отражает разную глубину зондирования: на 933 МГц излучение формируется преимущественно в мышечных слоях (глубина ~8-10 см), на 5800 МГц - в коже и подкожной клетчатке (глубина ~1,5-2 см).

Полученные калибровочные характеристики подтверждают работоспособность малошумящей схемотехники и обосновывают переход к этапу интеграции радиометрического канала с ультразвуковым датчиком. Погрешность восстановления температуры по калибровочной кривой составляет $\pm 0,9^\circ\text{C}$ в диапазоне 20-45 °С.

1. Исаев В. И. Дж. Рэлея и история открытия закона теплового излучения Рэлея-Джинса // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2019. № 2. С. 24–31.
2. Wu J., Liu J. Review of the Capacity to Accurately Detect the Temperature of Human Skin Tissue Using the Microwave Radiation Method // Biosensors. 2024. V. 14. No. 5. P. 221.
3. Laskari K., Siores E., Tektonidou M. G., Sfikakis P. P. Microwave Radiometry for the Diagnosis and Monitoring of Inflammatory Arthritis // Diagnostics. 2023. V. 13. No. 4. P. 609.

Синтез и исследование магнитотвердых наночастиц катион-замещенного гексаферрита М-типа и магнитных жидкостей на их основе

Ц. Ся¹, П.Е. Казин², А.А. Елисеев²

¹Факультет наук о материалах МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

²Химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

УДК: 538.955, 538.958, 546.05, 546.02

Данное исследование направлено на получение высококоэрцитивных наночастиц катион-замещенного гексаферрита М-типа методом кристаллизации оксидных стёкол с последующим выделением наночастиц из матрицы и формированием стабильных коллоидных растворов. При легировании хромом ($\text{SrFe}_{12-x}\text{Cr}_x\text{O}_{19}$, $x=2, 4, 6$ и 8) он успешно внедряется в структуру гексаферрита благодаря близкому к железу ионному радиусу. По данным РФА осадка установлено, что последний содержит единственную фазу – гексаферрит стронция. Это подтверждает, что коллоидные частицы также относятся к фазе гексаферрита. По данным магнитометрии коэрцитивная сила (H_c) коллоидных частиц увеличивается с ростом степени легирования ввиду снижения намагниченности насыщения (M_s) материала. Таким образом удается добиться рекордного для коллоидных частиц значения свыше 13 кЭ.

Перспективным направлением работы стало легирование 4f-элементами. Ионы металлов лантаноидов при замещении в позициях M^{2+} обеспечивают сжатие кристаллической решётки за счет меньшего ионного радиуса и, соответственно, рост константы магнитокристаллической анизотропии (K_1), что повышает H_c даже при низких степенях замещения. Методом кристаллизации стекла (состав $(25-y)\text{SrO} \cdot y/2\text{Eu}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{B}_2\text{O}_3$, $y=0-8$) были успешно получены коллоидные растворы гексаферрита. Уточнение структуры методом Ритвельда показало, что при $y < 3$ присутствует примесь ферригидрита, а далее при $y > 3$ образуется однофазный гексаферрит. Данные DLS и магнитных измерений указывают, что размер частиц соответствует однодоменной области. Коэрцитивная сила при $y < 3$ низкая ввиду наличия примесной фазы. При $y > 3$ влияние замещения Eu на K_1 настолько велико, что, несмотря на уменьшение размера частиц (с 244 нм при $y=1$ до 84 нм при $y=8$), H_c значительно возрастает.

Для полученных коллоидных растворов изучен магнитооптический отклик (МО), т.е. относительной оптической плотности, при параллельной и перпендикулярной ориентациях светового потока относительно вектора индукции магнитной поля. По мере роста поля МО возрастает и в больших полях выходит на насыщение. С ростом степени замещения Eu МО увеличивается, что вызвано как ростом доли целевой фазы гексаферрита, так и увеличением параметра анизотропии частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 23-73-10045.

Влияние допирования Cr на структурные и магнитные свойства редкоземельного ортоферрита $TmFeO_3$

К.Ю. Ткаченко^{1,2}, А.К. Овсяников¹, О.В. Усманов¹, К.Ю. Терентьев¹, Е.В. Василевич¹

¹НИИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

УДК: 538.911

Редкоземельный ортоферрит $TmFeO_3$, как и всё семейство ортоферритов $RFeO_3$ (R – редкоземельный элемент), является перспективным материалом во многих областях техники. Например, их используют в качестве сердечников трансформаторов микросхем, что упрощает технологию производства печатных плат. Отсутствие суммарного углового момента в ортоферритах приводит к ускорению динамики спинов на несколько порядков, что было продемонстрировано на $TmFeO_3$ [1,2]. Подобная технология позволяет применять данный тип соединений для быстрой записи и магнитного хранения данных. Тулиевый ортоферрит имеет температуру Нееля $T_N = 632$ К и ниже этой температуры имеет антиферромагнитное упорядочение, с чем и связано отсутствие суммарного углового момента. Понижение температуры в $TmFeO_3$ приводит к спин-переориентационному переходу (SR) из фазы $\Gamma_4(A_x F_y G_z)$ в фазу $\Gamma_2(C_x G_y F_z)$ при температуре $T_{SR} = 92$ К. Но проблематичным в использовании его делает низкая температура спин-переориентационного перехода. Замещение ионов Fe на Cr ($TmFe_{1-x}Cr_xO_3$) приводит к повышению температуры спин-переориентационного перехода [3], что делает их прикладное применение более осуществимым. Такое допирование оказывает заметное влияние на особенности магнитных, магнитоструктурных и других важнейших физических свойств.

В работе исследовалась серия образцов $TmFe_{1-x}Cr_xO_3$ ($x = 0.1; 0.2; 0.3; 0.4$). Эксперимент по дифракции рентгеновского излучения проводился на SmartLab Rigaku. Из рентгенодифракционных данных удалось уточнить кристаллическую структуру и искажения кислородных октаэдров при допировании Cr. Также на основании этих данных были построены карты электронной плотности. Был получен Мёссбауэровский спектр, демонстрирующий внутреннее магнитное упорядочение. Увеличение уровня допирования хромом в образцах приводит к появлению дополнительных секстетов в Мёссбауэровском спектре, что может являться свидетельством изменения окружения ионов железа вследствие допирования.

1. Gerrits et al., Ultrafast precessional magnetization reversal by picosecond magnetic field pulse shaping // Nature. 2002. V. 418. P.509 - 512.
2. Schumacher H.W. et al. Phase coherent precessional magnetization reversal in microscopic spin valve elements // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 90. P. 017201.
3. Shaykhutdinov K.A. et al. Controlling the Temperature of the Spin-Reorientation Transition in Orthoferrite Single Crystals // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2024. Vol. 165. N. 5. P. 685-699.

Кинетика роста Fe нанопроволок методом матричного синтеза и влияние побочных реакций на процесс электрохимического синтеза

Д.А. Улыбышев^{1,2}, И.М. Долуденко², Д.Р. Хайретдинова^{1,2}, В.М. Каневский²

¹ *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва*

² *НИЦ «Курчатовский институт», Москва*

УДК: 54.057, 546.72, 620.3, 544.653.1, 538.9

В современном мире активно развиваются методы получения наноматериалов. Одним из методов получения одномерных нанообъектов является метод матричного синтеза, основанный на электрохимическом заполнении трековых мембран. Однако прогнозирование роста подобных структур затруднено рядом факторов, таких как неоднородности самой матрицы, влияния конвекции, динамики диффузионного слоя и побочных процессов. Исследованию влияния последнего фактора на процесс роста нанопроволок (НП) из железа посвящена настоящая работа.

Рост гомогенных Fe НП проводился методом электрохимического осаждения в поры матриц на основе полимерных трековых мембран. В качестве матрицы использовались промышленные трековые мембраны из ПЭТФ (ОИЯИ, Дубна) с диаметром пор 65 нм и 100 нм.

На первом этапе работы для матриц каждого типа получались тестовые хроноамперограммы для определения временных интервалов, соответствующих этапам роста НП. Далее были получены контрольные образцы с различными временами роста, не превышающие время максимального заполнения.

Для установления характера влияния побочных процессов осаждения проводился расчет длин с использованием расчетной массы, плотности и площади пор. Масса Fe, осажденного внутри пор, определялась с использованием закона Фарадея для электролиза.

Для определения итогового выхода по току и оценки кинетики процесса роста серии образцов исследовались в поперечных срезах методом растровой электронной микроскопии. Полимерная матрица не стравливалась, чтобы минимизировать процесс окисления Fe НП.

Экспериментальные данные показали сильное несоответствие с теоретическими расчетами. Для экспериментальных данных прослеживается нелинейная периодическая зависимость длины от времени осаждения, в особенности это заметно в порах с диаметром 65 нм.

Предполагается, что это связано с процессом закупоривания пор водородом, выделяющемся при электрохимическом осаждении. Образующиеся пузырьки водорода препятствуют проникновению ионов металла, что подавляет диффузию и осаждение ионов в поровых каналах. При последующем выходе водородного пузыря из поры, в рабочую зону активно поступают ионы из диффузионного слоя, при этом их концентрация выше, чем в начальный момент времени из-за накопления их при образовании пузырька водорода. Различие между экспериментальными и расчетными длинами НП также свидетельствуют о изменяемом выходе по току во время роста. Средний выход по току для НП с диаметром 65 нм и 100 нм оказался равен соответственно 72 % и 84 %.

Полученные данные свидетельствуют о значительном влиянии побочных реакций на электрохимические процессы, происходящие в ограниченном объеме и, как следствие, на рост НП в целом. Исследование кинетики роста и характеристика процесса, описанного в работе, позволяет с высокой точностью учесть их при прогнозировании роста железосодержащих нанопроволок.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Рентгеновский и морфологический анализ пористого кремния, полученного электрохимическим травлением

Д.А. Услин, С.А. Нефедов, С.А. Турченик

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, Самара
УДК: 539.217.1, 938.9

Интерес к пористому кремнию (ПК) обусловлен, в частности, его развитой поверхностью и меньшим, чем для монокристаллического кремния, коэффициентом отражения. ПК имеет перспективу использования в микроэлектронике, в альтернативных источниках энергии [1], а также для солнечных батарей [2].

В работе исследовались структуры, полученные результате электролитического травления пластин монокристаллического кремния, легированного фосфором, с ориентацией {111} в растворе плавиковой кислоты и этилового спирта в соотношении 1:1 при плотности тока 15 mA/cm^2 в течение 10 минут. Морфология пористого слоя исследовалась в оптическом микроскопе Neophot 21 и с помощью РЭМ (Vega Tescan). Было установлено, что таким образом сформирован пористый слой толщиной от 17 до 60 мкм с типичной толщиной пор 2-7 мкм (рис. 1а). Ориентация пор почти нормальна поверхности исходной пластины (кристаллографическое направление [111]), а структура – столбчатая с ветвлением вглубь кристалла (рис. 1б).

При помощи рентгеновского дифрактометра ДРОН-2 на $\text{FeK}\alpha$ - излучении была проведена съемка отражения (111) от слоя ПК. Численный анализ линии методом аппроксимации [3] проводился с использованием в качестве стандарта линии (111) исходного монокристалла кремния. Наилучшее совпадение с экспериментальным профилем показала аппроксимация функцией Гаусса. Было установлено, что формирование пористого слоя дает уширение около 0.007° по шкале удвоенного брэгговского угла (полная ширина линии на полувысоте, рис. 1в).

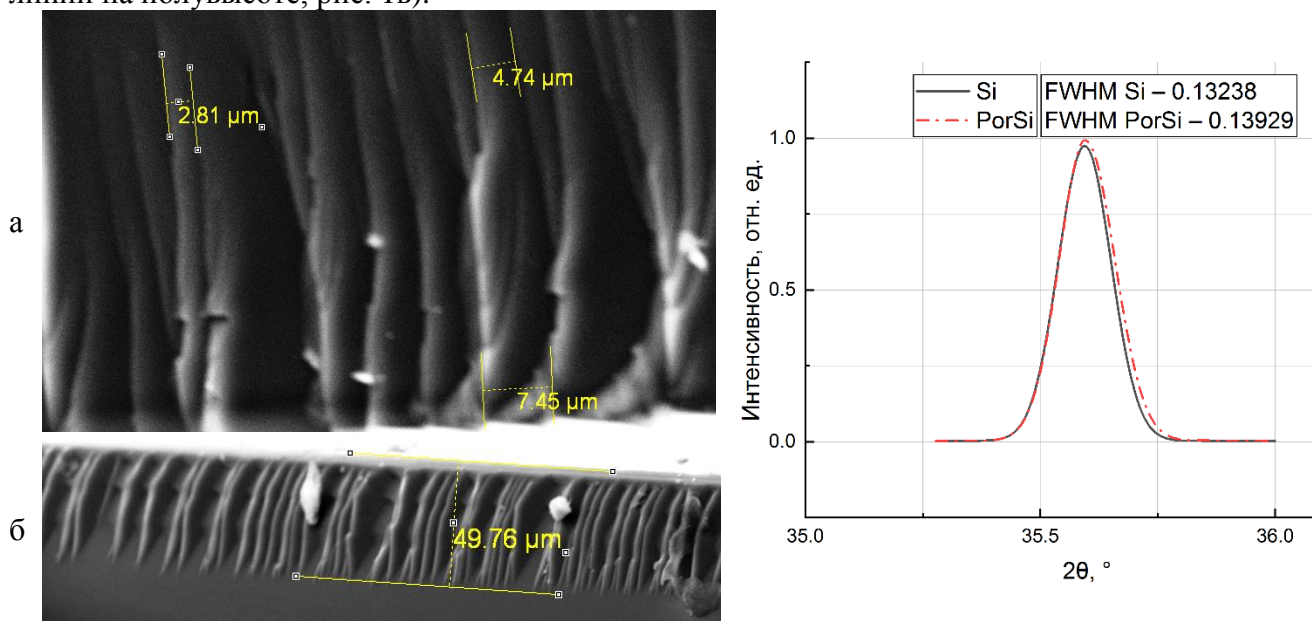


Рис. 1 Морфология слоя пористого кремния (а, б) и уширение линии брэгговского отражения (111) от слоя ПК по сравнению с линией исходного монокристалла кремния (в)

1. L. Canham. Handbook of Porous Silicon (Springer, С.Н., 2014) p. 733.
2. Дихинбаев К.К., Икрамова С.Б., Мырлазы Е.Б. и др. Солнечный элемент с покрытием из мульткристаллического пористого кремния // Новости науки Казахстана. 2023. № 2 (157). С. 6-12.
3. Фульц Б., Хау Дж. М. Просвечивающая электронная микроскопия и дифрактометрия материалов. — М.: Технофера, 2011. 904 с.

Влияние импульсного магнитного поля на диффузию олова в альфа-железе в интервале температур 730-830 °С

А.А. Федотов, С.В. Воронин

*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, Самара
УДК 539.219.3*

Воздействие импульсного магнитного поля (ИМП) способно в несколько крат как увеличивать, так и уменьшать коэффициент диффузии (КД) примеси в ферромагнитном растворителе [1, 2]. В частности, постановка ИМП с частотами от 1 до 21 Гц приводит к разнонаправленному изменению КД Al и Sn в α -Fe [1, 2], а также резкому увеличению КД Sn в α -Fe на частоте 13 Гц в интервале температур 730-830 °С. Исследование температурной зависимости КД Sn в α -Fe в условиях воздействия ИМП показало, что наиболее существенное увеличение КД наблюдается в парамагнитной области α -Fe вблизи точки Кюри при $T = 790$ °С [3]. В этой связи высказано предположение об уменьшении подвижности атомов немагнитной примеси в ферромагнитном растворителе в процессе намагничивания, которое подтверждается данными измерения КД Sn в α -Fe в ферромагнитной области температур $T = 730-750$ °С при воздействии ИМП с амплитудой напряженности $H = 39.8-78.6$ кА/м (0.5-1.0 кЭ) и частично объясняет увеличение КД Sn в α -Fe при воздействии ИМП в парамагнитной области. Согласно магнитострикционной модели [4], рассматривающей одномерное приближение, воздействие объемной магнитострикции может усиливать массоперенос вследствие увеличения межатомного расстояния, однако данный подход не применим к реальным металлическим системам, т.к. не учитывает изменение объема кристаллической решетки при расчете расстояния диффузионного скачка. В этой связи предложено уточнение к модели [4], рассматривающее влияние объемной магнитострикции на вакансионный механизм диффузии немагнитной примеси в ферромагнитном ОЦК-растворителе. Расчет потока атомов диффузанта согласно уточненной модели показал, что наибольшее увеличение КД происходит благодаря действию объемной магнитострикции, а магнитострикцией в основных кристаллографических направлениях ОЦК-решетки можно пренебречь. Предложенное уточнение магнитострикционной модели хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований влияния ИМП на диффузию Sn в α -Fe в интервале температур 730-830 °С.

1. Вержачковская М.А., Петров С.С., Покоев А.В. Гетеродиффузия Al в α -Fe в импульсном магнитном поле // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 22. С. 44–48.
2. Покоев А.В., Федотов А.А., Дивинский С.В. Магнитодиффузионный эффект в системе Fe-Sn в магнитном поле при 730 °С // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 12. С. 1689–1692; Pokoev A.V., Fedotov A.A., Divinskii S.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. № 12. P. 1529–1532.
3. Федотов А.А., Воронин С.В., Покоев А.В. Влияние импульсного магнитного поля на гетеродиффузию олова в альфа-железе в парамагнитной области температур // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. 2023. № 10. С. 83–87; Fedotov A.A., Voronin S.V., Pokoev A.V. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2023. V. 17. No. 5. P. 1116–1119.
4. Мазанко В.Ф., Покоев А.В., Миронов В.М. и др. Диффузионные процессы в металлах под действием магнитных полей и импульсных деформаций. М.: Машиностроение, 2006. Т. 2. 320 с.

Изучение особенностей кристаллического строения и спинового упорядочения

$\text{Li}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$

Н. С. Фокин, А. Е. Сулопарова, А. И. Курбаков
НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

УДК: 538.9

Соединения с общей формулой $\text{A}_2\text{M}_2\text{TeO}_6$ (где А- ион одновалентного металла; М – магнитный ион), относятся к классу слоистых оксидов, характеризующихся рядом уникальных кристаллических и магнитных свойств, имеют широкий спектр перспектив в применении в области электрохимии, аккумуляторных материалов, катализа [1-2] и многих других. В настоящей работе, методом нейтронной порошковой дифракции изучены кристаллическая структура и особенности магнитного упорядочения в двух слоистых оксидах стехиометрического состава $\text{Li}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$, полученных путём ионообменного синтеза из разных прекурсоров: $\text{Na}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$ и $\text{K}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$.

Серия экспериментов проводилась на нейтронном порошковом дифрактометре G4.1 (LLB, Сакле, Франция) в диапазоне температур 1.5-35 К с шагом 5 К. Длина волны монохроматического излучения составила 2.4283Å. Эксперимент выполнялся с использованием фокусирующего монохроматора на основе пирографита ($hkl = 002$). Обработка полученных экспериментальных данных осуществлялась с применением полнопрофильного анализа методом Ритвельда в программном пакете FullProf.

Оба образца, вне зависимости от прекурсора кристаллизуются в орторомбическую пространственную группу *Стса*, которая относится к типу Т2. У образца, полученного из $\text{Na}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$ обнаружено 13.6 вес. % второй фазы с той же стехиометрией $\text{Li}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$, более деформированной, с моноклинными искажениями, описываемой пространственной группой *C2/m*, тип структуры ОЗ. Согласно математической обработке NPD данных можно утверждать, что обе обнаруженные кристаллические фазы не существуют в отдельности, а могут рассматриваться как когерентно связанные структуры.

Особенностью магнитоактивных слоев является гексагональное (сотообразное) расположение магнитных ионов никеля, окруженных шестью ионами теллура, все в кислородном окружении. В программе BASIreps с использованием подхода базисных векторов неприводимых представлений предложены решения в виде магнитных структур на основании экспериментальных нейтронограмм, измеренных при $T = 1.5$ К. Показано, что магнитный порядок в литиевых сотовых слоистых теллуратах является трехмерным и принципиально отличается от спинового порядка в родственных составах с натрием и калием с большими ионными радиусами. В случае литиевого слоистого теллурата необходимо принимать в рассмотрение дополнительное магнитное взаимодействие между ближайшими соседними магнитными слоями. Такое взаимодействие приводит к совершенно другому типу магнитного порядка и представляет собой трехмерное AFM упорядочение магнитных ионов Ni в сотообразных *ab* плоскостях страйпового вида с направлением магнитных моментов, выходящих из сотовой плоскости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ, грант №24-12-00217.

1. Evstigneeva M.A., Nalbandyan V.B., Petrenko A.A., Medvedev B.S., Kataev A.A. A New Family of Fast Sodium Ion Conductors: $\text{Na}_2\text{M}_2\text{TeO}_6$ (M = Ni, Co, Zn, Mg) // Chem. Mater. 2011. V. 23. P. 1174.
2. Pu Y., Liu Y., Liu D. Zhou Z., Ding S., Xia Z., Li M. First-principles screening visible-light active delafossite ABO_2 structures for photocatalytic application // Int. J. Hydrogen Energy. 2018. V. 43, P. 17271-17282.

Фторполимеры на разных масштабных уровнях. Атлас

Ю.А. Фоменко, А.М. Николаев, О.А. Шилова

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИХС, Санкт-Петербург

УДК: 678.8, 538.9

Термостойкие материалы разрабатываются для обеспечения стабильных эксплуатационных характеристик в критических условиях эксплуатации. При длительном воздействии высоких температур, а также других агрессивных внешних факторов, сохранение эксплуатационных характеристик материалов — становится важной инженерной задачей, которую приходится решать для каждого вида термостойкого материала. Например, органосиликатные композиции (ОСК) обеспечивают сохранение диэлектрических характеристик покрытия после температурного воздействия вплоть до 350°C [1]. Один из приемов модификации композиций, введение в нее других полимерных материалов, обладающих необходимыми свойствами. Фторсодержащие полимеры, обладают рядом свойств, включая высокую термостойкость, гидрофобность и химическую инертностью поэтому являются перспективными материалами для модификации термостойких материалов на основе кремния.

Цель данной работы заключается в исследовании морфологии фторсодержащих полимеров на разных масштабных уровнях для оценки перспектив применения при модификации ОСК. Были исследованы образцы порошков основных марок фторсодержащих полимеров, изготовленные в АО «ГалоПолимер» [2] и ООО «Пластполимер» [3]. Исследование морфологии частиц порошка проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) при разных увеличениях. Работа выполнена с использованием оборудования:

- СС-66 (Китай) с ускоряющим напряжением 20 кВ и напылением углерода,
- Zeiss Merlin с катодом Шоттки без нанесения на поверхность частиц проводящих покрытий при низком ускоряющем напряжении (1 кВ).

Результаты исследования представлены в виде Атласа. Понимание морфологии частиц фторсодержащих полимеров на разных масштабных уровнях [4], важно для понимания процессов взаимодействия между компонентами системы и прогнозирования поведения материала в экстремальных условиях. Разнообразие форм и размеров частиц фторсодержащих полимеров, представленное в Атласе, свидетельствует о сложности строения частицы порошка даже в пределах одной марки, что имеет большое значение при выборе оптимальных условий подготовки порошков для модификации ОСК.

1. Органосиликатная композиция на основе лестничного полимера: пат. 2815887 Рос. Федерация. Шилова О. А., Хорошавина Ю.В., Соколов Г. С., Вошиков В. И., Глебова И. Б., Иванова А. Г., Полетаев К. А., Красильникова Л. Н. заявл. 03.07.2023; опубл. 25.03.2024 Бюл. № 9.

2. Специальные фторполимеры АО «ГалоПолимер» Источник: <https://halopolymer.ru/product/ftorpolimery/spetsialnye-ftorpolimery/>, свободный. – (дата обращения: 17.02.2026).

3. Способ получения сополимеров ТФЭ, сополимеры и изделия из них: пат. 2 721 602 Рос. Федерация. Просолупова Л.П., Подлеская Н.К., Смирнова Ю.А., Владер Н.Б., Иванов С.А. заявл. 13.08.2019; опубл. 21.05.2020 Бюл. № 15.

4. Фоменко Ю.А., Скобля Е.С., Михайловский В.Ю. О модели морфологической структуры полимеров // Кластер конференций VI Международная конференция по химии и химической технологии 20-24 сентября 2021 года Иваново. с. 285.

Магнитные и оптические свойства металл-полимерных композитов на основе нанопроволок системы FeCoCu

Д.Р. Хайретдинова^{1,2}, Д.А. Улыбышев^{1,2}, И.М. Долуденко², И.С. Волчков², Л.В. Панина^{1,3},
В.М. Каневский²

¹НИТУ «МИСИС», Москва

²Отделение «Институт кристаллографии имени А.В. Шубникова» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», Москва

³БФУ им И. Канта, Калининград

УДК: 537.622.4, 537.624.8, 669, 620.3, 538.9

Ферромагнитные нанопроволоки (НП) имеют широкий спектр потенциальных применений, включая их использование в качестве постоянных микромагнитов и функциональных материалов в электронике, спинтронике и медицине [1]. Хорошо известно, что магнитные свойства ферромагнитных бинарных сплавов на основе переходных металлов можно регулировать в широких пределах, варьируя соотношение элементов в непрерывном твёрдом растворе. Введение третьего элемента в достаточно стабильные бинарные системы может модифицировать их структурные и ферромагнитные характеристики. Изготовление ферромагнитных НП, содержащих Au или Ag, остаётся сложной задачей из-за ограничений, присущих процессу электрохимического осаждения. Практичной альтернативой Au или Ag является Cu, которая легко осаждается электрохимически и также демонстрирует плазмонный резонанс в широком спектральном диапазоне [2]. Более того, добавление Cu может влиять на магнитные свойства НП, например, изменяя их магнитокристаллическую анизотропию или создавая дополнительные центры пиннинга доменных стенок.

В работе исследованы FeCoCu НП с $d = 30$ нм, полученные электрохимическим осаждением в поры трековых ПЭТФ-мембран. Петли гистерезиса образцов получены методом вибрационной магнитометрии (ВМ). Оптическую плотность образцов измеряли в геометрии проходящего луча, при нормальных углах падения 0° и 79° . Диапазон длин волн составлял 500–1000 нм.

ВМ измерения НП показали присутствие значительной магнитной анизотропии, в основном обусловленной магнитной анизотропией формы. Сравнение с бинарными FeCo НП выявило увеличение H_c почти на 400 Э. Это может быть объяснено влиянием центров пиннинга на основе Cu на процессы перемагничивания в НП. Результаты угловых ВМ измерений показали, что НП демонстрируют выраженную ось легкого намагничивания, ориентированную в направлении ООР. Угловые зависимости H_c и M_r/M_s имеют колоколообразный профиль, характерный для вытянутых наночастиц с одноосной анизотропией. Наблюдаемые профили не могут быть полностью описаны классическими механизмами перемагничивания, характерными для таких наноструктур [3].

Результаты оптических измерений показали, что при повышенном содержании Cu в спектрах наблюдается пик, соответствующий плазмонному резонансу Cu, что указывает на возможность формирования плазмонных структур на основе НП.

Для улучшения плазмонных свойств предлагается использовать слоистые нанопроволоки FeCo/Cu. Кроме того, предполагается, что включение ферромагнитных слоёв FeCo позволит использовать такие структуры в магнитофототермических приложениях.

Работа по синтезу и первичной характеристизации образцов проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт». Магнитные и оптические измерения выполнены на базе НИТУ МИСИС и БФУ им. И. Канта при финансовой поддержке РФФ № 21-72-20158.

1. Moreno J.A. et al. Cylindrical Magnetic NWs Applications // IEEE Transactions on Magnetism. 2021. V. 57. No. 4. P. 800317.

2. Xin Y. et al. Copper-based plasmonic catalysis: recent advances and future perspectives // Advanced Materials. 2021. V. 33. No 32. P. 2008145.

Фурье-анализ EXAFS-спектров системы Au-Pt

Э. Ф. Хаметова¹, О. Р. Бакиева¹, В. В. Кривенцов²

¹Удмуртский ФИЦ УрО РАН, Ижевск

²ЦКП "СКИФ", Кольцово

УДК: 52-624, 538.9

Для создания материалов с заданными функциональными свойствами важно понимание их локального атомного строения. Одним из методов исследования локальной атомной структуры является метод EXAFS спектроскопии (Extended X-ray Absorption Fine Structure). Данный метод позволяет по экспериментальным спектрам определить количественные значения параметров локальной атомной структуры: межатомные расстояния, координационные числа, параметры тепловой дисперсии атомов.

Однако при исследовании сложных систем перед исследователем может возникнуть проблема анализа перекрывающихся EXAFS сигналов. Данная проблема возникает при исследовании материалов, в состав которых входят элементы с близким значением атомного номера, например, системы на основе Au-Pt. В данном случае в одном энергетическом диапазоне спектр будет содержать сумму нескольких волновых чисел, что делает невозможным применение метода Фурье-преобразования.

Целью настоящей работы является разработка метода анализа EXAFS данных, содержащих в одном диапазоне наложение нескольких сигналов на примере соединений Au-Pt. Данная система используется в каталитических процессах и знание локальной координации является критически важной информацией для синтеза наночастиц с заданными каталитическими свойствами. Проведено численное моделирование нормированных осцилляций $\chi(k)$ и получены соответствующие Фурье-образы и параметры локальной атомной структуры.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (регистрационный номер 124021900017-1). Использовалось оборудование ЦКП «Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий» УдмФИЦ УрО РАН.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН им. Борескова. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000" в ИЯФ СО РАН.

Восстановление концентрационных профилей тонких пленок TiO_x с учётом артефактов ионного травления

А.И. Чукавин, А.Н. Бельтюков, Р.Г. Валеев, Т.С. Карпанова

УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск

УДК: 538.9

Тонкие плёнки нестехиометрического оксида титана TiO_x представляют интерес благодаря возможности резистивного переключения и применения в мемристорах. В настоящей работе тонкие плёнки TiO_x были синтезированы магнетронным распылением в среде с содержанием кислорода 1–5%. Целью работы было определение их химического состава и построение глубинных концентрационных профилей методом РФЭС с ионным травлением. Основной проблемой подобного анализа является восстановление оксида на поверхности под действием ионного пучка, искажающее результаты. В работе предложена методика обработки спектров, позволяющая учесть влияние этого эффекта и восстановить истинный профиль [1]. Она основана на моделировании модифицированного слоя (SRIM) и сравнении спектров при разных углах эмиссии фотоэлектронов. Установлено, что поверхность всех пленок окислена до TiO_2 , однако в объеме с ростом содержания кислорода в плазме увеличивается доля Ti^{3+} и Ti^{2+} . Пленка, полученная при 1% O_2 , содержит металлический титан (Ti^0), а при 3% и 5% O_2 доминируют фазы Ti^{2+} и Ti^{3+} соответственно. Разработанный подход позволяет точно определять исходный состав пленок TiO_x для управления их функциональными свойствами в фотокатализе, электронике и сенсорике и может быть применен к другим оксидным системам, чувствительным к ионному травлению.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (регистрационный номер 124021900017-1). Использовалось оборудование ЦКП «Поверхность и новые материалы» УдмФИЦ УрО РАН.

1. Beltiukov A.N., et al. Double-angle x-ray photoelectron spectroscopy depth profiling of nonstoichiometric tiox thin films with resistive switching behavior // *ACS Applied Electronic Materials*. 2026. V. 8, no. 2. P. 774–782.

Оценка агрегации белков в магнитном поле

В.И. Шалгуев¹, И.А. Обухова², Н.Г. Соболева¹

¹НИИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

*²Санкт-Петербургский Государственный Лесотехнический Университет им. С. М. Кирова,
Санкт-Петербург*

УДК: 57.033, 538.9

В работе [1] был изучен процесс агрегации белков бычьего сывороточного альбумина (БСА), зеленого флуоресцентного белка (GFP), рибонуклеазы А (РНКазаА) под действием электрического поля. Для изучения были выбраны три белка различные по молекулярной массе: BSA (~69 кДа), GFP (~27 кДа) и RNaseA (~14 кДа); образование агрегатов анализировали методом динамического светорассеяния (ДРС). Были оценены пороговые параметры электроимпульса, при которых наблюдается агрегация белков – напряжение ($U \sim 400V$) и длительность ($\sim 100\mu s$).

Возникает вопрос: будет ли наблюдаться агрегация белков под воздействием магнитного поля? Для проверки этого предположения необходимо получить аналогичные препараты этих трех белков. Далее после воздействия на белки магнитным полем, создаваемым вибрационным магнитометром (3 Тл) [2], возможно оценить агрегацию этих трех белков методом ДСР, и сравнить с агрегацией этих белков в электрическом поле.

1. Соболева Н.Г., Ланда С.Б., Шалгуев В.И., Обухова И.А., Юнг И.А., Филатов М.В. Белки поразному устойчивы к воздействию электрического импульса.// Сборник научных трудов 4-й Международной конференции, посвященной 135-летию со дня рождения профессора В.В. Лебединского. 7–8 декабря 2023 года. Ч. 1., стр.225-233.
2. Вибрационный магнитометр, модель 3107 (VSM). Руководство пользователя. East Changing (Nanjing) Technology Company, КНР.

Моноионные магниты на основе легированных кобальтом германатов лантана и щелочноземельных металлов со структурой апатита

Т.З. Шарифуллин, З.А. Зайцев, А.В. Васильев, П.Е. Казин

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Химический факультет, Москва
УДК: 538.955, 546.03

Моноионные магниты (МИМ) – объекты атомного масштаба, способные при низких температурах проявлять свойства постоянных магнитов, обусловленные электронной структурой индивидуальных магнитных центров. Данные соединения могут использоваться в качестве кубитов квантовых компьютеров, элементов спинтроники и устройств сверхплотной записи информации. Обеспечение высоких функциональных характеристик МИМ требует внедрения магнитных ионов в кристаллографические позиции с высокой анизотропией окружения, что обеспечивает высокую магнитную одноосную анизотропию. Большая часть современных МИМ представляют собой координационные соединения, зачастую малоустойчивые по отношению к воздействию влаги, воздуха и свету. Альтернативным подходом является создание МИМ в матрицах устойчивых неорганических соединений. В частности, локализация магнитных ионов d-металлов, например, Co^{2+} , внутри тригональных каналов структуры апатита, а также магнитных ионов 4f-элементов, например, Dy^{3+} , в стенках этих каналов в позиции Ca(2) приводит к формированию атомных группировок $[\text{O-Co-O}]^{2-}$ и $[\text{Dy-O}]^+$, обладающих высокой анизотропией кристаллического поля, и, как следствие, магнитной анизотропией. Данные фрагменты демонстрируют свойства моноионных магнитов с высокими барьерами перемагничивания [1].

В рамках работы впервые были получены серии образцов кобальтсодержащих германатов лантана и щелочноземельных металлов со структурой апатита номинального состава $\text{La}_7\text{M}_3(\text{GeO}_4)_6\text{O}_2\text{Co}_x\text{H}_{1-2x}$, $\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}$, $x = 0, 0.04, 0.2, 0.4, 0.8$. Методами порошковой рентгеновской дифракции показано, что основной фазой во всех образцах является фаза германата со структурой апатита, при этом в образцах с малым содержанием Co наблюдаются примеси Ca_2GeO_4 и Sr_2GeO_4 , доля которых убывает с ростом содержания Co. Показано, что увеличение количества Co приводит к смещению фактического соотношения La/M в сторону соотношения $7/3$, что, вместе с уменьшением содержания примеси, указывает на стабилизацию фазы апатита с таким соотношением La/M. При этом удается уточнить положение атома Co внутри тригональных каналов структуры апатита. Методом спектроскопии комбинационного рассеяния показано наличие пика, соответствующего симметричным колебаниям группировки $[\text{O-Co-O}]$. Методами магнетометрии в постоянном поле показано, что все Co-содержащие образцы являются парамагнетиками, при этом часть Co, по-видимому, находится в антиферромагнитно связанном состоянии. Методами магнетометрии в переменных полях показано, что Co-содержащие образцы проявляют свойства МИМ в диапазоне температур 2-10 К. Барьеры перемагничивания данных образцов составляют около 50 см^{-1} , что сопоставимо со значениями, полученными для других Co-содержащих апатитов [1,2].

1. Zykin M. A., Babeshkin K.A., Magdysyuk O.V., Anokhin E.O., Schnelle W., Felser C., Jansen M., Kazin P.E. Slow Spin Relaxation in Dioxocobaltate(II) Anions Embedded in the Lattice of Calcium Hydroxyapatite // *Inorg. Chem.* 2017. V. 56. 14077–14083.
2. Sharifullin T.Z., Vasiliev A.V., Dinnebier R.E., Kremer R.K., Lyssenko K.A., Bezzubov S.I., Shuqi H., Shavrin I.O., Eliseev A.A., Tsybarenko D.M., Kazin P.E.. Dioxocobaltate(II)-anion in calcium vanadate apatite: partial ordering, magnetic anisotropy, and slow relaxation of magnetization // *Dalt. Trans.* 2025. V. 54. № 15. 6211-6223.

Получение и анализ высокочистого наноразмерного кварца из шунгитовых пород

Н.Д. Шарпарь^{1,2}, Н.Н. Рожкова¹

¹*ИГ Карельского научного центра РАН, Петрозаводск*

²*Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск*

УДК: 549.514.51, 620.3, 543.61, 538.9

Ввиду востребованности высокочистого кварца и ограниченности запаса используемых месторождений, поиск новых источников кварцевого сырья и методов его очистки является актуальной проблемой [1].

Кварц шунгитовых пород впервые использован для получения устойчивых дисперсий наночастиц (НЧ) кварца в воде, без использования поверхностно-активных веществ [2]. Структурные параметры полученных образцов наноразмерного кварца в пределах погрешностей сопоставимы с параметрами эталонных образцов низкотемпературного α -кварца. В образцах α -кварца шунгитов обнаружено уменьшение индекса кристалличности и размера кристаллитов при выделении НЧ из водной дисперсии. Особенностью данных НЧ является наличие на их поверхности графеподобного углерода. По данным динамического рассеяния света средний диаметр НЧ в дисперсии составляет 158 ± 90 нм. При этом определяются также фракции частиц меньшего размера. Кроме того, НЧ кварца шунгитовых пород биологически активны и обладают антибактериальным действием. Получены новые композиционные материалы на основе акрилового полимера и НЧ кварца шунгитовых пород. Композиция, позволяет формировать водостойкое покрытие, обладающее антибактериальным действием, которое может быть использовано при создании медицинских изделий. При введении НЧ происходит увеличение температуры окисления и деструкции полимера.

Важным вопросом остается количество примесей в структуре НЧ. Кварц шунгитовых пород характеризуется незначительным количеством примесей в природных образцах. Моделирование распределения Al, Na и Li в кристаллической решетке НЧ, показало возможное отсутствие данных элементов в структуре кварца, в связи с чем было высказано предположение, что углерод экранирует кварц от примесей [3].

Согласно данным, полученным с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) и атомно-эмиссионного спектрального анализа с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES), при выделении НЧ происходит уменьшение содержания большинства элементов-примесей. А результаты ICP-OES указывают на низкое содержание Al, Fe, Na и Li в НЧ кварца шунгитовых пород.

При удалении углерода с поверхности НЧ в процессе термообработки происходит агрегация частиц. При повторном переводе термически обработанных частиц в водную дисперсию происходит их оседание, что свидетельствует о стабилизирующей роли углерода [4].

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что НЧ кварца шунгитовых пород могут быть использованы для получения высокочистого наноразмерного кварца с учетом удаления углерода без использования термообработки.

Работа выполнена в рамках Госзадания КарНЦ РАН -FWME-0222-2019-0065.

1. Кузьмин Л. В. Высокочистые кварцевые концентраты. Применение в высокотехнологичной промышленности, современные требования к параметрам качества // Известия Уральского государственного горного университета. 2023. № 3 (71). С. 94-99.
2. Шарпарь Н.Д., Ковальчук А.А., Горюнов А.С., Екимова Т.А., Рожкова Н.Н. Исследование наноразмерного кварца шунгитовых пород // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 9. С. 102–113.
3. X-ray studies of vein quartz from shungite rocks / Y. L. Rigaeva, N. N. Rozhkova, A. Kovalchuk [et al.] // Key Engineering Materials. 2020. Vol. 854 KEM. P. 200-206.
4. Шарпарь, Н. Д. Стабилизация наночастиц кварца графеноподобным углеродом для модификации оптических сред / Н. Д. Шарпарь, Н. Н. Рожкова // Оптический журнал. 2025. Т. 92, № 10. С. 74-81.

Золь-гель технология: научные аспекты и применение в промышленности

О.А. Шилова

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИХС, Санкт-Петербург

УДК:544.773:539.8:661.18, 538.9

Золь-гель технология существовала всегда! По крайней мере, с появлением алхимии и химии рядом неизменно была золь-гель технология. В те времена люди еще не знали что это именно *она*. Устоявшийся термин ‘золь-гель’ – это калька с английского ‘sol-gel’. ‘Sol-gel science’ ‘sol-gel processing’ вошли в обиход ученых всего мира после выхода в свет в 1990 году монографии американских исследователей Бринкера и Шерера, которая в настоящее время стала классикой, не потеряв при этом актуальности [1]. Тем не менее, признанный день рождения золь-гель технологии связывают с 1844, когда французский технолог Эбельмен написал статью о кремниевых эфирах и впервые описал реакцию гидролиза одного из наиболее часто используемых в золь-гель технологии прекурсора – алкоксида кремния (тетраэтоксисилана – этилового эфира ортокремниевой кислоты) [2]. Затем эту реакцию не раз уточняли, пока форма записи не приняла привычный нам вид. В современной интерпретации термином «золь-гель технология» обозначают технологию получения технически ценных неорганических и органо-неорганических материалов на основе перехода гомогенного раствора в золь и затем в гель [3]. Понятие «золь» и «гель» знакомо многим из коллоидной химии и даже из домашнего обихода. В золь-гель технологии золем называют тонкодисперсные (1-100 нм) или микрогетерогенные (100 нм - 1 мкм) системы с жидкой дисперсионной средой и твердой дисперсной фазой, а гелем – связнодисперсную систему, состоящую из непрерывных (взаимопроникающих) жидких и твердых фаз, которые имеют коллоидные размеры (1-1000 нм). В качестве прекурсоров в золь-гель технологии чаще всего используют химические соединения, способные растворяться в органических растворителях и гидролизоваться (т.е. взаимодействовать с водой), в результате чего образуются полимолекулы, полисольватированные группы, мицеллы и наночастицы. Золь-гель технология относится к нанотехнологиям, поскольку из истинных растворов прекурсоров образуются наноструктурированные золи и гели. Достоинством этой технологии является простота технологических процессов, возможность варьировать состав синтезируемых материалов, обеспечить однородность структуры получаемых продуктов за счет гомогенизации на молекулярном уровне, использование высокочистых реагентов в качестве прекурсоров. Золь-гель технология широко используется в науке и технике для получения технически ценных неорганических и органо-неорганических материалов и покрытий [4]. Ассортимент получаемых продуктов чрезвычайно высок – это предназначенные для применения в различных областях промышленности нанопорошки, стекло (прежде всего, оптическое), керамика, органо-неорганические композиты, пористые материалы, а также тонкие пленки и покрытия, структуры «ядро-оболочка». Изменяя состав и условия золь-гель синтеза, можно управлять структурой материалов и покрытий, получая неорганические и органо-неорганические материалы с аморфной, фрактальной или кристаллической структурой, обладающие специальными оптическими, электрофизическими, каталитическими, магнитными, биологическими и другими целевыми свойствами. В докладе особое внимание будет уделено технологии получения тонких пленок и покрытий для применения в оптике, микроэлектронике, биологических и агротехнологиях.

1. Brinker C.J., Scherer G.W. Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing. San Diego: Academic Press, Inc., Elsevier, 1990. 908 p.
2. Ebelmen. Sur les éthers siliciques // Journ. de Pharm. 1844. VI. p. 262-264.
3. Мошников В.А., Таиров Ю.М., Хамова Т.В., Шилова О.А. Золь-гель технология микро- и нанокompозитов. Учебное пособие / Под. ред. О. А. Шиловой. СПб.: Изд-во Лань, 2013. 304 с.
4. Lu S., Shao J., Wu F. Industrial applications of sol-gel derived coatings //J. Sol-Gel Sci. Technol. 2025. V. 114. P. 87–97.

Концепция логарифмического фрактала и её применение для исследования макрообъектов

О.Д. Шнырков^{1,2}, Е.Г. Яшина^{1,2}, К.А. Пшеничный¹, С.В. Григорьев^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

УДК: 57.018.4, 53.01, 538.9

Фракталы – объекты, фрагментированные настолько, что их невозможно точно измерить привычными нам мерами (длина, площадь, объём). Понятие «фрактал» ввёл в своей работе Бенуа Мандельброт [1]. Исследования показывают, что часто развитие живых систем можно описать, используя законы построения логарифмических фракталов – особого фрактального класса [2, 3], что подчёркивает актуальность изучения этого класса и развития теории логарифмического фрактала.

Для изучения фрактальных свойств объектов часто используются эксперименты по малоугловому рассеянию нейтронов, рентгеновского (синхротронного) излучения, а также света. Используя метод численного Фурье-анализа, который моделирует такие эксперименты, мы исследовали объекты, относящиеся к классу логарифмических фракталов. Такие объекты обладают иерархической структурой и подчиняются правилу равенства площади при изменении масштаба. Ветвление деревьев хорошо описывается структурой логарифмического фрактала на крупных масштабах. Обнаружение этого факта позволило сформулировать новые принципы роста лиственных деревьев (дубы, берёзы): при ветвлении дерева суммарная площадь поверхности дочерних веток равна площади поверхности родительской ветки [2]. Применение этого метода показало, что ветки ели с хвоей так же являются логарифмическими фракталами, что обусловлено необходимостью оптимизации процесса фотосинтеза, в котором участвует хвоя. При этом те же ветки без иголок являются массовыми фракталами, что, видимо, необходимо для оптимизации транспортных функций.

Логарифмические фракталы характеризуются дополнительным параметром – логарифмической подразмерностью. Мы провели математические вычисления и пришли к выводу, что этот параметр характеризует изменение фрактала при переходе от одной генерации к следующей, это, по-видимому, означает, что логарифмический фрактал следует рассматривать не просто как статический объект, а как процесс, который развивается с течением времени, параметризованном через номер генерации.

1. Mandelbrot B. The Fractal Geometry of Nature // New York: Freeman. 1983. 160 pp.
2. Grigoriev S.V., Shnyrkov O.D., Pustovoyt P.M., Iashina E.G., and Pshenichnyi K.A. Experimental evidence for logarithmic fractal structure of botanical trees // Phys. Rev. E 2022. V.105. P.044412.
3. Григорьев С.В., Шнырков О.Д., Пшеничный К.А., Пустовойт П.М., Яшина Е.Г. Модель фрактальной организации хроматина в двумерном пространстве // ЖЭТФ. 2023. Т. 163. В. 3. С. 428–438.

Применение гидроэкструзии для обработки меди с крупнокристаллической и субмикрокристаллической структурой

Е.В. Яшарова^{1,2}, Л.Ф. Сенникова¹, В.Д. Суровицкий¹, В.В. Бурховецкий¹, В.А. Глазунова¹

¹ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Донецк

²ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Донецк

УДК: 621.77, 620.172, 538.9

Гидроэкструзия (ГЭ) является перспективным методом обработки металлов давлением, который позволяет создавать прутковые изделия нужного диаметра и улучшать физико-механические и эксплуатационные свойства материала. Исследования процесса в основном проводят на крупнокристаллических (КК) металлах [1], а его влияние на субмикрокристаллические (СМК) материалы исследовано недостаточно. При этом, недавние исследования применения ГЭ для обработки материалов с СМК структурой, на примере алюминиевого сплава АМц и бескислородной меди, показывают её положительное влияние на изменение механических свойств [2, 3]. Цель данной работы заключается в оценке влияния ГЭ на механические свойства меди с КК структурой и СМК структурой.

В качестве исследуемого материала использовали бескислородную медь марки М0б с КК структурой, полученной после вакуумного отжига ($600\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 ч), и СМК структурой, сформированной интенсивной пластической деформацией методом равноканального углового прессования, с размерами зерен 20 мкм и 0,2 мкм соответственно. Заготовки обрабатывали ГЭ с величиной разовой логарифмической деформации в интервале от $\epsilon = 0,3$ до $\epsilon = 1,2$ шагом 0,3. Микроструктуру исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии. Механические свойства определяли испытаниями на растяжение по ГОСТ 1497–84. Поверхность разрушения проанализировали сканирующей электронной микроскопией.

По результатам испытаний было показано, что применение ГЭ для обработки меди с КК структурой при величине деформации $\epsilon = 1,2$ приводит к формированию субзёрненной структуры с размером субзерна порядка 0,25 мкм в поперечном к оси деформирования направлении и росту предела прочности на 78% по сравнению с исходной величиной. Обработка гидроэкструзией СМК меди сохраняет сформированную зёрненную структуру с размером зерна порядка 0,2 мкм в поперечном к оси деформирования направлении, при величине деформации $\epsilon = 0,6\text{--}0,9$ повышает предел прочности на 10%, а при $\epsilon = 1,2$ наблюдается релаксация прочности вследствие деформационного разогрева.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, бюджетная тема FREZ-2024-0001.

1. Maj L., Jarzębska A., Trelka A., Bieda M., Gieleciak M., Boczkal S., Skiba J., Kulczyk M. Correlating multi-pass hydrostatic extrusion characteristics with microstructure and mechanical properties of titanium grade 4 // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2025. V. 25:299. P. 1–16.
2. Сенникова Л.Ф., Гангало А.Н., Свиридова Е.А., Васильев С.В., Ткаченко В.М. Влияние разовой степени деформации гидроэкструзией на механические свойства сплава АМц, предварительно обработанного равноканальным угловым прессованием // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2024. № 4 (87). С. 71-76.
3. Гангало А.Н., Яшарова Е.В., Сенникова Л.Ф., Суровицкий В.Д., Бурховецкий В.В., Глазунова В.А. Влияние гидропрессования на механические свойства ультрамелкозернистой меди // Деформация и разрушение материалов. 2025. №10. С. 19-27.

Визуализация структуры хроматина в ядрах нормальных и раковых клеток с помощью метода малоуглового рассеяния рентгеновского излучения (МУРР)

Е.Г. Яшина^{1,2}, С.В. Григорьев², Е.Ю. Варфоломеева², Р.А. Пантина², Р.А. Ковалев²,
Н.Д. Федорова²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

²НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

УДК: 577.3, 539.26, 538.9

Одним из наиболее информативных и востребованных методов определения структуры неупорядоченных биологических объектов является метод малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) и рентгеновского излучения (МУРР). Исследования крупномасштабной организации хроматина с помощью ультра малоугловых техник нейтронного рассеяния, таких как Спин-Эхо МУРН и Ультра МУРН, демонстрируют наличие структуры логарифмического фрактала в ядрах нормальных и опухолевых клеток [1-4]. Структура логарифмического фрактала наблюдается как кубический закон в интенсивности рассеяния, является универсальной для большинства типов ядер и образуется из системы полостей, которые формируют систему транспортных каналов, необходимую для метаболизма и инфраструктуры внутри ядра, а также формирует собой пространство потенциально необходимое для осуществления биологических функций ДНК[4]. Эксперименты по МУРР и МУРН на ядрах опухолевых клеток HeLa демонстрируют наличие объемнофрактальной структуры с размером 200 нм и фрактальной размерностью $D=2,6$ [1], в то время как эксперименты на ядрах нормальных клеток лимфоцитов крысы [2] и на ядрах опухолевых клеток HeLa с подавленной транскрипционной активностью [4], демонстрируют отсутствие объемнофрактальной структуры.

В данной работе представлены результаты исследования структурной организации хроматина в ядрах фибробластов (клеточная линия DF-2), фибросаркомы (клеточная линия НТ-1080) и карциномы (клеточная линия А549), полученные на лабораторной установке малоуглового рассеяния рентгеновского излучения Xenocs Xeuss (МГУ, Москва) в диапазоне переданных импульсов от 0.05 нм^{-1} до 2 нм^{-1} . Картина рассеяния для ядер клеток DF-2 соответствует типичной картине рассеяния для ядер нормальных клеток: интенсивность рассеяния описывается кубическим законом, что соответствует рассеянию от логарифмической фрактальной структуры каналов, образующих внутреннюю транспортную систему ядра. В то время, как результаты эксперимента на ядрах клеточных линий НТ-1080 и А549 показали отсутствие объемнофрактальных структур, характерных для ядер опухолевой клеточной линии HeLa: вместо объемнофрактальных структур наблюдались сверхнуклеосомные кластеры размером 40 нм, которые, были визуализированы с помощью *ab initio* расчетов с использованием программного пакета DAMMIF Atsas.

Авторы выражают благодарность Д. А. Иванову за предоставленную возможность реализации эксперимента на лабораторном малоугловом рентгеновском инструменте Xenocs Xeuss (МГУ, Москва) и А. А. Пирязеву за помощь в проведении измерений.

1. Iashina E. G. et al. Small-angle neutron scattering (SANS) and spin-echo SANS measurements reveal the logarithmic fractal structure of the large-scale chromatin organization in HeLa nuclei // Journal of Applied Crystallography. 2019. V. 52. T. 4. P. 844-853.
2. Iashina E. G. et al. Bifractal structure of chromatin in rat lymphocyte nuclei // Physical Review E. 2021. V. 104. No. 6. P. 064409.
3. Iashina E. G. et al. Time-of-flight spin-echo small-angle neutron scattering applied to biological cell nuclei // Journal of Applied Crystallography. 2023. V. 56. No. 5. P. 1512-1521.
4. Яшина Е. Г. и др. Пространственная модель организации хроматина в ядре биологической клетки по данным малоуглового рассеяния // Письма в ЖЭТФ. 2023. Т. 118. № 10. С. 776 – 781.

Physical characteristics and structural analysis of Gamma induced indium copper spinel ferrite nanocomposite using small angle scattering methods

A.H.A. Elmekawy^{1,2,3}, I. A Ali^{2,3}, Hassan Ebrahim^{2,3}, O. Ivankov¹, Tatiana N. Verzhinina^{1,4},
A.K. Mutali¹, A. I. Kuklin¹

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna

²Experimental Nuclear Physics Department, Nuclear Research Center, Egyptian Atomic Energy Authority, Cairo

³Cyclotron Facility, Nuclear Research Center, Egyptian Atomic Energy Authority, Cairo

⁴Dubna University, Dubna

UDC: 538.9

In this work, the structural and physical characteristics of CuInFe₂O₃ nanocomposite with concentration of indium constituent. This study focuses on elucidating the surface structure of the composite material at nano and macroscale, which are important for promising applications based on properties of spinel ferrites [1-7]. We also studied possible impact of gamma irradiation onto surface parameters, by emphasizing surface structure of composite's cluster using conventional morphological analysis along with small angle scattering methods. Nanocomposites samples were synthesized via the sol-gel method where Indium was incorporated into the matrix at varying concentrations. Post-synthesis, the samples were subjected to gamma irradiation at a dose of 600 kGy.

The magnetic properties were analysed by conducting hysteresis measurements using a Vibrating Sample Magnetometer (VSM) to evaluate the magnetic behaviour of the synthesized samples. Structural characterization techniques, including Small-Angle X-ray/neutron Scattering (SAXS/SANS), Transmission Electron Microscopy (TEM), and X-ray Diffraction (XRD), were employed to assess morphology and structural changes.

According to SAXS analysis, the nanocomposites have stable surfaces fractal structure with surface roughness of the order ($3.6 > P > 3.8$), even with different concentration of indium constituent no change in the structure form factor have been realized. From another hand studied nanocomposite show great stability against gamma impact without significant change in surface morphology. These findings have implications for optimizing the material properties for various applications where stable physical characteristics particularly surface structure of composite on the nanoscale represent big advantage for electrical, biomedical and for several applications.

1. Kumar E.R. et al. Magnetic, dielectric and sensing properties of manganese substituted copper ferrite nanoparticles // *J. Magn. Magn Mater.* 2014. V. 355. P. 87–92.
2. Zhang R. et al. Tuning conductivity and magnetism of CuFe₂O₄ via cation redistribution, RSC // *Adv.* 2017. V. 7 (35). P. 21926–21932.
3. Shah M.S. et al, Structural and magnetic properties of praseodymium substituted barium-based spinel ferrites // *Mater. Res. Bull.* 2018. V. 98. P. 77–82.
4. Junaid M. et al. Structural, spectral, dielectric and magnetic properties of indium substituted copper spinel ferrites synthesized via sol gel technique // *Ceramics International.* 2020. V. 46. P. 27410–27.
5. Naik C.C. Nanocrystalline indium-substituted copper ferrite : preparation, optical, and dielectric studies // *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 2022. V. 33. P. 4330–4340.
6. Hashim M. et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials Superparamagnetic behavior of indium substituted NiCuZn nano ferrites // 2015. V. 381. P. 416–421.
7. Junaid M., Azhar M. et al. Structural, spectral, dielectric and magnetic properties of indium substituted copper spinel ferrites synthesized via sol gel technique // *Ceramics International.* 2020. V. 46. P. 27410–27418.

Effect of the Temperature–Time Mode of Crystallization on PP/SiO₂ Nanocomposites

M. Hasanova, H. Shirinova

Chemical Physics of Nanomaterials, Physics Department, Baku State University

UDC: 538.9

Effect of the temperature–time mode of crystallization on PP/SiO₂ nanocomposites obtained based on isotactic PP and amorphous SiO₂ nanoparticles has been investigated. The obtained samples were synthesized by mixing in solution, hot pressing and cooling at different cooling rates in nitrogen, water and slow modes. The diameter of samples obtained in different modes and folded into layers varieties in the range of 4 cm and thickness 95-120 μm. Surface morphology of nanocomposites was studied by atomic force microscopy (AFM), and the thermal properties were investigated using thermogravimetric analysis (TGA), differential thermal analysis (DTA), and differential scanning calorimetry (DSC) techniques. AFM research showed that, in addition to the non-homogeneous distribution of nanoparticles and the registration of local agglomerates, depending on the cooling rate, more regular and homogeneous dispersion and more surface are observed [1]. At the same time, depending on the rate of cooling of the samples, the rough surface structure and uneven relief, as well as more regular, smooth, morphology with less local differences can be associated with the structuring of polymer chains and the location of the filler within the polymer, the kinetics of the formation is different. Depending on the cooling speed, the distribution and surface properties of nanoparticles in the matrix have different characteristics. The thermal analysis of PP/SiO₂ nanocomposites shows that the thermal properties change significantly depending on the cooling rate. TGA analysis indicates that the temperature range corresponding to 50% mass loss lies between 400–500°C, which is associated with the breakdown of weak C–C bonds in the polymer backbone. This interval aligns with the "gas release" phase, where radicals or hydrocarbons evolve as gaseous products [2]. As such, the change in the cooling rate affects the thermal stability, which, in turn, affects the strength of the structure. The DTA results show that the change in the cooling rate affects the thermal properties of the composite. DSC analysis was carried out to study thermal behavior. It was found that the amount of heat released by changing the cooling speed changes. If so, the amount of heat released during slow cooling corresponds to ΔH=428.5219 J/g, and the decomposition temperature corresponds to 444.89°C. For cooling in water, ΔH=375.2001 J/g and the decomposition temperature is 463.18°C, and for cooling in nitrogen, this peak for its amount corresponds to 458.63°C, and the amount of heat released is ΔH=360.7810 J/g. The observed changes allow us to say that the formation of the internal structure depended on the conditions of the TTC directly affecting its thermal properties [3]. Thermal influences directly affect the formation of the structure and mechanical properties of the material. The studies carried out determine that the most optimal mode for obtaining PP/SiO₂ nanocomposites is water cooling.

1. Magerramov A., Ramazanov M., Gadzhieva F., Alieva, S. The effect of the temperature-time mode of crystallization on the morphology and properties of nanocomposites based on polypropylene and cadmium sulfide // INIS – International Nuclear Information System. 2011.
2. Bera O., Pilić B., Pavličević J., Jovičić M., Holló B., Szécsényi K. M., Špirkova M. Preparation and thermal properties of polystyrene/silica nanocomposites // *Thermochimica Acta*. (2011. V. 515. P.1-2.
3. Vanskeviče I., Kinka M., Banys J., Macutkevič J., Schaefer S., Selskis A., Fierro V., Celzard A. Dielectric and Ultrasonic Properties of PDMS/TiO₂ // *Nanocomposites. Polymers*. 2024. V. 16. N5. P. 603.

The Structural Analysis of PVDF/WS₂ Polymer Nanocomposite films by TEM and Small-Angle X-Ray Scattering method

A.A. Nabiye^{1,2}, O.I. Ivankov², A.H.A. Elmekawy^{2,3}

¹Ministry of Science and Education Republic of Azerbaijan, Institute of Physics, Baku, Azerbaijan

²International Intergovernmental Organization, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

³Experimental Nuclear Physics Department, Nuclear Research Center, Egyptian Atomic Energy Authority, Cairo, Egypt

UDC: 538.9

In recent years, there has been growing interest by academics, scientific community, and industry in the development of polymer composites containing organic, inorganic, or hybrid fillers. This interest is primarily due to the potential to enhance thermal, mechanical, and dynamic-mechanical properties through interfacial interactions between the polymer matrix and the filler [1, 2]. The polyvinylidene fluoride (PVDF) polymer matrix is tough, flexible, and easy to process into films, allowing for the creation of lightweight, bendable, and wearable shields. The high surface area of WS₂ nanosheets enhances the formation of a conductive network at low loadings, making the shield efficient and lightweight. Based on the search results and current scientific literature, the application of PVDF+%WS₂ nanocomposite films for radiation protection is an emerging and promising area of research, though not as well established as their use in energy harvesting. These composites show potential primarily for shielding against electromagnetic (EM) radiation and, to a lesser extent, ionizing radiation.

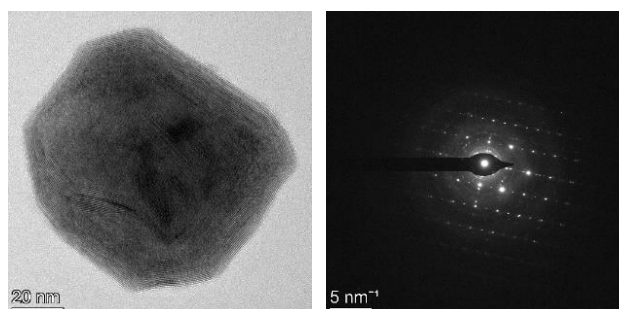


Figure 1. TEM micrograph and electron diffractogram of WS₂ nanosheets

In the current work a polymeric matrix samples of pure PVDF and PVDF/WS₂ composite films irradiated with different gamma-ray doses (100, 300, 500 and 700 kGy) were analyzed using small-angle and wide-angle X-ray scattering. The SAXS/WAXS measurements were carried out at the Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Russia [3]. SAXS experiments showed WS₂ nanosheets mainly distributed in polyvinylidene fluoride matrix as aggregates system [4]. WS₂ disperses well in the range of 0.1-0.5%, and an average distance of ~9-10 nm between particles is observed within the PVDF matrix. As the concentration increases, surface roughness increases (2.05 → 2.30). 0.5% is the optimal concentration: This sample exhibits both an ordered structure (inter-particle distance ~9.2 nm) and favorable surface roughness ($D_s \approx 2.30$) for interfacial activity. The percolation threshold is crossed between 0.5% and 10%. At 10%, the "broad peak" disappears, and a dual-level fractal structure forms instead. This indicates that WS₂ has undergone strong aggregation with ($D_s \approx 2.92$) indicating much roughness than that of pure WS₂ ($D_s \approx 2.68$), it is expected that PVDF chains nucleate on the WS₂ surfaces, creating additional roughness.

1. Nabiye¹ A.A., Olejniczak A., et al. Composite Films of HDPE with SiO₂ and ZrO₂ Nanoparticles: The Structure and Interfacial Effects // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. N 10. P. 2673.
2. Nabiye¹ A.A., Mustafayev I.I. et al. Post- γ -irradiation effects in nano-SiO₂ particle reinforced high-density polyethylene composite films: Structure–property relationships, thermal stability and degradation // *Polymer Composites*. 2025. V. 46. P. S44-S62.

3. Nabiyev A.A., Ivankov O.I. et al. High-dose gamma irradiation effects on HDPE/SiO₂ nanocomposite films: Structure, crystallinity, defects, radiation endurance, dispersion, and interfacial behavior // Polymer Degradation and Stability. 2026. V. 245. P. 111851.