

Амурский государственный университет

ФИЗИКА:

**фундаментальные
и прикладные
исследования,
образование**

*Благовещенск
2025*

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Амурский государственный университет»*

ФИЗИКА: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБРАЗОВАНИЕ

*Материалы XXIII Всероссийской научной конференции
(22 – 28 сентября 2025 г.)*

Под редакцией доктора физ.-мат. наук Е.В. Стуковой

Благовещенск
2025

УДК 53:37
ББК 22.3
Ф48

Рецензент

профессор кафедры «Физическое и математическое образование» Благовещенского педагогического государственного университета
доктор физ.-мат. наук, профессор *С.В.Барышников*

Редакционная коллегия:

доктор физ.-мат. наук, профессор Е.В.Стукова (ответственный редактор),
канд. физ.-мат. наук И.В. Верхотурова

Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование: Материалы XXIII Всероссийской научной конференции (22–28 сентября 2025 г.) Амурский государственный университет / редколлегия: Е.В. Стукова (ответственный редактор) [и др.] – Благовещенск: АМГУ, 2025. – Текст:электронный. – 246 с. – URL: amursu.ru/nauka/izdatelskaya-deyatelnost/ . – Дата публикации: 16.10.2025. – ISBN 978-5-93493-457-7

В сборнике представлены материалы докладов XXIII Всероссийской научной конференции «Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование», проведенной осенью 2025 года. В них отражены обобщающие результаты работы преподавателей, аспирантов и студентов вузов, академических институтов и учителей школ в области физики и физического образования. Сборник предназначен для инженеров, научных сотрудников, докторантов, аспирантов и студентов старших курсов, занимающихся научной работой.

Самостоятельное электронное издание.

Авторы опубликованных статей несут ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, статистических данных и других сведений, а также за то, что их материалы не содержат сведений, не подлежащих открытой публикации.

ISBN 978-5-93493-457-7

©Амурский государственный университет, 2025

Секция «Теоретическая физика и моделирование»

УДК 372.853

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕРНИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН ДЛЯ ФИЗИКОВ-ИНФОРМАТИКОВ: ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ОРИЕНТАЦИЯ, ЦИФРОВИЗАЦИЯ И МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОСТЬ

Е.Г. Агапова

Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

000614@togudv.ru

В статье представлены методические предложения по трансформации преподавания математических дисциплин для студентов-физиков, специализирующихся в области информационных систем. Разработана и апробирована методика, объединяющая: профессионально-ориентированную адаптацию содержания через физические приложения (квантовые вычисления, анализ big data, моделирование сложных систем); инновационные образовательные технологии (VR-лаборатории, геймификация, автоматизированные системы проверки); междисциплинарные связи между математикой, физикой и computer science; формирование цифровых компетенций (НРС, машинное обучение, визуализация); современные оценочные инструменты (GitHub-портфолио, автоматическое тестирование кода). Приведены примеры модернизации ключевых математических дисциплин: математический анализ, линейная алгебра, численные методы и др. Материалы статьи могут быть полезны преподавателям физико-математических дисциплин, разработчикам образовательных программ, а также исследователям в области методики преподавания точных наук.

Цифровая трансформация физических исследований требует принципиально новой математической подготовки специалистов [1]. Традиционное преподавание математических дисциплин в физических вузах сталкивается с тремя ключевыми проблемами: отрыв от практики – абстрактное изложение без связи с современными физическими задачами; дефицит цифровых навыков – недостаточное владение computational-инструментами; устаревшая оценка – ориентация на теоретические знания вместо прикладных компетенций. Электронные учебно-методические комплексы (ЭУМК) устаревают и нуждаются в модернизации. Коломина, Иващенко описали процесс обновления ЭУМК по дисциплине «Уравнения математической физики» для бакалавров направления «Прикладная математика и информатика» [2]. Важными аспектами являются использование современных технологий как инструмента для решения задач и организации образовательного процесса в диалоговом режиме общения [3].

Данная работа предлагает системное решение через модернизацию всего цикла математических дисциплин с акцентом на потребности физиков-информатиков. Математические дисциплины изначально имеют приложения к решению физических задач, как естественнонаучные предметы. В данной статье приводятся ключевые выдержки и методические решения по конкретным темам, демонстрирующие реализацию пяти основных аспектов преобразования математических дисциплин для физиков-информатиков. Акцент сделан на конкретных примерах профессионально-ориентированной

адаптации содержания, отдельных кейсах внедрения инновационных образовательных технологий, типовых схемах междисциплинарной интеграции, фрагментах формирования цифровых компетенций, образцах современных оценочных инструментов. Каждый пример иллюстрирует, как традиционные математические темы могут быть переосмыслены в контексте подготовки специалистов для современных физических исследований и разработки информационных систем.

Модернизация раздела «Линейная алгебра и аналитическая геометрия» состоит в том, что с точки зрения профессионально-ориентированной адаптации действия над матрицами можно рассмотреть, как матрицы плотности в квантовых вычислениях (кубиты). А линейные операторы, как линейные преобразования в обработке изображений телескопов (РСА для снижения шумов). С точки зрения внедрения инновационных образовательных технологий использовать инструменты: VR-визуализация - интерактивное исследование собственных векторов в 3D-пространстве (гармонический осциллятор) или геймификацию – квест «Диагонализация спасения» (подбор базиса для декомпозиции матриц детектора) или AI-ассистент - ChatGPT для генерации персональных задач на SVD-разложение. В таблице приведены междисциплинарные связи между тремя дисциплинами при изучении соответствующих тем рассматриваемых разделов.

Междисциплинарные связи при изучении тем математических дисциплин

Тема/раздел	Математика	Физика	Программирование
Тензорные вычисления/ Линейная алгебра и аналитическая геометрия	Тензорное произведение	Общая теория относительности	Ускорение на GPU (PyTorch)
	Свертка тензоров	Квантовая теория поля	Автоматическое дифференцирование
Дифференциальные уравнения/ Математический анализ	Решение ОДУ	Моделирование динамики плазмы	Оптимизация кода на Numba
	Уравнения в частных производных	Теплопередача в реакторах	Параллельные вычисления (MPI)
Комбинаторика/ Дискретная математика	Генерация перестановок	Статистическая физика	Оптимизация алгоритмов
	Метод включений-исключений	Квантовая запутанность	Параллельные вычисления
Теория доказательств/ Математическая логика	Конструктивные доказательства	Верификация квантовых программ	Доказательные ассистенты (Coq)
	Логика Хоара	Условия корректности физических симуляций	Формальная верификация
Методы Монте-Карло/ Численные методы	Статистическое моделирование	Квантовая хромодинамика	Параллельные вычисления (CUDA)
	Цепи Маркова	Моделирование материалов	Оптимизация алгоритмов
Регрессионный анализ/ Теория вероятностей и математическая статистика	Метод наименьших квадратов	Калибровка детекторов	Ускорение на GPU (CuPy)
	Нелинейная регрессия	Спектроскопия	Автоматическое дифференцирование

Модернизированная тема «Ряды и приближения» в разделе «Математический анализ» рассматривается в физическом контексте как аппроксимация решений уравнений Шрёдингера для квантовых систем. Визуализация интегрирования в 3D-пространстве (например, расчёт массы неоднородного объекта); интерактивные тренажёры: графический интерфейс для подбора пределов интегрирования (Plotly Dash); автоматическая проверка решений через Wolfram Alpha API позволят обучающимся более наглядно изучить тему «Кратные интегралы».

С точки зрения профессионально-ориентированной адаптации тема «Теория графов» раздела «Дискретная математика» модернизированного математического курса рассматривается как моделирование кристаллических решеток (топология графов); анализ сетей взаимодействий в квантовых системах. Геймификация в виде квеста «Логические врата» (построение схем из NAND-элементов); использование VR-лаборатории как визуализации булевых функций в 3D-пространстве и использование AI-ассистента как генерации персональных задач на минимизацию ДНФ через ChatGPT API способствуют визуальному изучению темы «Булева алгебра».

Тема «Логические исчисления» в модернизированном разделе «Математическая логика» рассматривается в физическом контексте как верификация квантовых алгоритмов (логика линейных операторов) и логический анализ условий корректности физических моделей. В качестве инновационных образовательных технологий при изучении темы «Теория моделей» можно рассмотреть: интерактивный симулятор – визуализацию моделей для различных аксиоматик (HOL Light); геймификацию - квест «Поиск противоречий» в физических теориях или AI-ассистент – генерацию индивидуальных задач на полноту теорий через GPT-4.

Тема «Решение дифференциальных уравнений» в модернизированном разделе «Численные методы» рассматривается в физическом контексте как моделирование динамики плазмы в термоядерных реакторах (ITER); численное решение уравнений Навье-Стокса для аэродинамических расчетов. Использование VR-лаборатории в качестве интерактивного построения сеток для сложных геометрий, геймификация в виде соревнования "Оптимизация сетки" (минимизация ошибки при заданных ресурсах) и AI-ассистента в виде генерации адаптивных задач на основе успеваемости студента позволяют более наглядному изучению темы «Методы конечных элементов».

Тема «Статистические методы анализа данных» в модернизированном разделе «Теория вероятностей и математическая статистика» рассматривается в физическом контексте как анализ данных с детекторов частиц (LHC), обработка сигналов гравитационных волн (LIGO). Использование интерактивного симулятора цепей Маркова (MCMC визуализация), VR-лаборатории для исследования распределений вероятностей и автоматизированной системы генерации задач на PyMC3 позволяют наглядно изучить тему «Байесовские методы».

В качестве междисциплинарных связей обучающимся по направлению 03.03.02 Физика, профиль «Информационные системы в физике» можно предложить следующие проекты: «Тензорные сети для моделирования спиновых систем» с реализацией алгоритма DMRG на TensorFlow и визуализацией в Plotly 3D; «Численное моделирование диффузии примеси в полупроводнике» с аналитической постановкой (уравнение Фоккера-Планка); реализацией разностной схемы на Python и визуализацией в ParaView; «Численное моделирование диффузии примеси в полупроводнике» с реализацией на C++ с OpenMP и визуализацией в Jupyter Notebook. Формирование цифровых компетенций осуществляется за счет автоматизации проектирования и верификации (проверка свойств автоматов в инструменте TLA+); «Формальная проверка алгоритма квантовой коррекции ошибок» со спецификацией на языке Lean и визуализацией доказательств в Jupyter; «Моделирование распространения частиц в детекторе» с реализацией на Python с использованием numba для ускорения и визуализацией в Matplotlib; «Предсказание вспышек на Солнце».

Формирование цифровых компетенций осуществляется за счет автоматизации расчетов (геометрические преобразования), оптимизации (эффективный параллельный алгоритм для вычисления произведения матриц, использующий многопоточность или GPU-вычисления) и коллаборации (математическое моделирование движений). Формируются цифровые навыки при работе с системами автоматического доказательства, при оптимизации (сравнение производительности доказательных ассистен-

тов), при коллаборации (Git-репозиторий с формальными спецификациями); при работе с GPU, оптимизации (сравнение производительности CPU vs GPU); с большими массивами (Dask, Vaex), визуализацией в Plotly/PowerBI, параллельных вычислениях (MPI для bootstrap).

В качестве оценочных инструментов можно использовать: автоматизированные тесты, критерии проектов с индикаторами или бальной системой (процентным соотношением); портфолио - коллекция Jupyter-ноутбуков с аннотациями, с решениями; видео-презентации решений, проектов, видео-демонстрации работы алгоритмов; коллекция верифицированных доказательств; скринкасты объяснений ключевых концепций.

В итоге обучающиеся приобретают навыки применения методов математического аппарата в реальных физических и IT-задачах, навыки работы с современным ПО (от символьных вычислений до GPU-оптимизации); с современными фреймворками (NetworkX, CUDA), с HPC-технологиями (GPU, MPI).

Инновационность приведенных примеров состоит в том, что модернизированный математический курс не просто даёт теоретические знания, но и наряду с этим превращает абстрактную математику в ключевой инструмент для работы с современными физическими данными. Практическая значимость методики заключается в повышении мотивации студентов через связь математики с профессиональными задачами, в формировании навыков «математика + программирование + физика» вместо изолированного изучения дисциплин, подготовке выпускников к работе в современных research teams (где требуется интеграция этих компетенций). Представляется целесообразным расширение предложенной методики на сопряжённые области науки, такие как астрофизика и биоинформатика. Ещё одним важным направлением выступает интеграция предложенных методов с современными квантовыми симуляторами, что открывает дополнительные возможности для реализации междисциплинарных исследований и прикладных задач.

1. Жуковская, И. Е. Основные тренды совершенствования деятельности высшего учебного заведения в условиях цифровой трансформации / И. Е. Жуковская // Открытое образование. – 2021. – Т. 25, № 3. – С. 15-25. – DOI 10.21686/1818-4243-2021-3-15-25.

2. Коломина, М. В. Цифровой ресурс для дисциплины «Уравнения математической физики» / М. В. Коломина, Е. А. Ивашиненко // Общество. – 2023. – № 2(29). – С. 67-72.

3. Блейхер, О. В. Персонализация обучения математике: о результатах анализа педагогического эксперимента в Университете ИТМО / О. В. Блейхер, В. И. Снегурова, М. В. Боженова // Вестник педагогических наук. – 2024. – № 8. – С. 112-118. – DOI 10.62257/2687-1661-2024-8-112-118.

УДК 004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТКАНИ ОПУХОЛИ ПРИ РАДИОЧАСТОТНОЙ АБЛЯЦИИ

А.А. Воронина, И.В. Верхотурова

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

Методом компьютерного моделирования получен комплекс оптимальных значений параметров процедуры радиочастотной абляции (РЧА) опухоли тканей печени и почки. Максимальная температура нагрева ткани,

наибольшая область некроза при РЧА и быстрый спад степени повреждения вблизи опухоли достигается при использовании четырехлучевого зонда. Оптимальное время проведения РЧА для получения максимального объема некротической ткани опухоли, в котором достигается требуемый диапазон температур от 50 °C до 96 °C, составляет 8-10 минут, независимо от вида ткани. За одинаковый промежуток времени проведения РЧА большее значение теплопроводности ткани почки, чем для ткани печени, обуславливает образование большего объема некротической ткани. Однако меньшее значение электропроводности ткани почки требует большего напряжения источника тока для достижения максимальной температуры нагрева ткани.

Различные физические методы находят широкое применение в медицине, особенно в онкологии. Компьютерное моделирование все более становится одним из ключевых инструментов в медицинских исследованиях. В частности, компьютерное моделирование процесса радиочастотной абляции (РЧА) позволяет заранее оценить возможные исходы и выбрать оптимальный вариант лечения для каждого пациента [1].

Суть метода радиочастотной абляции заключается во введении зонда, через который подается переменный ток высокой частоты, в центр опухолевой ткани, что вызывает ее сильный нагрев, гибель опухолевых клеток и образование зоны некроза вокруг электрода. Чтобы эффективно разрушить опухолевую ткань, необходимо подвергнуть весь целевой объем опухоли воздействию цитотоксических температур в течение определенного времени избегая обугливания кончиков электродов зонда. Также важным требованием при проведении РЧА – создание свободной от опухоли зоны в 1 см, которая гарантирует, что все микроскопические инвазии по периметру опухоли будут устранены [2 – 4].

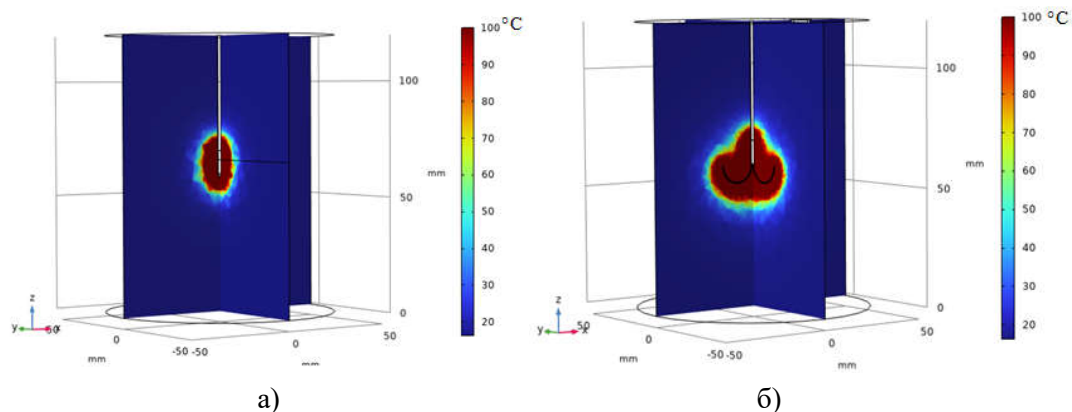
В данной работе приведены результаты по определению комплекса оптимальных значений параметров процедуры радиочастотной абляции опухоли путем компьютерного моделирования средствами COMSOL Multiphysics.

Моделирование локализованного нагрева тканей печени и почки, который достигается путем введения зонда определенной геометрии, с учетом и без учета перфузии проводилось с помощью интерфейсов *Electric Currents* и *Bioheat Transfer*, объединенных мультифизической связкой *Electromagnetic Heating*. В данных интерфейсах задавали значения: начальной температуры тканей, температуры крови, плотность крови, удельное сопротивление и теплопроводность тканей, частоту тока, время абляции и другие параметры, которые были взяты из библиотеки, встроенной в программную среду [5]. Модель тканей представляла собой большой цилиндр, вдоль центральной линии которого размещался зонд, так что его электроды попадали в область с опухолью. Моделирование локализованного нагрева ткани, проводилось с применением двух типов зондов – игольчатого и четырехлучевого, с разными радиусами крючков электродов. Выбор формы зонда, используемого для моделирования, обусловлен условием создания более крупных по объему зон термического повреждения. Моделирование проводилось при условии изменения значения напряжения источника тока в диапазоне от 20 до 50 В с шагом 2 В. Учет перфузии в тканях происходил за счет включения в модель крупного кровеносного сосуда, представляющего собой малый цилиндр определенных размеров.

При проведении процедуры РЧА необходимо достижение и поддержание во всем целевом объеме температуры от 50 °C до значения близкого к 100 °C определенное время. Области ткани, нагретые уже до 50 °C, имеют стопроцентную степень повреждения, а максимальная температура нагрева ткани не должна достигать 100 °C во избежание обугливания ткани на концах электрода.

В результате моделирования были определены значения максимальных температур при абляции с использованием зондов двух типов. Построены фракции некротической ткани вокруг зондов разной геометрии, позволяющие определить спад степени повреждения здоровой ткани вблизи зоны термического воздействия (рис.1). Построена геометрия коагулированной ткани нагретой до 50 °C при использовании зондов двух типов, позволяющая судить об охвате целевого объема, попадающего под термическое

повреждение.

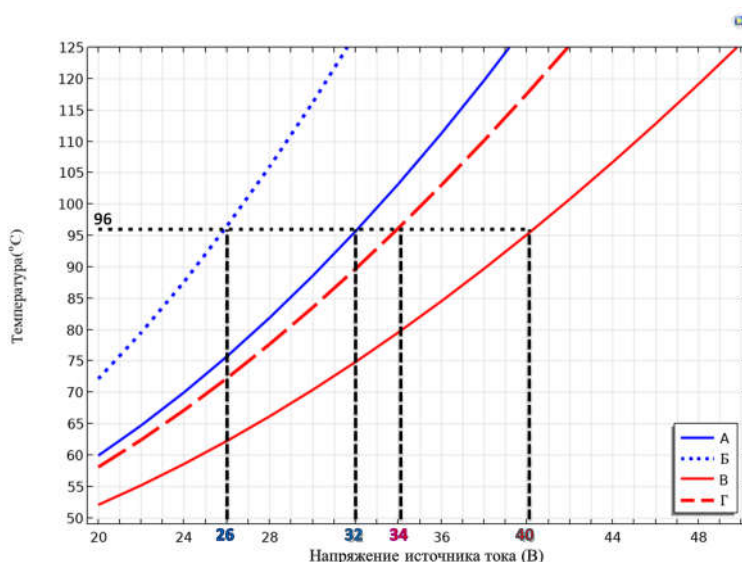


а) игольчатый; б) четырехлучевой

Рис. 1. Фракции некротической ткани печени вокруг зондов.

Таким образом, моделирование термического распространения показало, что близкое к 100°C значение максимальной температуры нагрева ткани, наибольшая область некроза при РЧА и быстрый спад степени повреждения здоровой ткани вблизи опухоли достигается при использовании четырехлучевого зонда с внешним радиусом крючков электродов 7,5 мм и внутренним радиусом 0,3 мм. Применение данного зонда является оптимальным для проведения РЧА опухолей размером 16×7 мм в ткани печени и размером 19×9 мм в ткани почки.

Для четырехлучевого зонда с выше указанными геометрическими размерами проведено моделирование распределения температуры в тканях печени и почки при условии изменения значения напряжения источника тока в диапазоне от 20 до 50 В с шагом 2 В с учетом и без учета тканевой перфузии. На основании полученных результатов построены графики зависимости температуры от напряжения источника для двух моделей – с учетом перфузии в ткани и без ее учета (рис. 2).



А – ткань печени с учетом перфузии; Б – ткань печени без учета перфузии;

В – ткань почки с учетом перфузии; Г – ткань почки без учета перфузии

Рис. 2. График зависимости температуры в ткани от напряжения источника тока.

Определено, что для четырехлучевого зонда температура в ткани печени достигается 96°C при 32 В с учетом перфузии тканей и при 26 В без ее учета. В ткани почки – при 40 В с учетом перфузии тканей и при 34 В без её учета. По полученным зависимостям видно, что в тканях печени и почки температура близкая к 100°C , а именно 96°C , рядом с концами электродов в моделях без учета тканевой

перфузии достигается при меньшем значении напряжения источника тока, чем в моделях с учетом тканевой перфузии. Это говорит о том, что использование зависящих от перфузии тканей в конечно-элементных моделях может давать существенно отличающиеся результаты. Меньшее значение электропроводности ткани почки требует большего напряжения источника тока для достижения максимальной температуры нагрева ткани. По результатам моделирования процесса РЧА построены зависимости изменения объема зоны некротической ткани (печени и почки) от времени проведения процедуры, из которых видно, что за первые 2-3 мин. проведения РЧА происходит интенсивный рост объема зоны некроза, независимо от вида ткани. С последующим увеличением времени процедуры рост объема некроза замедляется и начиная с 8 мин. термического воздействия зависимости выходят на насыщение. Поскольку при абляционной терапии необходимо достижение и поддержание температуры от 50 °С до 96 °С не менее 6 мин. во всем целевом объеме, то можно сделать вывод, что оптимальное время для продолжительности радиочастотной абляции составляет 8-10 мин. вне зависимости от вида ткани.

Моделированием термического распространения в тканях печени и почки, показано, что максимальная температура нагрева ткани, наибольшая область некроза при РЧА и быстрый спад степени повреждения здоровой ткани вблизи опухоли достигается при использовании четырехлучевого зонда. Меньшее значение электропроводности ткани почки требует большего напряжения источника тока для достижения максимальной температуры нагрева ткани. Оптимальное время проведения РЧА с использованием четырехлучевого зонда для получения максимального объема некротической ткани опухоли, в котором достигается требуемый диапазон температур, составляет 8-10 минут, независимо от вида ткани. За одинаковый промежуток времени проведения РЧА образование большего объема некротической ткани почки обусловлено большим значением теплопроводности, чем для ткани печени.

Таким образом, имея реальные размеры опухоли, например, по КТ-снимкам, можно методом моделирования подобрать необходимую форму электродов зонда и значение напряжения источника тока, чтобы эффективно разрушить опухолевую ткань с учетом создания свободной зоны, не допустив обугливания здоровой ткани.

-
1. Долгушин Б.И., Косырев В.Ю., Рампрабанант С. Радиочастотная абляция в онкологии // Практическая Онкология. 2007. Т. 8. № 4. С. 219-225.
 2. Shah D., Green S., Elliot A., McGahan J., Khatri V. Current oncologic applications of radiofrequency ablation therapies // World J Gastrointest Oncol. 2013. Т. 5. № 4. С. 71-80.
 3. Lencioni R., Pina C. D., Cioni D., Crocetti L. Biopsy technique and RF ablation // Clinical Ultrasound. 2011. Т. 1. №11. С. 171-174.
 4. Chang I. Finite Element Analysis of Hepatic Radiofrequency Ablation Probes using Temperature-Dependent Electrical Conductivity // BioMed Eng OnLine. 2003. Т. 2. № 12. С. 1-18.
 5. Comsol.com: офиц. сайт. Режим доступа: <https://www.comsol.com/blogs/study-radiofrequency-tissue-ablation-using-simulation>.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

Д.Л. Ворона, И.В. Верхотурова

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

rusia@mail.ru

Разработанная модель процесса теплопередачи позволяет получить температурный профиль экранно-вакуумной теплоизоляции, необходимый для вычисления коэффициента удельного термического сопротивления и результирующего теплового потока через экранно-вакуумную теплоизоляцию. Полученные результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными.

Экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ) относится к числу востребованных и эффективных средств пассивного терморегулирования космического аппарата [1]. Материалы, используемые при производстве экранов ЭВТИ и прокладочных элементов, варьируются в зависимости от требуемого рабочего температурного диапазона. Теплопередача через ЭВТИ представляет собой процесс, включающий три основных механизма: радиационный теплообмен, теплопроводность через элементы конструкции и теплопередачу остаточными газами в межэкрановом пространстве. Конструктивные особенности ЭВТИ специально разработаны для максимального подавления каждого из этих механизмов переноса тепла. Ключевыми параметрами при тепловых расчётах ЭВТИ выступают терморadiационные характеристики применяемых материалов, количество и толщина изоляционных слоёв и экранов, определяющих эффективную теплопередачу, а также температурные градиенты между облицовочным слоем ЭВТИ и его последним экраном, температура которого должна соответствовать температуре защищаемой поверхности [1 – 3]. Однако, не всегда возможно прямое измерение терморadiационных характеристик конструкций ЭВТИ, особенно имеющих разное сочетание материалов экранов ЭВТИ, облицовочных и разделительных слоев. При разработке новой конструкции ЭВТИ и оценке ее эффективности важно знание значения температуры первого экрана ЭВТИ, которое необходимо для расчета результирующего теплового потока через ЭВТИ, удельного термического сопротивления, а также определения возникновения «парникового эффекта» между облицовочным слоем и первым экраном ЭВТИ [4].

В данной работе представлены результаты моделирования в среде COMSOL Multiphysics процесса теплопередачи в ЭВТИ при воздействии внешнего теплового источника на облицовочный слой. Температурный профиль показывает распределение температуры от облицовочного слоя до последнего экрана ЭВТИ и позволяет определить температуру первого слоя экрана ЭВТИ.

При разработке 3D-модели ЭВТИ использовался подход, сочетающий трехмерное геометрическое моделирование многослойной структуры с мультифизическим анализом теплопередачи через взаимосвязанные интерфейсы *Heat Transfer in Solids* и *Surface-to-Surface Radiation*, объединенные связкой *Heat Transfer with Surface-to-Surface Radiation*. Моделирование проводилось во временном интервале в шесть часов, что соответствует характерному периоду установления стационарного теплового режима, завершению основных процессов дегазации и достижению равновесного состояния в условиях космического пространства. При моделировании использованы материалы из встроенной библиотеки среды COMSOL Multiphysics, физические характеристики которых соответствуют описанным в исследова-

ниях [1 – 4], что обеспечивало корректность последующего сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными данными. В качестве граничного условия задавалось тепловое воздействие на облицовочный слой ЭВТИ в виде прямого солнечного излучения с характерной для околоземной орбиты плотностью теплового потока 1400 Вт/м^2 , соответствующего положению космического аппарата на освещенном участке орбиты. Данное воздействие определяло стационарное температурное поле внешнего защитного слоя, принимаемое в качестве начального условия. Также предполагалось, что в условиях высокого вакуума вклад газовой теплопроводности в межслойном пространстве экранов ЭВТИ пренебрежимо мал.

Процесс теплопередачи исследовался на нескольких моделях. Модели 1 и 2 (рис. 1) представляли собой ЭВТИ, состоящие из: облицовочного слоя (кевлар); тонких металлизированных слоев (алюминий), расположенных над поверхностью каждого экрана ЭВТИ; десяти экранов (каптон) ЭВТИ; тонкого прокладочного материала (кварцевое волокно), который расположен между каждым экраном ЭВТИ. В модели 2 дополнительно присутствовал воздушный зазор между облицовочным слоем и первым экраном ЭВТИ. Между остальными экранами ЭВТИ в обоих моделях воздушные зазоры отсутствовали. На рис. 1 представлен температурный профиль моделей 1 и 2, показывающий распределение температур от внешнего облицовочного слоя, подверженного солнечному излучению, до последнего экрана ЭВТИ.

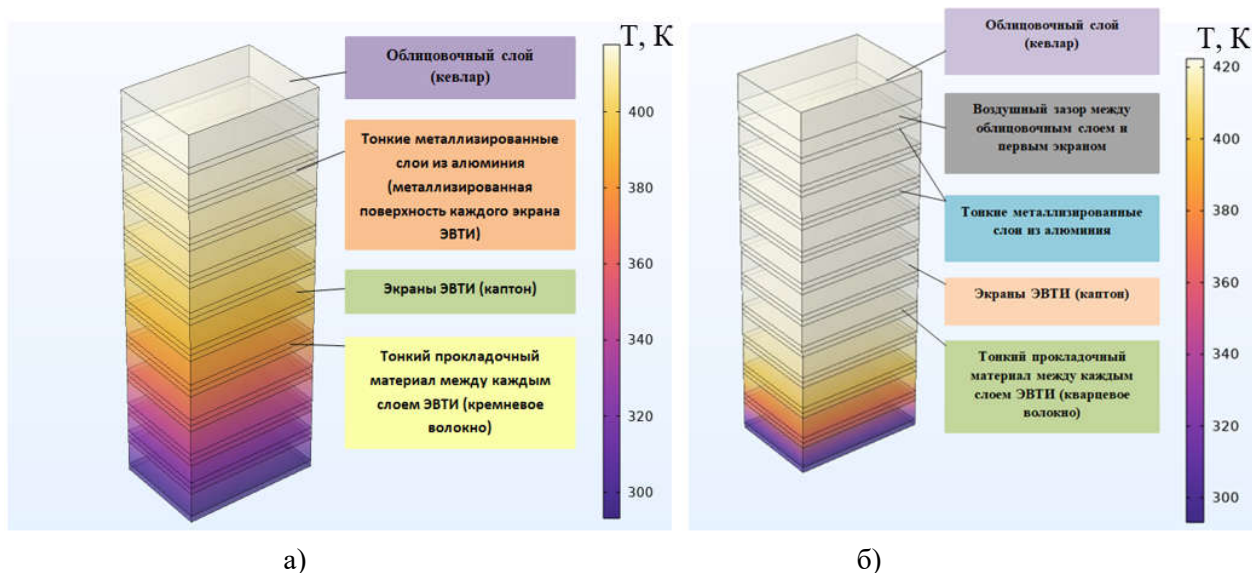


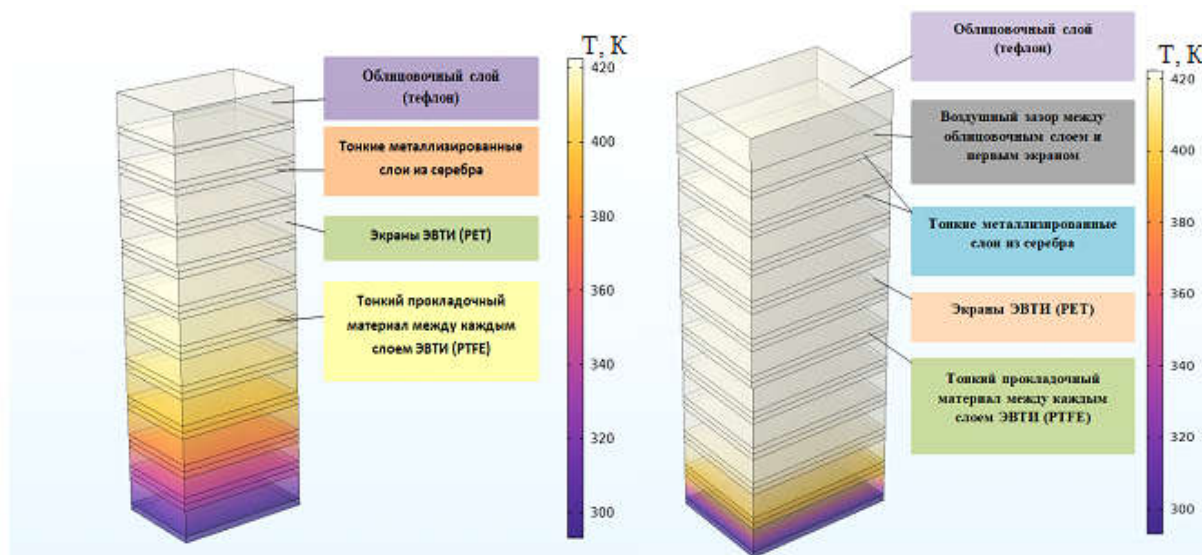
Рис. 1. Температурные профили моделей 1 (а) и 2 (б).

Модели 3 и 4 (рис. 2) представляли собой ЭВТИ, состоящие из: облицовочного слоя (тефлон); тонких металлизированных слоев (серебро); десять экранов (полиэтилентерефталата (PET)) ЭВТИ; тонкого прокладочного материала (политетрафторэтилена (PTFE)). В модели 4 также дополнительно присутствовал воздушный зазор между облицовочным слоем и первым экраном ЭВТИ. Между остальными экранами ЭВТИ в обоих моделях воздушные зазоры отсутствуют. На рис. 2 представлен температурный профиль моделей 3 и 4.

На основе полученных путем моделирования температурах первого и последнего экранов ЭВТИ произвели вычисления параметров эффективности данных моделей, а именно результирующий тепловой поток и удельное термическое сопротивление (таблица).

Из полученных результатов видно, что значения удельного термического сопротивления $R_{уд}^3$ во всех четырех моделях согласуются с экспериментальными данными работы [4] и входят в характерный диапазон удельного термического сопротивления ЭВТИ (от 30 до $250 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$) космических аппаратов. Значения удельного результирующего теплового потока $q_{рез}$ не сильно различаются при изменении материалов, используемых для конструкции ЭВТИ. Значения температуры первых экранов в мо-

делях 1 и 3 находятся в требуемом диапазоне рабочего предела температур первого экрана ЭВТИ (от 110 °С до 115 °С). В моделях 2 и 4 с воздушным зазором видно, что значения температур первых экранов превышают верхний рабочий предел температур, что свидетельствует о возникновении «парникового» эффекта, приводящего к перегреву конструкции и быстрому выходу из строя всего ЭВТИ. Так же в модели 1 наблюдётся плавное снижение температуры от облицовочного слоя до защищаемой поверхности, позволяющее увеличить срок эксплуатации космического аппарата на орбите.



а) б)
Рис. 2. Температурные профили моделей 3 (а) и 4 (б).

Сравнительная характеристика параметров моделей

Параметр	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4
Температура первого экрана ЭВТИ t , °С	107	127	112	130
Удельный результирующий тепловой поток через ЭВТИ $q_{рез}$, Вт/м ²	1,4	1,7	1,5	1,8
Удельное термическое сопротивление $R_{уд}^э$, (м ² ·К)/Вт	57,1	58,8	56,6	57,2

Таким образом, путем компьютерного моделирования процесса теплопередачи можно подобрать подходящие материалы для конструкции ЭВТИ, смоделировать одновременный процесс теплопередачи несколькими видами и дать предварительную оценку эффективности конструкции ЭВТИ без прямого измерения теплофизических характеристик. Из рассмотренных моделей наиболее подходящий набор материалов для ЭВТИ представлен в модели 1, благодаря оптическим и терморadiационным характеристикам выбранных материалов.

1. Басынин, В.В. Методика испытаний по определению термического сопротивления образцов ЭВТИ / В.В. Басынин; Ф.В. Танасиенко, А.А. Кишкин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2013. – №9.
2. Сенченков, В.С. Тепловая защита систем летательного аппарата с помощью ЭВТИ. Анализ тепловых характеристик / В.С. Сенченков; Москва, Современные инновации. – 2016. – 208 с.
3. Юртаев, Е.В. Упрощенная тепловая математическая модель многослойной экранно-вакуумной теплоизоляции / Е.В. Юртаев, А.В. Убиенных, А.П. Колесников // Решетневские чтения. Мат. XVIII междунар. науч. конфер. – Красноярск: СГАУ им. академ. М.Ф. Решетнева, 2014. – С 117-118.

4. Пат. 2397926 Российской Федерации МПК B64G 1/58, 2006.01. Экранно-вакуумная теплоизоляция космического аппарата с внешним комбинированным покрытием / В.Ф. Аристов; ООО «Научно-исследовательский институт космических и авиационных материалов» – № 2008125256/11; Заявл. 24.06.2008; Опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24.

УДК: 539.14.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗАННОГО СОСТОЯНИЯ ЯДРА ${}^6\text{He}$ В ПОДХОДЕ SS-HORSE–NCSM

М.К. Ефименко¹, А.И. Мазур¹, И.А. Мазур², А.М. Широков³, И. Дж. Шин⁴

¹Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

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

³Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобелева Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (г. Москва)

⁴Institute for Rare Isotope Science, Institute for Basic Science (Daejeon, Republic of Korea)

Методом SS-HORSE–NCSM определена энергия связи E_b ядра ${}^6\text{He}$ в закрытом канале распада на три фрагмента (ядро ${}^4\text{He}$ и два нейтрона) относительно порога этого распада. Полученный результат $E_b = -1,037 \pm 0,012$ МэВ находится в разумном согласии с экспериментальными данными $E_{\text{exp}} = -0,973$ МэВ.

Введение

Метод SS-HORSE [1 – 4] основан на осцилляторном представлении уравнений рассеяния [5, 6] и позволяет анализировать как резонансное, так и нерезонансное рассеяние, и производить оценку параметров этих процессов на основе вариационных расчётов, проведённых в модельных пространствах со сравнительно небольшим осцилляторным базисом. При этом для анализа резонансных и нерезонансных процессов достаточно знать набор собственных значений матрицы гамильтониана, рассчитанных в модельных пространствах с различными значениями параметра осцилляторного базиса $\hbar\omega$. Входными данными в методе SS-HORSE–NCSM служат результаты расчетов в модели оболочек без инертного кора (англ. No Core Shell Model, NCSM) с реалистическими NN-потенциалами. В расчетах мы использовали NN-потенциал Daejeon16 [7].

В этом подходе исследованы резонансные состояния ядер ${}^5\text{He}$ и ${}^5\text{Li}$ в упругом рассеянии нуклонов на ядре ${}^4\text{He}$ [8, 9] и для ядра ${}^9\text{Li}$ [10] для случаев двухтельного континуума.

Расширение метода HORSE на случай демократического распада представлено в работе [11]. Обобщенный метод SS-HORSE–NCSM применен к исследованию резонансного состояния системы четырех нейтронов (тетранейтрона) на основе результатов NCSM с разными реалистическими нуклон-нуклонными потенциалами [12, 13]. Существование тетранейтрона экспериментально подтверждено в исследованиях [14, 15].

В случае демократического распада на нечетное число фрагментов эффективный орбитальный момент принимает полуцелые значения, что требует дополнительного развития математического формализма SS-HORSE–NCSM [16].

Целью же этой работы является применение метода SS-HORSE–NCSM для определения энергии связанного состояния ядра ${}^6\text{He}$ в закрытом канале распада на три фрагмента (ядро ${}^4\text{He}$ и два нейтрона) относительно порога этого распада.

Метод SS-HORSE для связанных состояний

Для обобщения метода SS-HORSE на случай демократических (такого, что ни одна из подсистем не образует связанных состояний) распадов на несколько тел [11] используют разложение волновой функции относительного движения A тел по гиперсферическим гармоникам [17], что подразумевает преобразование координат относительного движения фрагментов в совокупность гиперрадиуса (1) и гиперуглов.

$$\rho = \sqrt{\sum_{i=1}^A (r_i - R)^2}, \quad (1)$$

где r_i – радиус-векторы тел; R – радиус-вектор центра масс.

Волновая функция ищется в виде разложения по собственным функциям $(3A - 4)$ -мерной сферы (гиперсферическим гармоникам), которые характеризуются гипермоментом K ($K = K_{\min}, K_{\min} + 2, \dots, K_{\min} \geq 0$ – целое) и совокупностью других квантовых чисел, необходимых для однозначного определения состояния рассеяния.

При разложении по гиперсферическим гармоникам уравнение Шредингера превращается в систему радиальных уравнений, которая эквивалентна системе уравнений для многоканального рассеяния с единым порогом для всех каналов. Каждое уравнение имеет центробежный барьер $\mathcal{L}(\mathcal{L} + 1)/\rho^2$, где $\mathcal{L}$ – эффективный угловой момент, связанный с гипермоментом формулой (см., например, [11]):

$$\mathcal{L} = K + \frac{3A-6}{2}. \quad (2)$$

Мы используем минимальное приближение демократического распада с одной гиперсферической гармоникой $K = K_{\min}$, так как более высокие гиперсферические гармоники подавлены в силу большого центробежного барьера.

В таком приближении S -матрица рассеяния определяется как

$$S(E_\nu) = \frac{c_{N_{\max}+2,\mathcal{L}}^{(-)}(E_\nu)}{c_{N_{\max}+2,\mathcal{L}}^{(+)}(E_\nu)}, \quad (3)$$

где $N_{\max}$ – максимальное число осцилляторных квантов (в SS-HORSE этот параметр определяет размер модельного пространства); E_ν – собственная энергия, $c_{N,\mathcal{L}}^{(\pm)}(E) = \mathcal{S}_{N,\mathcal{L}}(E) \pm \mathcal{C}_{N,\mathcal{L}}(E)$, регулярные и нерегулярные осцилляторные решения определяются соотношениями [11]:

$$\mathcal{S}_{N,\mathcal{L}}(E) = \sqrt{\frac{2n!}{\lambda \Gamma(n+\mathcal{L}+\frac{3}{2})}} q^{\mathcal{L}+1} \exp\left(-\frac{q(E)^2}{2}\right) L_n^{\mathcal{L}+\frac{1}{2}}(q(E)^2), \quad (4)$$

$$\mathcal{C}_{N,\mathcal{L}}(E) = -\frac{2q}{\pi \mathcal{S}_0^{\mathcal{L}}} \mathcal{P} \int_0^\infty \frac{\mathcal{S}_0^{\mathcal{L}}(q') \mathcal{S}_N^{\mathcal{L}}(q(E))}{q(E)^2 - q(E')^2} dq', \quad (5)$$

где $q = \sqrt{2E/\hbar\omega}$ – безразмерный импульс.

Положение полюса S -матрицы при отрицательных энергиях соответствует энергии связанного состояния.

Стоит отметить, что при использовании метода SS HORSE, а именно выражения (3), можно получить значение S -матрицы только при $E = E_\nu$. Для получения результатов в большем диапазоне энергий, необходимо рассчитать S -матрицу для нескольких модельных пространств и нескольких значений $\hbar\omega$, после чего – параметризовать полученные результаты для получения гладкой зависимости $S(E)$.

Результаты и выводы

Основой для расчётов послужили данные NCSM для реалистического NN взаимодействия для Daejeon16 [7] для $N_{\max} = 12, 14, 16$ и 18 .

Преобразуем выражение (3)

$$S(E_\nu) = \frac{c_{n_{\max}+1,\mathcal{L}}^{(-)}(E_\nu)}{c_{n_{\max}+1,\mathcal{L}}^{(+)}(E_\nu)} = \frac{c_{N,\mathcal{L}}(E_\nu) - i\mathcal{S}_{N,\mathcal{L}}(E_\nu)}{c_{N,\mathcal{L}}(E_\nu) + i\mathcal{S}_{N,\mathcal{L}}(E_\nu)} = 1 - \frac{2i c_{N,\mathcal{L}}(E_\nu) \mathcal{S}_{N,\mathcal{L}}(E_\nu)}{c_{N,\mathcal{L}}^2(E_\nu) - \mathcal{S}_{N,\mathcal{L}}^2(E_\nu)}. \quad (6)$$

Очевидно, что наличие и положение полюса S-матрицы полностью определяется её мнимой частью. Поэтому удобно будет параметризовать не $S(E)$, а $\text{Im}(S(E))$ (рис. 1).

Результаты, представленные на рис. 1 были параметризованы выражением:

$$f = \frac{a_0}{E - a_1} + a_2 + a_3E + a_4E^2, \quad (7)$$

которое имеет полюс при $E = a_1$. Соответствующие значения энергии для каждого из модельных пространств представлены в таблице.

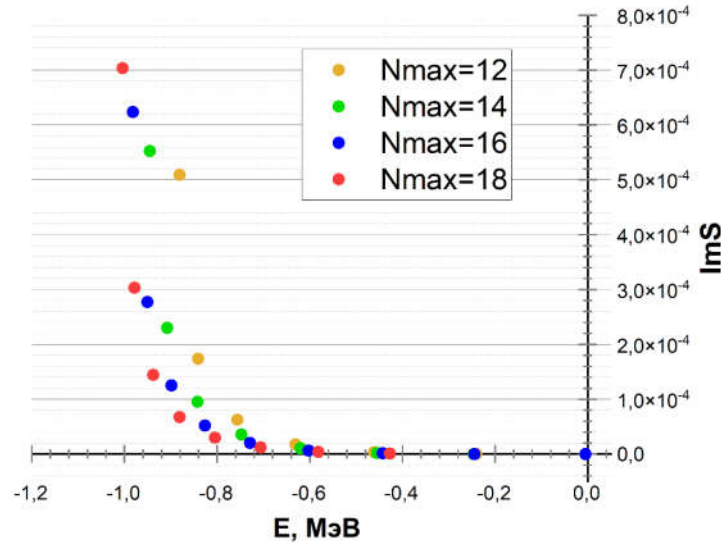


Рис. 1: Значения $\text{Im}(S(E))$ для основного состояния ${}^6\text{He}$, полученные методом SS-HORSE на основе данных NCSM для реалистического NN взаимодействия для Daejeon16 для $N_{\text{max}} = 12, 14, 16$ и 18 .

Энергия основного состояния для различных модельных пространств

N_{max}	12	14	16	18
E_0 , МэВ	-0,903	-0,978	-1,014	-1,027
Эмпирическая экстраполяция В, МэВ	-0,985	-1,015	-1,025	-1,037
Эксперимент [18], МэВ	-0,973			

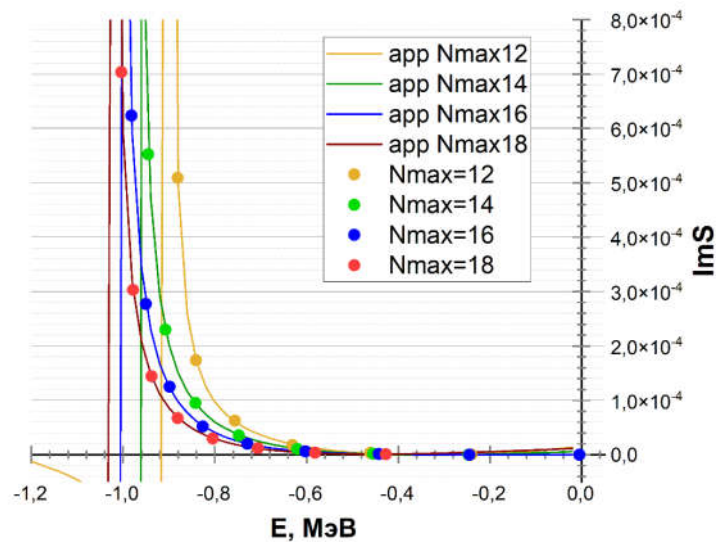


Рис. 2: Параметризация $\text{Im}(S(E))$ для основного состояния ${}^6\text{He}$ с использованием выражения (7).

Полученные результаты для связанного состояния можно сравнить как с экспериментальными данными [18], так и с Эмпирической экстраполяцией В [19] для расчётов NCSM и аналогичных модельных пространств. Они демонстрируют сходимость и неплохо согласуются друг с другом.

Работа М. К. Ефименко и А. И. Мазура выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 0818-2020-0005). Работа И. А. Мазура поддержана Институтом фундаментальных наук Республики Корея (IBS-R031-D1).

-
1. M. Shirokov and all. “Shell model states in the continuum”. Phys. Rev. C94 (6 2016), с. 064320.
 2. I. A Mazur and all. “Description of Resonant States in the Shell Model”. Part. Nucl. 48.1 (2017), с. 84 – 89.
 3. L. D. Blokhintsev and all. “SS-HORSE Method for Analysis of Resonances: Charged Particle Scattering”. Physics of Atomic Nuclei 80.6 (2017), с. 1093-1105.
 4. L. D. Blokhintsev and all. “SS-HORSE method for studying resonances”. Physics of Atomic Nuclei 80.2 (2017), с. 226 – 236.
 5. Y. Smirnov and Y. Nechaev. “The elements of scattering theory in the harmonic oscillator representation”. Kinam 4.4 (1982), с. 445 – 458.
 6. J. M. Bang and all. “P-Matrix and J-Matrix Approaches: Coulomb Asymptotics in the Harmonic Oscillator Representation of Scattering Theory”. Ann. Phys. (NY) 280 (2000), с. 299 – 335.
 7. A.M. Shirokov and all. “N3LO NN interaction adjusted to light nuclei in ab exitu approach”. Physics Letters B 761 (2016), с. 87 – 91.
 8. I. A. Mazur and all. “SS-HORSE extension of the no-core shell model: Application to resonances in ${}^7\text{He}$ ”. Physical Review C 106.6 (2022), с. 064320.
 9. A. I. Mazur и др. “Description of Continuum States within the No-Core Shell Model: Single-State HORSE Method”. Phys. At. Nucl. 82.5 (2019), с. 537 – 548.
 10. I. A. Mazur and all. “Bound and Resonant States of the ${}^9\text{Li}$ Nucleus with Daejeon16 Nucleon–Nucleon Interaction”. Physics of Atomic Nuclei 85.6 (2022), с. 823 – 835.
 11. С. А. Зайцев и др. “Трёхдиагональная параметризация взаимодействия в дискретном подходе к проблеме рассеяния”. ТМФ 115.2 (1998), с. 263 – 274.
 12. A. M. Shirokov and all. “Prediction for a Four-Neutron Resonance”. Phys. Rev. Lett. 117 (18 2016), с. 182502.
 13. A. M. Shirokov and all. “Tetraneutron resonance: Theory”. AIP Conf. Proc. 2038.1 (2018).
 14. K. Kisamori and all. “Candidate Resonant Tetraneutron State Populated by the ${}^4\text{He}({}^8\text{He}, {}^8\text{Be})$ Reaction”. Phys. Rev. Lett. 116 (2016), с. 052501
 15. M. Duer and all. “Observation of a correlated free four-neutron system”. Nature (London) 606 (2022), с. 678.
 16. I. A. Mazur and all. “Trineutron resonances in the SS-HORSE extension of the No-Core Shell Model”. Phys. Rev. C 110 (2024), с. 014004.
 17. Реваз Ильич Джигути и Нина Борисовна Крупенникова. Метод гиперсферических функций в квантовой механике нескольких тел. Мецниереба. Тбилиси, 1984.
 18. D. R. Tilley, C. M. Cheves, J. L. Godwin, G. M. Hale, H. M. Hofmann, J. H. Kelley, C. G. Sheu, and H. R. Weller, Nucl. Phys. A 708, 3 (2002).
 19. P. Maris, J. Vary, A. Shirokov. Physical Review C. 79. 014308 (2008).

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССОВ «ОБУЧЕНИЯ МАШИН»**В.С. Заборовский, Л.В. Уткин, А.В. Филимонов***Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург)**vlad2tu@yandex.ru*

Пифагор разработал теорию гармонического ряда, которая является основой понимания того, почему музыка, как и геометрия, являются формами отражения объективных свойств физической реальности. Теория, которая была бы способна направлять разработку систем искусственного интеллекта (ИИ) на основе фундаментальных физических концепций, пока еще не создана. В докладе с современных позиций компьютерных наук и теоретической физики обсуждается эволюция цифровых реализаций глубоких искусственных нейронных сетей в направлении создания мультимодальных трансформеров больших языковых моделей - основы интеллектуальных технологий моделировании сложных физических процессов и «обучения» компьютерных систем. Отмечается, что проявляемая языковыми моделями склонность к галлюцинациям – правдоподобных, но физически невозможных решений, может рассматриваться с позиций термодинамики неравновесных открытых систем, которые обмениваясь с окружающей средой веществом и энергией, способны к объяснимой и физически реализуемой ответной реакции на внешние воздействия в форме изменения своей структуры. В докладе представлено экзо-интеллектуальное расширение архитектуры современных компьютеров-программных автоматов, которые предлагается рассматривать как информационно открытые физические системы, способные не только к индуктивному обучению на основе явно заданных цифровых данных, но и концептуальному обучению, что позволяет решить проблему регуляризации генеративных галлюцинаций больших языковых моделей на основе использования фундаментальных физических законов.

Введение

Трансформер – компьютерная архитектура, в которой стандартная модель программно-вычислительного взаимодействия по схеме «процессор-память» заменена на цифровую нейроморфную модель взаимодействия «энкодер-декодер». В основе этой модели лежит механизм внимания, реализованный без рекуррентности или свёрток, что позволяет обрабатывать длинные последовательности символьных данных. Этот механизм в деталях описан в статье Attention is all you need, выпущенной в 2017 году, и подробно проанализирован в [1]. Как с открытием законов механики, началось воплощение законов фундаментальной физики в процессы инженерного проектирования, так и изобретение механизма внимания стало началом применения больших языковых моделей в задачах искусственного интеллекта (ИИ). Надо заметить, что еще задолго до разработки таких моделей, делались неоднократные попытки рассмотрения алгоритмов машинного обучения с позиций физики, например, в контексте связи процессов обучения с моделью Изинга. Изобретение на основе теории спиновых стёкол сетей Хопфилда и применение для решения задач обучения так называемых машин Больцмана, были вполне успешны, что способствовало пониманию физики процессов обучения машин, а также выработки требований к системам искусственного интеллекта, построенных на искусственных сверточных нейронных сетях прямого распространения сигналов или автоэнкодеров, которые могли не только обучаться, но и даже имитировать процессы воспоминаний. Исследование процессов обучения в относительно простых, как биологических, так и механических системах, показали, что их рассмотрение возможно с позиций статистической механики, так как в таких системах наблюдаемые «процессы» обучения идут в сторону состояний с более низкой энергией. В результате все «воспоминания» располагаются в ниж-

ней части энергетических уровней системы, а «вспомнить» это значить как бы «скатиться» вниз по энергетическому спектру обучаемой системы. Концептуальная аналогия между нейронными сетями и хаотическими физическими системами стала также очевидна в том, что соотношение между вероятностью и гармоничностью системы аналогично соотношению вероятности и энергии в статистической физике и поэтому может быть выражена в рамках теории информации, а каждый запомненный такой системой образ имеет свой индивидуальный виртуальный энергетический паттерн. Предложенная в 1985 году генеративная модель машинного обучения на основе машины Больцмана рассматривала проблему обучения с точки зрения совпадения статистических распределений обучаемых примеров и генерируемых паттернов, а не критериев структурной похожести на основе прямого совпадения множества отдельных структурных элементов. В моделях машинного обучения, основанных на идеях статистической физики, нашли применение различные алгоритмы реконфигурации структур искусственных нейронных сетей, а именно:

- имитации отжига – физического процесса, происходящего при затвердевании расплавленных веществ и постепенного понижая значение параметра, который является аналогом физической «температуры», что позволяет перевести обучаемую систему к конфигурации, при которой её энергия минимальна;
- настройки конфигурации сетевых соединений в машине Больцмана таким образом, чтобы примеры паттернов, которые были переданы на нейроны при обучении, имели максимально возможную вероятность появления при обработке машиной новых входных последовательностей.

Исследования показали, что искусственные нейронные сети, основанные на идеях статистической физики и воплощенные с помощью компьютерных технологий, могут не только хранить, но воспроизводить изображения, а также другие типы материальных структур, поэтому в некотором смысле происходящие в них процессы аналогичны процессам в человеческом мозге. Однако, энергоинформационная эффективность таких систем существенно ограничена в силу необратимого характера процессов цифровых вычислений, происходящих в искусственных нейронах – сумматоров потока входных сигналов. Стало очевидным, что на фундаментальном уровне к процессам машинного обучения применим закон Ландауэра, сформулированный в 1961 году, и устанавливающий связь между информацией, понимаемой в смысле теории К. Шеннона, и тепловой энергией. Закон утверждает, что любое необратимое изменение информации (например, удаление бита данных) неизбежно приводит к выделению определённого количества тепла, что объясняет огромное потребление электроэнергии современной ИТ инфраструктурой. Поэтому изучение физики процессов цифровых вычислений и машинного обучения (Physics-informed Machine Learning, PIML), включая изменение архитектуры вычислителей и внедрение в алгоритмы машинного обучения:

- знаний о физических закономерностях;
 - выбор модели обучения таким образом, чтобы физические закономерности, например, симметрии, были ей автоматически присущи;
 - добавление знаний о физических законах и топологических свойствах аттракторов выходных траекторий модели в функцию потерь обучаемой модели;
- является основой дальнейшего развития компьютерных наук, в том числе и систем машинного обучения.

Было показано [4, 5] что гибридные композиционные лингвистические модели, воплощающие методы концептуального обучения, способны находить решения задач, которые обычно решаются аналитическими методами на основе фундаментальных законов физики. При этом в силу высокой вычислительной сложности для существующих цифровых компьютеров, практическое использование таких моделей и методов требует концептуального изменения архитектуры используемых в настоящее время вычислительных платформ и разработки новых алгоритмов.

Двойственность лингвистической характеристики физических систем

Очевидно, что тексты описания физической реальности на естественных языках являются ключевым источником информации для человека. Текстовая информация влияет на структуру памяти, функции внимания, аналитические способности и способности образовывать и хранить в долговременной памяти множество связей-ассоциаций между физическим представлением слов-символьных кодов и их смыслом, то есть семантикой. Естественный язык представляет собой сложную, мультимодальную, открытую и информационно-самоприменимую, а не программно-алгоритмически управляемую физико-механическую систему – «машину Тьюринга». Судя по всему, именно язык является фундаментальным носителем когнитивных функций человека, которые принципиально отличаются от аксиоматически определенных описаний математических функций, прежде всего тем, что отражают двойственность познавательных стратегий человеческого мозга, каждому полушарию которого свойственен особый способ обработки информации и регуляции результатов «вычислений». Двойственность предопределена структурой мозга, левое полушарие которого обеспечивает вербально-логическую, абстрактно-схематическую, сознательную (объяснительную) обработку и регуляцию данных, тогда как правое полушарие обеспечивает наглядно-образную, конкретную, синтетическую и бессознательную обработку информации. Хотя, как конкретно происходит процесс обработки семантической информации и как формируются когнитивные функции, науке пока неизвестно. Но композиционная архитектура процесса обработки очевидна, что позволяет в мозгу эффективно реализовать аналог процесса конкуренции между различными когнитивными функциями, например, между функциями индуктивного статистического восприятия и дедуктивным процессами концептуального обучения. Именно двойственность когнитивных функций отражает их открытую и конкурентную природу, что отличает их от аксиоматически заданных математических функций и, в конечном итоге, позволяет эффективно применять их в условиях:

- пространственно-временной неопределённости обрабатываемых данных, тогда как вероятностный подход, на котором основана современная стандартная математическая модель вывода систем машинного обучения, ограничивает возможности моделирования сценариев, основанных не на корреляционных, а на причинно-следственных (казуальных) моделях событиях;

- наличия фундаментальных ограничений современной теории алгоритмов, к которым относятся перечислимость, вычислимость и разрешимость множеств, следствия теорем Геделя, применимые к задачам моделирования когнитивных функций, а также отсутствие доказательства необходимых и достаточных условий применительно к проблеме алгоритмической сложности, при которых имеет место равенство $P=NP$;

- необходимости учёта вычислительной сложности алгоритмов как во времени, так и в пространстве в условиях, когда используемая модель должна быть: а) достаточно точной при реализации на ее основе процессов вычислений с помощью компьютера с конечной разрядной сеткой и б) формально определяемой как математический объект.

Формализация

Математические и алгоритмически вычислимы функции воплощают собой результаты формальных процессов аксиоматизации, которые на основе точного количественного значения аргументов позволяют вычислить и точное значение функции, но только тогда, когда и значения аргументов, и значения функции являются целыми числами. Если же аргумент и функция являются рациональными или иррациональными числами, то точное значение функции с помощью компьютеров с конечной разрядной сеткой невозможно. Когнитивные же функции, являясь атрибутом открытых и активных систем, позволяют не только определять количественные значения функции, но и сформировать сообщение, содержащее некий объем информации (в битах), который характеризует причинно-следственную

связь (семантику) между значением аргументов и значением функции. Принципиально важно, что аргументами когнитивных функций могут быть не только данные, полученная от органов чувств и/или цифровых датчиков, но и данные, основанные на прошлом опыте и хранящиеся в долговременной «векторной» памяти используемого экзо-интеллектуального вычислителя, а также результаты прогнозирования последствий от действий, которые еще не были реализованы, но лишь потенциально возможны. Очевидно, что естественные когнитивные функции в силу направленности на отражение причинно-следственной семантической связанности наблюдаемых событий, обладают ограниченной способностью представлять (кодировать) результаты, которые выражаются в терминах физических процессов, «описываемых на языке математики». Адекватность рассуждений и точность ответов, на которые способны современные генеративные LLM, ограничены структурой и количеством вычислительных ресурсов (объем памяти, скорость обмена информацией и производительность процессоров) и максимальным числом слов-токенов, используемых в запросе, которые лингвистическая модель может обработать. Перечисленные характеристики напрямую не связаны с семантикой генерируемой моделью ответа, а отражают статистический характер зависимостей и значимости конкретных слов в предложении, которые генерируются трансформером с учетом контекста обрабатываемого запроса (prompt) с помощью различных механизмов внимания: self/multi-head/multi query attentions. Переход к использованию агрегированных моделей, технологий концептуального обучения, а в перспективе и резервуарных вычислений, позволяет реализовать иерархию представлений сущностей-концептов, дескрипторы которых могут быть оценены с точностью до вероятности на основе входных данных, которые могут уточняться пользователем в режиме супервизора. Полученные в СКЦ «Политехнический» результаты (рис.1) можно рассматривать как физический прототип вычислительной системы, объединяющий возможностей естественного и искусственного интеллектов с принципами физической реализуемости путем перехода к экзо-интеллектуальным технологиям концептуального машинного обучения. Такой переход позволяет совместить процессы разработки новых алгоритмов и соответствующих программ с адаптацией к ним используемых вычислительных ресурсов, которые имеют мультимодальное концептуальное (абстрактное) описание, например, в формате табличных данных, а также описание на специальных языках программирования, используемых в системах высокоуровневого синтеза программируемых логических интегральных микросхем.

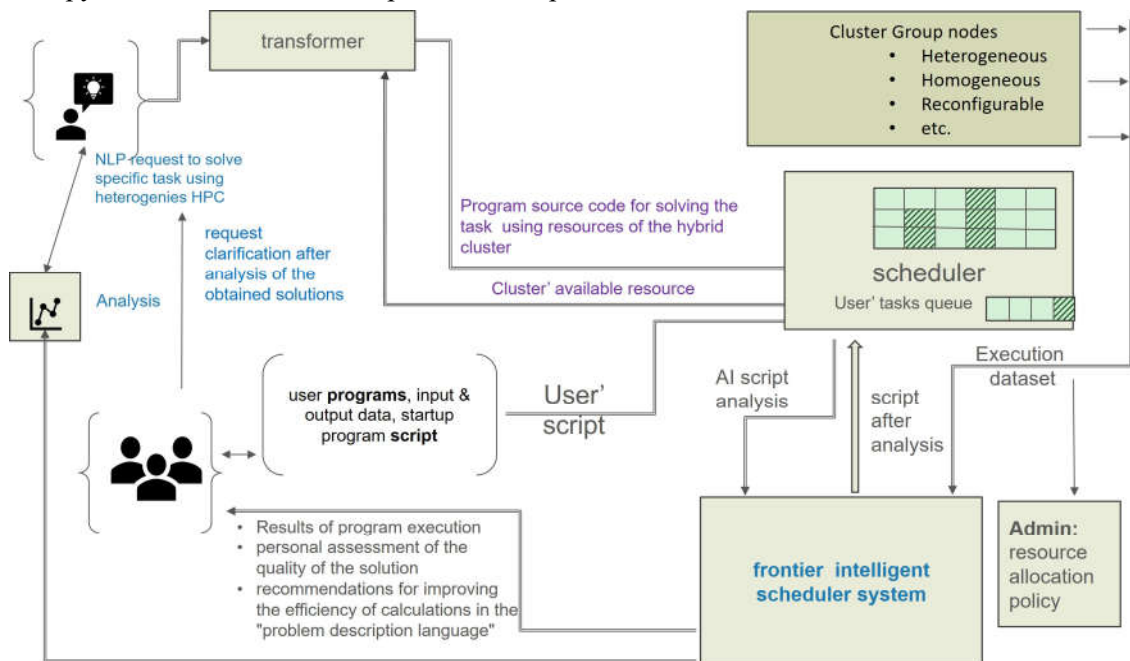


Рис. 1. Экзо-интеллектуальная структура системы коллективного пользования в СКЦ «Политехнический».

Модели внимания

Модель внимания представляет собой структурный компонент искусственной нейронной сети, который не использует формализм статистической физики, а построен по схеме «энкодер-декодер», предназначенный для адаптивного выделения информационных признаков путём назначения им весовых коэффициентов, пропорциональных их значимости для минимизации ошибки предсказания. Данный механизм допускает формальную интерпретацию в рамках модели ядерной регрессии Надарая–Уотсона. Если имеется обучающая выборка $S = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$ из n примеров, в которых $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{im}) \in \mathbb{R}^d$ – вектор d признаков, $y_i \in \mathbb{R}$ – отклик регрессии. Задача регрессионного анализа состоит в нахождении функции $f: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$, позволяющей для произвольного вектора признаков x предсказать значение отклика $\tilde{y} = f(x)$ на основе обучающего множества S . Аналогичная постановка применима к задаче классификации, где y_i принимают дискретные значения, соответствующие меткам классов. Ядерная регрессия Надарая–Уотсона относится к непараметрическим методам, где предсказание отклика $\tilde{y}$ для входного вектора $x \in \mathbb{R}^d$ вычисляется непосредственно через взвешенное среднее наблюдений из непосредственно заданной обучающей выборки S , без явного определения параметрической формы функции f .

Формально оценка имеет вид:

$$\tilde{y} = \sum_{i=1}^n \alpha(x, x_i) y_i, \quad (1)$$

где $\alpha(x, x_i)$ – вес внимания, который зависит от того, насколько вектор x близок к вектору x_i из обучающей выборки.

Вес $\alpha(x, x_i)$ определяется обычно при помощи ядра $K(x, x_i)$, в соответствии с которым, чем ближе x_i к x , тем больше значение ядра и тем больше, т.е. $\alpha(x, x_i)$ возрастает с уменьшением расстояния между x_i и x . С учетом нормировки можно записать выражение для веса внимания в следующем виде:

$$\alpha(x, x_i) = \frac{K(x, x_i)}{\sum_{j=1}^n K(x, x_j)}. \quad (2)$$

В частности, если используется гауссово ядро, то веса определяются через операцию «softmax» следующим образом:

$$\alpha(x, x_i) = \text{softmax}\left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{\tau}\right). \quad (3)$$

где τ – настраиваемый или обучаемый параметр, который в статистической физике аналогичен параметру температуры.

Если использовать терминологию, характерную для описания механизма внимания в лингвистических моделях, то вектор x , векторы x_i и отклики y_i называются запрос (*query*), ключи (*keys*) и значения (*values*) соответственно. На рис.2 процессам вычисления решений на основе использования стандартных программно-управляемых вычислительных блоков CPU, GPU и программно-реконфигурируемых блоков FPGA соответствует нижний уровень архитектуры, процессам, используемым для вычисления и долгосрочного хранения мем-векторов (*embedding*) результатов вычислений и обучающих данных, соответствует средний уровень, процессам генерации объяснения полученных результаты с точки зрения используемых концепций соответствует лингвистическая модель на основе деревьев решений.

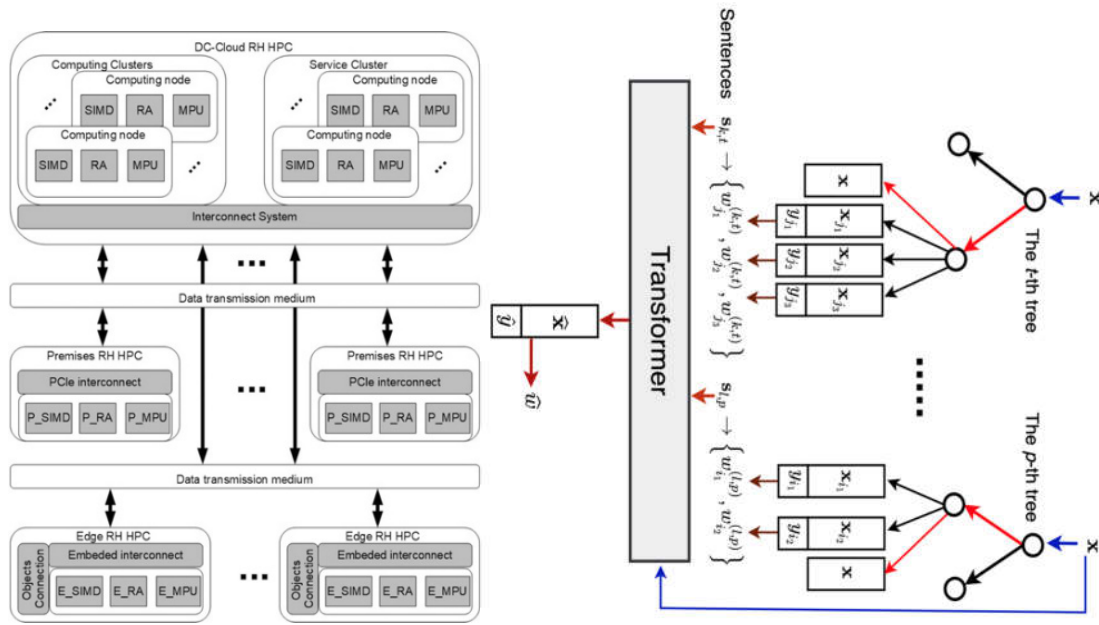


Рис. 2. Обобщенная архитектура пространство гибридных узлов-трансформеров.

Концептуальная характеристика результатов решения задач

Обучающий набор может быть представлен в виде набора троек (x_i, y_i, c_i) , $i = 1, \dots, n$. В отличие от набора данных S появляется набор из m концептов $c_i = (c_{i(1)}, \dots, c_{i(m)}) \in C$. В большинстве работ концепты представлены в виде вектора c_i с m бинарными элементами, где $c_{i(j)} = 1$ означает, что j -ый концепт присутствует в описании входного вектора x_i , а $c_{i(j)} = 0$ означает, что соответствующий концепт отсутствует. Цели концептуального обучения [5] заключается в поиске зависимости $h: X \rightarrow (C, Y)$ между концепциями и входными данными, а также в объяснение того, какие концепты, построенные на входных данных, ответственны за вычисленные предсказание. Применяемый подход направлен на объяснение, как предсказания зависят от концептов, описывающих физически реализуемые особенности входных данных. Поэтому функция h может быть представлена как функциональная композиция: функция $g: X \rightarrow C$ отображает входной вектор в пространство концепций; функция $f: C \rightarrow Y$ отображает концепты в выходные значения. Предсказание y для нового примера x может быть получено как $y = f(g(x))$. Одна из сложностей использования табличных данных при ограниченном наборе данных заключается в том, что, во-первых, нейронная сеть, реализующая кодер концептов, во многих случаях может быть переобучена, во-вторых, линейная структура предиктора, не учитывающая взаимодействие векторов концептов, не всегда позволяет получить корректное значение y . Поэтому ниже предлагается использование моделей внимания для реализации кодера и предиктора. Запишем модель внимания для предсказания вектора концептов [6,7]:

$$\tilde{c} = \sum_{i=1}^n \alpha(x, x_i, w) c_i, \quad (4)$$

где w – вектор обучаемых параметров веса внимания $\alpha(x, x_i, w)$; $\tilde{c}$ – вектор концептов на выходе кодера, соответствующий входному вектору x ; c_i – вектор концептов из обучающего множества, соответствующий вектору признаков x_i . Запишем также модель внимания для итогового предсказания y при условии, что получены оценки векторов концептов:

$$\tilde{y} = \sum_{k=1}^n \beta(\tilde{c}, c_k, v) y_k, \quad (5)$$

где v – вектор обучаемых параметров веса внимания $\beta(\tilde{c}, c_k, v)$; y_k – метка из обучающего множества, соответствующая вектору признаков x_k .

Важно также отметить, что во второй модели внимания используется вектор c_k из обучающей выборки, а не предсказание $\tilde{c}_k$. Объединяя обе модели, получим:

$$\tilde{y} = \sum_{k=1}^n \beta(\sum_{i=1}^n \alpha(x, x_i, w) c_i, c_k, v) y_k. \quad (6)$$

Функция потерь для обучения модели представляется как линейная комбинация двух функций потерь: функции потерь для концептов L_c и функции потерь для итоговых предсказаний L_y . Отсюда следует, что функция потерь L принимает вид:

$$L = \gamma L_c + (1 - \gamma) L_y. \quad (7)$$

где γ – гиперпараметр, который определяет, насколько важнее определение концептов по сравнению с определением итоговых предсказаний.

Используя квадратичную норму, функцию L_c можно представить как

$$L_c = \sum_{j=1}^n (\tilde{c}_j - c_j)^2 + R_c(w) = \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1, i \neq j}^n \alpha(x_j, x_i, w) c_i - c_j)^2 + R_c(w), \quad (8)$$

где $R_c(w)$ – регуляризационное слагаемое.

Выражение для функции L_y можно записать аналогичным образом:

$$L_y = \sum_{j=1}^n (\tilde{y}_j - y_j)^2 + R_y(v) = \sum_{j=1}^n (\sum_{k=1}^n \beta(\sum_{i=1, i \neq j}^n \alpha(x_j, x_i, w) c_i, c_k, v) y_k - y_j)^2 + R_y(v), \quad (9)$$

Приведенная функция потерь достаточно просто оптимизируется по параметрам w и v при помощи стандартного алгоритма градиентного спуска.

Задача квадратичной оптимизации

Рассмотрим определение весов внимания $\alpha(x, x_i, w)$ в виде, предложенном в работе [14]:

$$\alpha(x_j, x_i, w) = (1 - \epsilon) \cdot \text{softmax}\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{\tau}\right) + \epsilon \cdot w_i, \quad (10)$$

где τ – гиперпараметр; ϵ – параметр засорения, являющийся также гиперпараметром; $w = (w_1, \dots, w_n)$ – распределение вероятностей, $w_1 + \dots + w_n = 1$.

Этот вес внимания представляет собой распределение вероятностей в соответствии с моделью ϵ -засорения Хьюбера [15] и ее обобщением [16]. Аналогичным образом можно записать веса внимания $\beta(\tilde{c}, c_k, v)$:

$$\beta(\tilde{c}_j, c_k, v) = (1 - \theta) \cdot \text{softmax}\left(-\frac{\|c_i - \tilde{c}_j\|^2}{\sigma}\right) + \theta \cdot v_i, \quad (11)$$

где σ – гиперпараметр; θ – параметр засорения, являющийся также гиперпараметром; $v = (v_1, \dots, v_n)$ – распределение вероятностей, $v_1 + \dots + v_n = 1$.

Заметим, что веса внимания линейно зависят от обучаемых параметров w и v . Это означает, что задачу минимизации функции потерь можно свести к задаче квадратичной оптимизации с квадратичной функцией потерь и линейными ограничениями на распределения вероятностей $w_1 + \dots + w_n = 1$, $v_1 + \dots + v_n = 1$ и $w_i \geq 0$, $v_i \geq 0$, $i = 1, \dots, n$. Решение этой задачи всегда единственное, так как целевая функция выпуклая. Существует множество алгоритмов для решения таких задач.

Заключение

В работе рассмотрен подход к реализации моделей обучения на концептах на примере распределения ресурсов гибридных суперкомпьютерных кластеров, работающих в режиме центров коллективного пользования. Решение получено с использованием механизмов внимания и методов концептуального обучения моделей, что позволяет вычислять решения, отвечающие принятым концептуальным ограничениям. Предложенный подход позволяет преодолеть ключевые ограничения традиционных моделей машинного обучения, в том числе и тех, которые построены на основе реализации принципов термодинамики неравновесных открытых систем, требующих для обучения больших объёмов данных и испытывающих проблемы с адаптацией в условиях динамично меняющихся входных признаков. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением подхода на задачи с частично определёнными концептами, разработкой методов автоматического выделения концептов из таблич-

ных данных, исследованием устойчивости модели к зашумлённым и противоречивым экспериментальным данным, а также применения предложенной вычислительной платформы для решения задач синтеза новых материалов, медицинской диагностики и промышленной дефектоскопии.

-
1. Lee J.H., Lanza S., Wermter S. From neural activations to concepts: A survey on explaining concepts in neural networks // *Neurosymbolic Artificial Intelligence*, vol. 1, pp.NAI-240743, 2025.
 2. Mahinpei A., Clark J., Lage I., Doshi-Velez F., and Pan W. Promises and pitfalls of black-box concept learning models // *arXiv:2106.13314*, Jun 2021.
 3. Koh P.W., Nguyen T., Tang Y.S., Mussmann S., Pierson E., Kim B., Liang P. Concept bottleneck models // *International conference on machine learning*, pp. 5338–5348. PMLR, 2020.
 4. Forest F., Rombach K., Fink O. Interpretable prognostics with concept bottleneck models // *arXiv:2405.17575*. May, 2024.
 5. Konstantinov A. V., Utkin L. V. Multi-Attention Multiple Instance Learning // *Neural Computing and Applications*. – 2022. – Т. 34. – №. 16. – pp. 14029-14051.
 6. Zaborovsky, V. S., Utkin, L. V., Muliukha, V. A., & Lukashin, A. A. (2023). Improving Efficiency of Hybrid HPC Systems Using a Multi-agent Scheduler and Machine Learning Methods. *Supercomputing Frontiers and Innovations*, 10 (2), pp. 104–126. <https://doi.org/10.14529/jsfi230207>.
 7. V. S. Zaborovsky, L. V. Utkin, V. Muliukha, “Exo-intelligent hybrid supercomputer platforms for shared-use centers”, *Computing, Telecommunication and Control*, 17:3 (2024),

УДК 530.145,539.18,539.19

МАЛОАТОМНЫЕ КЛАСТЕРЫ ГЕЛИЯ И НЕОНА ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

Е.А. Колганова, А.А. Коробицин, О.П. Клименко, Д.И. Шалапинин

Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна)

Государственный университет «Дубна» (г. Дубна)

kea@theor.jinr.ru

В докладе обсуждаются связанные состояния двух- и трехатомных кластеров, состоящих из атомов He и Ne. Дается обзор экспериментальных и теоретических результатов, обсуждается возможность возникновения ефимовских состояний в рассматриваемых тримерах. Исследования трехатомных кластеров проводятся в рамках уравнений Фаддеева в конфигурационном пространстве.

Ван-дер-ваальсовские кластеры привлекают значительный интерес в последние десятилетия, поскольку их изучение помогает понять эволюцию свойств материалов от микроскопического уровня до объёмного вещества. Теоретические оценки спектров многоатомных молекул и кластеров в сравнении с экспериментом также дают большой объём информации о молекулярных свойствах систем. К простейшим квантово-механическим системам относятся ван-дер-ваальсовские двух- и трехатомные кластеры инертных газов, которые представляют собой идеальную возможность исследования слабосвязанных состояний благодаря своей химической инертности. Экспериментальные исследования димеров, тримеров и более крупных кластеров различных атомов, проводимые с помощью дифракционных экспериментов [1, 2] и спектроскопии высокого разрешения [3, 4], обеспечивают критически

важные ориентиры для уточнения как поверхностей потенциальной энергии, так и проверки методов квантового моделирования [5] и совершенствования подходов к машинному обучению [6]. Экспериментальные исследования стабильности Бозе-Эйнштейновских конденсатов позволяют пронаблюдать теоретически предсказанный эффект Ефимова, связанный с ростом числа связанных состояний при ослаблении эффективного парного взаимодействия между компонентами системы [7].

В нашей работе рассмотрены двух- и трехатомные кластеры, состоящий из атомов гелия и неона. Волновые функции и спектры двухатомных систем He_2 , HeNe , Ne_2 , вычислены используя нерелятивистское уравнение Шредингера с различными реалистическими межатомными потенциалами ван-дер-ваальсовского типа. Слабое взаимодействие Ван-дер-Ваальса и малая энергия связи этих димеров исключительно чувствительны к тонким квантовым эффектам, что делает их ценными тестовыми системами для теоретических моделей и вычислительных методов. Так, все используемые потенциальные модели дают единственное околопороговое состояние димера $^4\text{He}_2$ с энергией связи 1,62 мК, что соответствует недавно полученному экспериментальному значению $1,76 \pm 0,15$ мК [8]. Такая слабая связь позволяет двум атомам гелия находиться в связанном состоянии только с нулевым угловым моментом. Возбужденные же уровни (вращательные или колебательные) у этой системы отсутствуют. Поскольку масса атома ^3He на четверть меньше массы атома ^4He , реалистические He-Ne-потенциалы не поддерживают связанных состояний ни у одной из двухатомных систем $^3\text{He}-^3\text{He}$ и $^3\text{He}-^4\text{He}$.

В каждом из димеров $^4\text{He}^{20}\text{Ne}$ и $^4\text{He}^{22}\text{Ne}$ найдено три состояния с угловым моментом $J = 0, 1$ и 2 с энергиями, приведенными в таблице в сравнении с недавними экспериментальными данными из работы [9]. Теоретическое значение для энергии связи $^4\text{He}^{20}\text{Ne}$ хорошо согласуется с экспериментальным, для изотопно-замещенного димера $^4\text{He}^{22}\text{Ne}$ энергия связи отличается, что, по-видимому, связано с большой статистической погрешностью измерения. В системе $^{20}\text{Ne}_2$ также были найдены три состояния с энергиями 24,2 К, 4,4 К и 0,02 К, которые хорошо согласуются с экспериментом [10].

Энергии связи $|E_J|$ димеров $^4\text{He}^{20}\text{Ne}$ и $^4\text{He}^{22}\text{Ne}$ в Кельвинах

$ E_J $	$^4\text{He}^{20}\text{Ne}$ расчет	$^4\text{He}^{20}\text{Ne}$ эксп.[9]	$^4\text{He}^{22}\text{Ne}$ расчет	$^4\text{He}^{22}\text{Ne}$ эксп.[9]
$ E_{J=0} $	3,7138	$3,71 \pm 0,15$	3,7878	$4,6 \pm 0,8$
$ E_{J=1} $	2,6927	–	2,7762	–
$ E_{J=2} $	0,7647	–	0,8605	–

Связанные состояния трехатомных систем He_3 , He_2Ne , Ne_3 исследованы в формализме Фаддеева. Малость энергии связи димера гелия позволяет ожидать наличия в тримере гелия возбужденного состояния ефимовского типа и такое состояние было теоретически предсказано в наших расчетах [11], однако, проведенные исследования трех-частичных систем He_2Ne и Ne_3 не позволяют ожидать наличия ефимовских связанных состояний в этих системах, но возможны ефимовские резонансы в непрерывном спектре.

-
1. Schöllkopf W., Toennies J.P. Nondestructive mass selection of small van der Waals clusters // Science. – 1994. – V. 266. – P. 1345-1348.
 2. Kunitski M., Guan Q., Maschkiwitz H., Hahnenbruch J., Eckart S., Zeller S., Kalinin A., Schoeffler M., Schmidt L.Ph.H., Jahnke T., Blume D., Doerner R. Ultrafast manipulation of the weakly bound helium dimer // Nature Physics. – 2021. – V. 17. – P. 174-178.
 3. Luo F., McBane G.C., Kim G., Giese C. F., Gentry W. R. The weakest bond: Experimental observation of helium dimer // J. Chem. Phys. – 1993. – V. 98. – P. 9687.
 4. Arunan E. Molecule matters van der waals molecules: 2. noble gas clusters are london molecules! // Resonance. – 2023. – V.14. – P. 1210–1222.
 5. Колганова Е.А., Мотовилов А.К., Зандхас В. Ультрахолодные столкновения в системе трех атомов гелия // ЭЧАЯ. – 2009. – Т. 40. – С. 396-456.

6. Perepu P.K., Mishra B.K., Panda A.N. Prediction of interaction energy for rare gas dimers using machine learning approaches. // J. Chem. Sci. – 2023. – V. 135. – P. 12-21.
7. Ferlaino F., Grimm R. Trend: Forty years of Efimov physics: How a bizarre prediction turned into a hot topic // Physics. – 2010. – V. 3. – P. 9-18.
8. Zeller S. et al. Imaging the He₂ quantum halo state using a free electron laser // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. – 2016. – V.113. – P.14651– 14655.
9. Kurse J., Schroeder J., Blume D., Doerner R., Kunitski M.. Imaging the Rovibrational Ground State of the Helium–Neon Dimers // J. Phys. Chem. Lett. – 2025. – V.16. – P.3225-3231.
10. Wuest A., Merkt F. Determination of the interaction potential of the ground electronic state of Ne₂ by high-resolution vacuum ultraviolet laser spectroscopy// J. Chem. Phys. – 2003. – V.118. – P.8807-8812.
11. Korobitsin A.A., Kolganova E.A. The Properties of the Symmetric and Asymmetric Helium Three-Atomic Systems //Phys. Part. Nucl. - 2023. - V.54. - P.1029-1032

УДК 539.14

ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИНЕЙТРОННЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ SS-HORSE–NCSM

**А.И. Мазур¹, М.К. Ефименко¹, И.А. Мазур²,
А.М. Широков³, В.А. Куликов³, И.Дж. Шин⁴, Дж.П. Вэри⁵**

¹*Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)*

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

³*Научно-исследовательский институт имени Д. В. Скобелевича Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (г. Москва)*

⁴*Institute for Rare Isotope Science, Institute for Basic Science (Daejeon, Republic of Korea)*

⁵*Department of Physics and Astronomy Iowa State University (Ames, USA)*

Метод описания состояний непрерывного спектра SS-HORSE–NCSM обобщен на случай демократического распада на нечетное число тел в отсутствие отталкивающего кулоновского взаимодействия и применен для поиска резонансных состояний в системе трех нейтронов (тринейтрон) на основе расчетов ab initio в No-Core Shell Model с реалистическими NN-потенциалами. Предсказаны два перекрывающихся резонанса со спин-четностью $3/2^-$ и $1/2^-$. Резонансы проявляются только в расчетах с «мягкими» взаимодействиями, в случае «жестких» взаимодействий низколежащих относительно узких резонансов обнаружено не было.

Интерес к теоретическим и экспериментальным исследованиям мультинейтронных систем резко возрос после экспериментального наблюдения тетранейтронного резонанса. Актуальность исследований обусловлена тем, что изучение мультинейтронных систем позволит уточнить природу взаимодействия между нейтронами, так как прямые эксперименты по нейтрон-нейтронному рассеянию невозможны.

Мы исследуем мультинейтронные системы в развитом нами подходе SS-HORSE–NCSM (Single State Harmonic Oscillator Representation of the Scattering Equations) [1 – 7], в котором описание состояний непрерывного спектра проводится на основе расчетов в ядерной модели оболочек без инертного кора (No-Core Shell Model, NCSM) [8]. Все расчеты в NCSM проводятся без каких-либо модельных приближений с использованием реалистических NN-взаимодействий. Преимущество SS-HORSE–NCSM по сравнению с другими подходами, обобщающими NCSM на задачи непрерывного спектра, заключается в

том, что для расчета характеристик рассеяния и резонансных параметров достаточно знать только собственные энергии матрицы гамильтониана, то есть отсутствует необходимость дополнительных сложных вычислений. Метод был успешно применен для описания резонансных состояний ядер ${}^5\text{He}$ [1], ${}^5\text{Li}$ [5], ${}^7\text{He}$ [6] и ${}^9\text{Li}$ [7], проявляющихся в реакциях рассеяния нуклонов на легких ядрах, на основе расчетов в NCSM с реалистическими моделями NN-взаимодействия JISP16 [9] и Daejeon16 [10].

В работе [11] мы обобщили метод SS-HORSE–NCSM на задачи истинно многочастичного рассеяния с четным числом частиц и для исследования демократического распада по каналам с четным числом фрагментов и применили его для поиска резонанса в тетранейтроне [11, 12]. Под истинно многочастичным рассеянием и демократическим распадом на несколько фрагментов мы понимаем такие процессы, в которых ни одна из пар фрагментов не образует связанных состояний. Возможность существования резонанса тетранейтрона была экспериментально подтверждена в работе [13]. Отметим, что в работе [6] резонансные состояния в ${}^7\text{He}$ также были рассмотрены в канале демократического распада на ${}^4\text{He}$ и три нейтрона.

Более сложной задачей оказалось обобщение метода SS-HORSE–NCSM на задачи истинно многочастичного рассеяния с нечетным числом частиц [14]. Системы, распадающиеся на нечетное число фрагментов, характеризуются полуцелым эффективным орбитальным моментом. Как следствие S-матрица обладает более сложными аналитическими свойствами. В частности, она является многолистной функцией комплексного импульса.

Экспериментальные исследования системы трех нейтронов начались в 60-х годах XX века. Подробную историю поиска связанных и резонансных состояний в системе трех нейтронов можно найти в обзорах [15, 16] (см. также ссылки в этих работах). Главным итогом всех многочисленных экспериментов является отсутствие связанного состояния тринейтрона, но при этом не исключается резонансное состояние.

В работах [15, 16] также рассматривается история теоретического исследования системы трех нейтронов. Позже этого обзора появились новые работы, посвященные этой теме. Среди них нельзя не отметить недавние исследования на основе моделей реалистических нуклон-нуклонных (NN) взаимодействий [17, 18, 19]. В исследованиях [17, 18] не было найдено резонансного состояния тринейтрона. В работе [19] в рамках *ab initio* Гамовской модели оболочек без инертного кора предсказан резонанс при энергии 1,29 МэВ с шириной 0,91 МэВ.

Мы исследовали возможность существования резонансов в системе трех нейтронов в подходе SS-HORSE–NCSM. С этой целью в NCSM были проведены расчеты энергий нижайших состояний с различными реалистическими нуклон-нуклонными потенциалами: «мягкими» Daejeon 16 [10], JISP16 [9] и Idaho N3LO [20], регуляризованным методом ренорм-группы SRG (similarity renormalization group) [21,22], а также с «жесткими» голыми NN-потенциалами, полученными в киральной эффективной теории поля: Idaho N3LO [20] и LENPIC N4LO [23]. Для всех перечисленных взаимодействий были произведены расчеты в NCSM с максимальным числом квантов возбуждения N_{max} в диапазоне от 4 до 20 и параметром $\hbar\Omega$ осцилляторного базиса в пределах от 2 МэВ до 50 МэВ.

Минимальное число осцилляторных квантов в тринейтроне $N_{\text{min}} = 1$. Так как число квантов в 6-мерном гармоническом осцилляторе определяется формулой $N = 2n + K$, где n – радиальное квантовое число, то минимальное значение гипермомента, которое мы использовали при анализе, $K_{\text{min}} = 1$. Состояния с более высокими значениями K подавлены центробежным барьером.

Энергии нижайшего состояния (имеющего спин-четность $3/2^-$), рассчитанные в МОБИК с NN - взаимодействием Daejeon16 [10], представлены на левой панели рис. 1. На правой панели показаны соответствующие сдвиги фаз истинно многочастичного рассеяния [14]. Видно, что с ростом N_{max} наблюдается сходимость рассчитанных сдвигов фаз и они начинают формировать единую общую кривую, характерную для резонансного поведения.

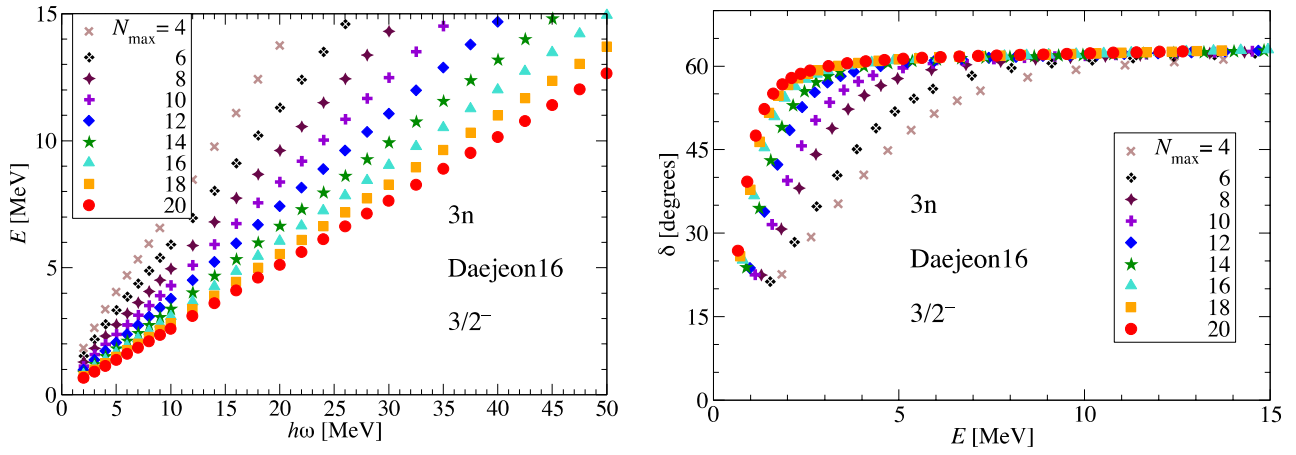


Рис. 1. Слева: энергии нижайшего состояния $3/2^-$ тринейтрона, рассчитанные в NCSM с NN- взаимодействием Daejeon16. Справа: сдвиги фаз истинного многочастичного рассеяния.

В методе SS-HORSE–NCSM на основе расчетов в модели оболочек без инертного кора с реалистическими NN-взаимодействиями JISP16, Daejeon16 и с SRG-смягченным NN-взаимодействием киральной эффективной теории поля Idaho N3LO исследованы резонансные состояния тринейтрона. Также была исследована возможность существования низколежащих резонансов тринейтрона в расчетах с «жесткими» исходными NN-потенциалами киральной эффективной теории поля.

Для всех «мягких» взаимодействий мы получили примерно одинаковые результаты, заключающиеся в наличии двух широких ($\Gamma \sim 0,9$ МэВ) перекрывающихся низколежащих $3/2^-$ и $1/2^-$ резонансов с энергией $E_r \sim 0,5$ МэВ, в то время как для «жестких» потенциалов низколежащие резонансы не наблюдаются. Мы не использовали трехнуклонные силы, так как на данный момент такого взаимодействия для суммарного изоспина $T = 3/2$ не существует. В этом смысле использование NN-взаимодействия Daejeon16 является более оправданным в силу того, что это взаимодействие основано на киральной эффективной теории поля и с помощью off-shell вариаций подогнано для хорошего описания стабильных состояний ядер вплоть до ^{16}O и неявно содержит в себе NNN-силы. Потенциал JISP16, который также не требует трехчастичных сил, дает результаты очень близкие к результатам регуляризованного с помощью SRG взаимодействия Idaho N3LO.

Энергии резонансов, полученных для тринейтрона, лежат ниже энергий резонанса тетранейтрона, предсказанного нами в подходе SS-HORSE–NCSM, что согласуется с выводами, полученными на основе результатов в гамовской модели оболочек без инертного кора.

Наши вычисления приводят к меньшей энергии, чем предсказания других авторов в гамовской модели без инертного кора ($E_r = 1,11(21)$ МэВ) (таблица). В то же время ширина, полученная нами с взаимодействием Daejeon16, с учетом оценок погрешности результатов, согласуется с шириной в этом подходе: $\Gamma = 0,91$ МэВ. Подчеркнем, что в этой работе не указана спин-четность резонансного состояния.

Энергии E_r и ширины Γ резонансных состояний тринейтрона и тетранейтрона, полученные в SS-HORSE–NCSM на основе «мягких» реалистических взаимодействий Daejeon16 [10], JISP16 [9] и с регуляризованным с помощью SRG [21, 22] взаимодействием Idaho N³LO [20].

	$3n, 3/2^-$		$3n, 1/2^-$		$4n, 0^+$	
Взаимодействие	E_r , МэВ	Γ , МэВ	E_r , МэВ	Γ , МэВ	E_r , МэВ	Γ , МэВ
Daejeon16	0,48(6)	0,96(21)	0,48(8)	0,96(17)	0,997	1,60
JISP16	0,35(8)	0,70(11)	0,35(11)	0,66(21)	0,844	1,38
N ³ LO, SRG	0,34(8)	0,70(19)	0,35(9)	0,68(16)	0,846	1,29

В таблице в скобках приведены оценки погрешности. Результаты взяты из работ [14, 11, 12]. Также в таблице представлены энергии и ширины резонансного состояния тетранейтрона, полученные в SS-HORSE–NCSM с теми же NN-взаимодействиями и опубликованные в работах [11, 12]. Видно, что для любого представленного взаимодействия резонанс тринейтрона лежит ниже резонанса тетранейтрона, что согласуется с выводами работы [19]. Для сравнения приведем результаты для энергии и ширины тетранейтронного резонанса [19]: $E_r = 2,64$ МэВ, $\Gamma = 2,38$ МэВ. Наши предсказания заметно меньше как для энергии, так и для ширины тетранейтрона.

Мы также рассмотрели данную систему с голыми NN-потенциалами, полученных в киральной эффективной теории поля: Idaho N3LO [20] и LENPIC N4LO [23]. В таких случаях сдвиги фаз истинно демократического рассеяния не демонстрируют тенденции к сходимости, их поведение не отвечает резонансному. Попытки построить разумную параметризацию этих фаз для определения энергии и ширины резонанса не увенчались успехом.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FEME-2024-0005).

-
1. A. M. Shirokov, A. I. Mazur, I. A. Mazur and J. Vary. Shell model states in the continuum // Phys. Rev. C – 2016. – Vol. 94. – Article 064320.
 2. I. A. Mazur, A. M. Shirokov, A. I. Mazur, and J. P. Vary. Description of Resonant States in the Shell Model // Phys. Part. Nucl. – 2017. – Vol. 48. – P. 84.
 3. Л. Д. Блохинцев, А. И. Мазур, И. А. Мазур, Д. А. Савин, А. М. Широков. Метод SS-HORSE исследования резонансов // ЯФ – 2017. – Vol. 80(2). – P. 102.
 4. Л. Д. Блохинцев, А. И. Мазур, И. А. Мазур, Д. А. Савин, А. М. Широков. Метод SS-HORSE исследования резонансов: рассеяние заряженных частиц // ЯФ – 2017. – Vol. 80(6). – P. 619.
 5. A. M. Shirokov, A. I. Mazur, I. A. Mazur, E. A. Mazur, I. J. Shin, Y. Kim, L. D. Blokhintsev, and J. P. Vary. Nucleon- α scattering and resonances in ^5He and ^5Li with JISP16 and Daejeon16 NN interactions // Phys. Rev. C – 2018. – Vol. 98. – Article 044624.
 6. I. A. Mazur, I. J. Shin, Y. Kim, A. I. Mazur, A. M. Shirokov, P. Maris, and J. P. Vary. SS-HORSE extension of the no-core shell model: Application to resonances in ^7He // Phys. Rev. C 2022. – Vol. 106. – Article 064320.
 7. И. А. Мазур, А. И. Мазур, В. А. Куликов, А. М. Широков, И. Дж. Шин, Я. Ким, П. Марис, Дж. П. Вэри. Связанные и резонансные состояния ядра ^9Li с NN-взаимодействием Daejeon16. // ЯФ – 2023. – Vol. 86(1). – P. 104.
 8. B. R. Barrett, P. Navrátil, and J. P. Vary. Ab initio no core shell model. // Prog. Part. Nucl. Phys. – 2013. – Vol. 69. – P. 131.
 9. A. M. Shirokov, J. P. Vary, A. I. Mazur, and T. A. Weber. Realistic nuclear Hamiltonian: *Ab exitu* approach. // Phys. Lett. B – 2007. – Vol. 644. – P. 33.
 10. A. M. Shirokov, I. J. Shin, Y. Kim, M. Sosonkina, P. Maris and J. P. Vary. N3LO NN-interaction adjusted to light nuclei in ab exitu approach. // Phys. Lett. B – 2016. – Vol. 761. – P. 87.
 11. A. M. Shirokov, G. Papadimitriou, A. I. Mazur, I. A. Mazur, R. Roth, and J. P. Vary. Prediction for a Four-Neutron Resonance. // Phys. Rev. Lett. – 2016. – Vol. 117. – Article 182502.
 12. A. M. Shirokov, Y. Kim, A. I. Mazur, I. A. Mazur, I. J. Shin, and J. P. Vary. Tetraneutron resonance: Theory. // AIP Conf. Proc. – 2018. – Vol. 2038. – Article 020038.
 13. M. Duer et. al. Observation of a correlated free four-neutron system. // Nature – 2022. – Vol. 606. – P. 678.
 14. I. A. Mazur, M. K. Efimenko, A. I. Mazur, I. J. Shin, V. A. Kulikov, A. M. Shirokov, J. P. Vary. Trineutron resonances in the SS-HORSE extension of the No-Core Shell Model. // Phys. Rev. C – 2024. – Vol. 110. – Article 014004.
 15. R. Kezerashvili. A short summary on the search of trineutron and tetraneutron, in Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei. // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, – 2017. – P. 403; arXiv:1608.00169 (2016).
 16. F. M. Marques and J. Carbonell. The quest for light multineutron systems. // Eur. Phys. J. A – 2021. – Vol. 57. – P. 105.

17. E. Hiyama, R. Lazauskas, J. Carbonell, M. Kamimura. Possibility of generating a 4-neutron resonance with a $T=3/2$ isospin 3-neutron force. // Phys. Rev. C – 2016. – Vol. 93. – Article 044004.
18. A. Deltuva. Three-neutron resonance study using transition operators. Phys. Rev. C – 2018. – Vol. 97. – Article 034001.
19. J. G. Li, N. Michel, B. S. Hu, W. Zuo, and F. R. Xu. Ab initio no-core Gamow shell-model calculations of multineutron systems. Phys. Rev. C – 2019. – Vol. 100. – Article 054313.
20. D. R. Entem, R. Machleidt. Accurate charge-dependent nucleon-nucleon potential at fourth order of chiral perturbation theory. // Phys. Rev. C – 2003. – Vol. 68. – Article 041001(R).
21. S. D. Glazek and K. G. Wilson. Renormalization of Hamiltonians. // Phys. Rev. D – 1993. – Vol. 48. – P. 5863.
22. F. Wegner. Flow-equations for Hamiltonians. // Ann. Phys. (NY) – 1994. – Vol. 506. – P. 77.
23. E. Epelbaum, H. Krebs, and U.-G. Meißner. Precision Nucleon-Nucleon Potential at Fifth Order in the Chiral Expansion. // Phys. Rev. Lett. – 2015. – Vol. 115. – Article 122301.

УДК 530.145,539.18,539.19

УСКОРЕНИЕ И ЗАКРУЧИВАНИЕ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ СИЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ РАЗЛИЧНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

В.С. Мележик

Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна)

melezhik@theor.jinr.ru

В докладе обсуждается возможность ускорения и закручивания нейтральных атомов электро-магнитными импульсами различной поляризации. Установлен резонансный n-фотонный механизм закручивания атомов циркулярно поляризованными лазерными импульсами с передачей им спиральности фотонов, который представляет интерес для различных приложений.

В наших работах [1 – 3] был предложен и реализован квантово-квазиклассический подход для количественного описания взаимодействия нейтрального атома с лазерным излучением с учетом недипольных поправок, возникающих из-за пространственной неоднородности электромагнитной волны и наличия в ней магнитной составляющей. Недипольные поправки приводят к «перепутыванию» переменных центра масс (ЦМ) и электронов в нейтральном атоме и, как следствие, к ряду интересных эффектов [1, 3], в частности, к ускорению атома. В работе [3] мы исследовали этот эффект, а также сопутствующие ему процессы возбуждения и ионизации атома водорода в сильных ($10^{12} - 2 \cdot 10^{14}$) Вт/см² линейно поляризованных коротковолновых ($5 \text{ эВ} \leq h\nu \leq 27 \text{ эВ}$) электромагнитных импульсах длительностью около 8 фс. Была обнаружена сильная корреляция скорости атома в конце действия лазерного импульса с полной вероятностью возбуждения и ионизации атома. Найдены оптимальные условия по частоте и интенсивности электромагнитной волны для ускорения атомов без их заметной ионизации в исследованной области изменения параметров лазера [3]. Установлены два резонансных механизма ускорения атома: через однофотонное и двухфотонное возбуждение атома. В докладе основное внимание уделяется нашим последним результатам, полученным для *эллиптической* поляризации лазерного импульса [4]. Исследовано влияние поляризации на возбуждение, ионизацию и ускорение атома. Показано, что при взаимодействии с циркулярно право-поляризованным электромагнитным импульсом атом ускоря-

ется и «закручивается» – приобретает орбитальный момент с проекцией $m = +1$ на направление его движения (рис.1).

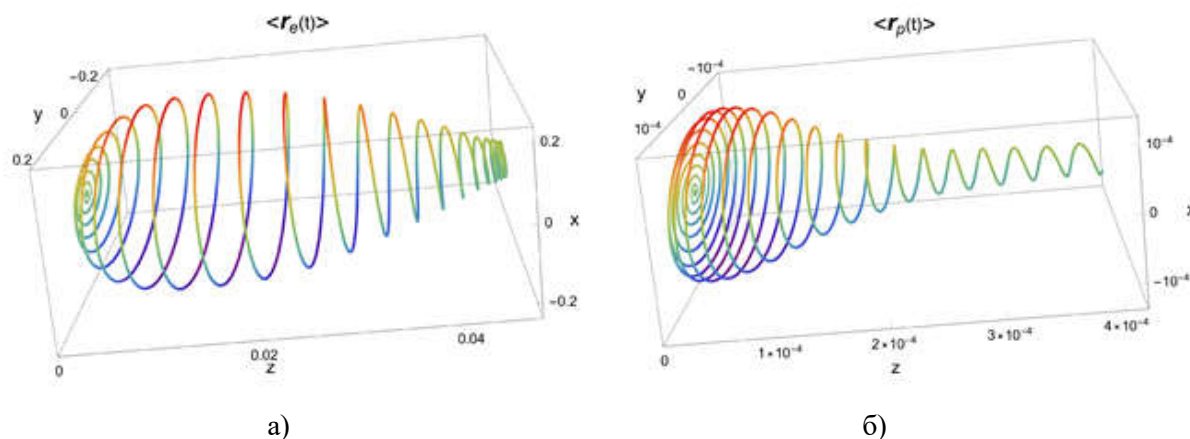


Рис. 1. Рассчитанные траектории электрона $\langle \mathbf{r}_e(t) \rangle$ (а) и протона $\langle \mathbf{r}_p(t) \rangle$ (б) в атоме водорода, взаимодействующем с циркулярно поляризованным лазерным импульсом, распространяющемся вдоль оси Z, длительностью 8fs, 10^{14} Вт/см² и $\omega = 0,48$ а.е. [4]. Переменные X, Y и Z приведены в ат. ед.

В этой связи следует отметить, что несмотря на уже почти тридцатилетнюю историю исследования закрученных фотонов и электронов, получение закрученных атомов представляет сложную экспериментальную задачу. Пока реализован единственный эксперимент, в котором были получены закрученные атомы гелия с помощью специально сконструированной дифракционной решетки [5]. Установленный нами резонансный n-фотонный механизм закручивания атомов циркулярно поляризованными лазерными импульсами с передачей им спиральности фотонов [4] представляет интерес для различных приложений.

-
1. Melezhik V.S. Quantum-quasiclassical analysis of center-of-mass nonseparability in hydrogen atom stimulated by strong laser fields// J. Phys. A – 2023. – V.56 – P.154003-1-15.
 2. Shadmehri S., Melezhik V.S. A hydrogen atom in strong elliptically polarized laser fields within discrete variable representation// Laser Physics. – 2023. – V.33, – P.026001-1-14.
 3. Melezhik V.S., Shadmehri S. Acceleration of neutral atoms by strong short-wavelength short-range electromagnetic pulses// Photonics. - 2023. - V.10(12) – P.1290-1-11.
 4. Melezhik V.S., Shadmehri S. Acceleration and twisting of neutral atoms by strong elliptically polarized short-wavelength laser pulses// J. Chem. Phys. - 2025. - V.162. - P.174304-1-11.
 5. Luski A. et. al. Vortex beams of atoms and molecules// Science. - 2021. – V.373(6559). – P.1105–11109.

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В.В. Насыров^{1,2}, В.В. Савченко^{1,2}

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (г. Хабаровск)*

² *Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск),
000612@togudv.ru*

Описывается методика измерения коэффициента электроакустического преобразования k_f пьезоизлучателей с использованием модифицированного интерферометра Линника. Экспериментальная установка применяется для проверки и калибровки высокочастотных пьезоэлектрических преобразователей.

Пьезоэлектрические излучатели нашли широкое применение в акустооптических системах, медицинской диагностике, неразрушающем контроле и подводной акустике. Ключевым параметром, определяющим эффективность таких устройств, является коэффициент электроакустического преобразования k_f , характеризующий соотношение между приложенным электрическим напряжением и амплитудой генерируемых механических колебаний. Традиционные методы измерения k_f (импедансный анализ, калориметрия) обладают ограниченной точностью на высоких частотах (> 100 кГц) и сложны в реализации для микроразмерных образцов.

Оптические интерферометрические методы предлагают высокую пространственную разрешающую способность, но требуют сложной юстировки и стабилизации рабочей точки. В данной работе представлена модернизация интерферометра Линника, сочетающая низкочастотную модуляцию опорного плеча и импульсное возбуждение исследуемого образца. Такой подход позволяет регистрировать амплитуды колебаний нанометрового диапазона в широком частотном диапазоне (50 кГц – 1,5 МГц).

Оптическая схема установки (рис. 1) представляет собой модернизированный интерферометр Линника со следующими особенностями.

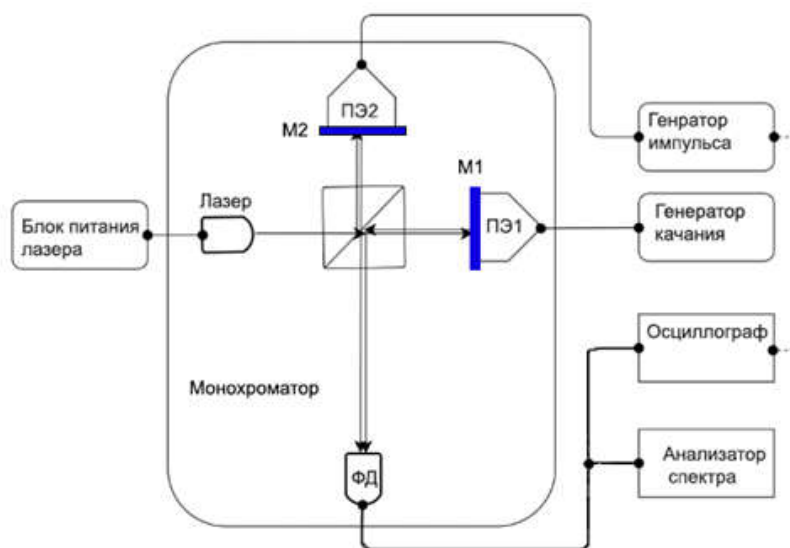


Рис. 1. Оптическая схема установки.

Опорное плечо. Зеркало М1, закреплённое на электроакустическом преобразователе ПЭ1, совершает низкочастотные синусоидальные колебания

$$\Delta L_{\text{медл}}(t) = A \sin(2\pi f_{\text{ПЭ1}} t), \quad T_{\text{ПЭ1}} = 300 \text{ с}, \quad f_{\text{ПЭ1}} = 3,33 \text{ МГц}. \quad (1)$$

Измерительное плечо. Пьезоизлучатель ПЭ2 возбуждается высокочастотным радиоимпульсом

$$\Delta L_{\text{быстр}}(t) = \sum_f \delta_0^f \sin(2\pi f_{\text{ПЭ2}} t), \quad f_{\text{ПЭ2}} = 50 \text{ кГц} - 1,5 \text{ МГц}. \quad (2)$$

Регистрация. Сигнал снимается с фотодиода (ФД) и передаётся на осциллограф (GW Instek GDS-7102B) и анализатор спектра (Rigol DSA815-TG).

И интенсивность света на выходе интерферометра может быть представлена в виде:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi), \quad (3)$$

где $\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{медл}} + \Delta\phi_{\text{быстр}}$ – разность фаз, определяемая движениями отражающих поверхностей в обоих плечах интерферометра.

Полезный сигнал установки – напряжение $U_{\text{фд}}$, снимается с нагрузочного резистора, включенного в цепь фотодиода. Ток, создаваемый фотодиодом ФД, в линейном режиме работы пропорционален его облучённости, поэтому напряжение на фотодиоде пропорционально интенсивности света:

$$U_{\text{фд}} = U_1 + U_2 + 2\sqrt{U_1 U_2} \cos(\Delta\phi), \quad (4)$$

где U_1, U_2 – составляющие напряжения от опорного и измерительного пучков. Напряжение (5) подается на осциллограф и спектрометр. На рис. 2а показан экспериментальный сигнал, на рис. 2б – его математическая модель, построенная по формулам (1) – (4):

$$U_{\text{фд}}^m = 5,74 + 0,95 \cos[11,31 \cos(0,021t + 2,51) + 0,063 \cos((9,43t + 1,13) \cdot 10^8) + 1,85] \quad (5)$$

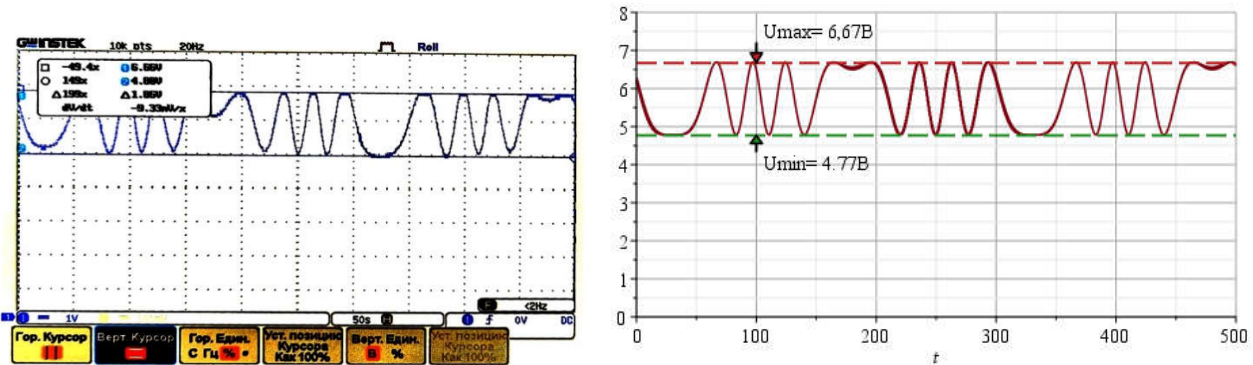


Рис. 2. Сигнал на осциллографе: а) экспериментальный сигнал; б) математическая модель (5).

В формуле модельного сигнала (6) подобраны следующие параметры: смещение опорной поверхности $A = 0,9\lambda \approx 569,52 \text{ нм}$; смещение измерительной поверхности $\delta_0^f = 0,04\lambda \approx 25,31 \text{ нм}$; частота колебаний опорной поверхности $f_{\text{ПЭ1}} = 3,33 \text{ МГц}$; частота колебаний измерительной поверхности $f_{\text{ПЭ2}} = 1,5 \text{ МГц}$; напряжение, которое могло бы быть получено при облучении фотодиода только пучком, отраженным от ПЭ1 $U_1 = 5,7 \text{ В}$; напряжение, которое могло бы быть получено при облучении фотодиода только пучком, отраженным от ПЭ2 $U_2 = 0,04 \text{ В}$.

Введем S – чувствительность интерферометра (В/рад):

$$S = \left| \frac{dU_{\text{фд}}}{d(\Delta\phi)} \right| = 2\sqrt{U_1 U_2} |\sin(\Delta\phi)|. \quad (6)$$

Зависимость чувствительности для модельного сигнала показана на рис.3. Максимальная чувствительность достигается вблизи рабочей точки $\Delta\phi_0 = \frac{\pi}{2}$, в области «линейного отклика» функции $\sin(\Delta\phi_0)$:

$$S_{\text{max}} = 2\sqrt{U_1 U_2} = \frac{U_{\text{фд}}^{\text{max}} - U_{\text{фд}}^{\text{min}}}{2}. \quad (7)$$

Экспериментальная чувствительность $S_{\max}$, определённая по размаху сигнала $\Delta U_{\text{фд}}$ (рис. 2), составляет 0,93 В/рад, чувствительность для модельного – 0,953 В/рад. Расхождение в 2,1 % свидетельствует о достаточном качестве предлагаемой модели процесса.

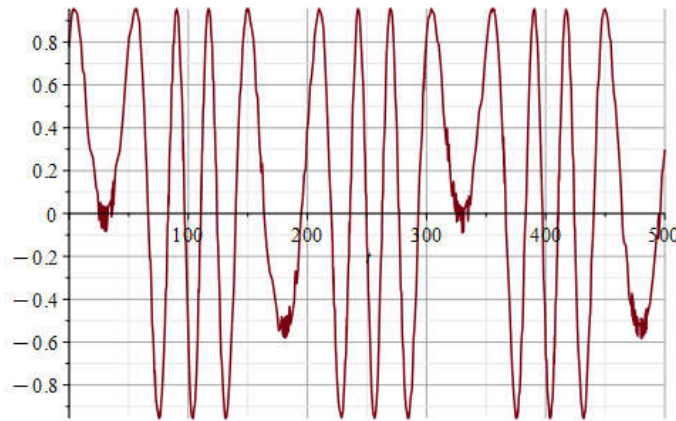


Рис. 3. Зависимость чувствительности интерферометра.

Разложим напряжение (4) в ряд Тейлора в окрестности рабочей точки:

$$U_{\text{фд}} \approx U_1 + U_2 + S_{\max} \cdot \left(\frac{4\pi}{\lambda} \Delta L_{\text{быстр}}(t) \right). \quad (8)$$

Обозначим $U_{\text{имп}}^f$ – амплитуду напряжения радиоимпульса на частоте f , приложенное к пьезоизлучателю ПЭ2. Примем, что максимальное смещение поверхности пьезоизлучателя ПЭ2 δ_0^f определяется его коэффициентом электроакустического преобразования k_f :

$$\delta_0^f = k_f U_{\text{имп}}^f. \quad (9)$$

Одной из особенностей предлагаемого метода является то, что, используемый в составе установки анализатор спектра, работает в режиме «HoldMax». Это позволяет фиксировать максимальные изменения напряжения, соответствующие наибольшей чувствительности интерферометра (в момент прохождения рабочей точки в процессе «качания» опорного зеркала), поэтому амплитудное напряжение $U_{\text{фд}}^f$, фиксируемое анализатором спектра, будет определяться:

$$U_{\text{фд}}^f = S_{\max} \cdot \left(\frac{4\pi}{\lambda} k_f U_{\text{имп}}^f \right). \quad (10)$$

Для измерения амплитуд напряжения радиоимпульса $U_{\text{имп}}^f$ генератор импульсов отдельно подключается к анализатору спектра. На рис. 4 показан экран анализатора спектра Rigol DSA815-TG с рассматриваемым сигналом.

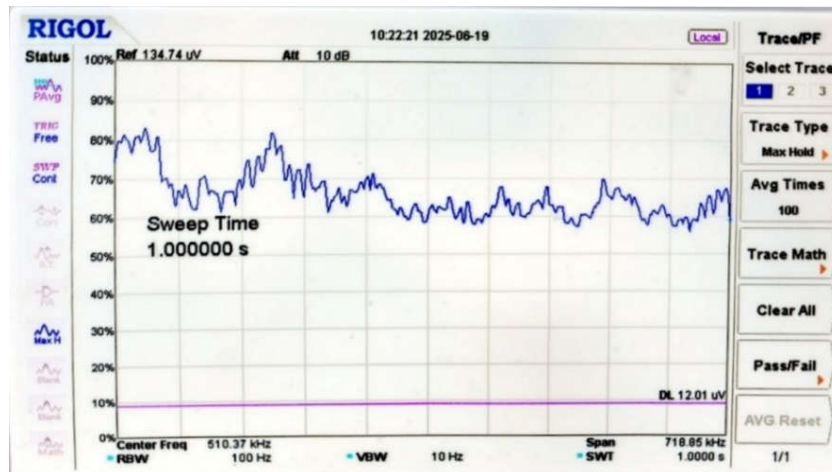


Рис. 4. Анализатора спектра. Зависимость амплитуды напряжения от частоты.

Коэффициент электроакустического преобразования k_f можно выразить из (10), учитывая (7):

$$k_f = G \frac{U_{\text{фд}}^f}{\Delta U_{\text{фд}} \cdot U_{\text{имп}}^f}, \quad (11)$$

где $\Delta U_{\text{фд}} = U_{\text{фд}}^{\text{max}} - U_{\text{фд}}^{\text{min}}$ – размах напряжения; $G = \frac{\lambda}{2\pi} = 100,71 \cdot 10^{-9}$ м – постоянную интерферометра.

Таким образом, для измерения коэффициент электроакустического преобразования k_f , необходимо: 1) зафиксировать размах напряжения $\Delta U_{\text{фд}}$ по осциллографу; 2) измерить амплитуду напряжений $U_{\text{фд}}^f$ и $U_{\text{имп}}^f$ при помощи анализатора спектра; 3) выполнить расчет по формуле (11). Характерный вид амплитудно-частотной характеристики коэффициента k_f приведен на рис. 5.

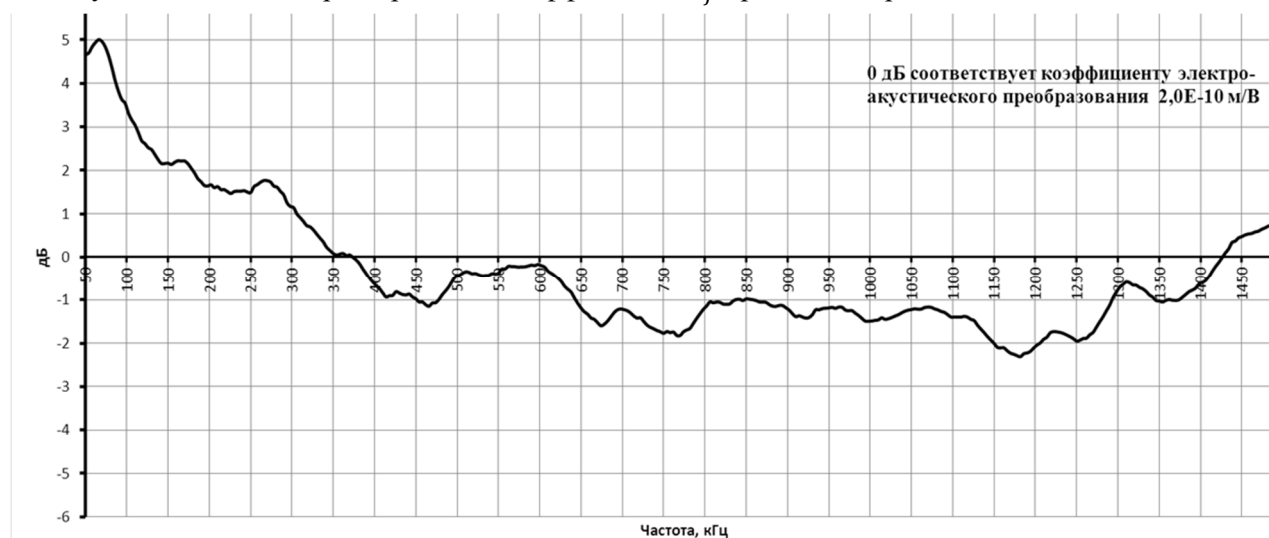


Рис. 5. АХЧ коэффициента электроакустического преобразования.

Представленная методика позволяет выполнять измерения коэффициента электроакустического преобразования k_f пьезоизлучателей с расширенной неопределенностью результата измерений ~ 20 %. Установка позволяет определять амплитуды колебаний от 20 нм с абсолютной погрешностью ~ 5 нм, выполнять калибровку пьезоэлементов для ультразвуковой диагностики.

1. Smith W.A. The role of piezocomposites in ultrasonic transducers // IEEE Ultrason. Symp., 1989.
2. Gurkov A.S. Interferometric methods in acoustics // Measurement Science, 2017.
3. Rigol Technologies // DSA800 Series Spectrum Analyzer User's Guide. 2019.
4. GW Instek // GDS-7000 Series Digital Oscilloscope User Manual. 2020.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ СПЕКТРА РАССЕЯНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ РАССЕЯНИЯ ВОЛНЫ РЭЛЕЯ

В.Н. Чуков

Институт Биохимической физики имени Н.М. Эмануэля Российской Академии наук (г. Москва)

vschukov@mail.ru

Теоретически получена локализация спектра рассеяния поверхностной акустической волны Рэлея в произвольной области частот: от рэлеевского предела до предела Лауэ-Брэгга-Вульфа. В рамках топологических законов рассеяния волны Рэлея использована цилиндрически симметричная шероховатость в форме модулированных полиномов Чебышёва, взятых в качестве элементарной ячейки решётки Пруэ-Туэ-Морса.

Введение

Формирование спектра рассеяния волн, в частности, поверхностной акустической волны Рэлея [1 – 3], на основе известных законов рассеяния волн [1 – 15] вызывает интерес в разных областях экспериментальной и теоретической физики и техники [16 – 25]. В работах [26 – 37] получены новые топологические законы рассеяния волны Рэлея на поверхностных шероховатостях и неоднородностях в пределах Рэлея и Лауэ-Брэгга-Вульфа, позволяющие впервые в литературе моделировать произвольный спектр рассеяния волны Рэлея в указанных пределах. Данные законы создают базисы амплитуд рассеяния в пределах Рэлея и Лауэ-Брэгга-Вульфа. В последнем случае – независимо для осцилляций амплитуды рассеяния и их огибающей. Тем самым они формируют аналогию с квантовой механикой, широко использующей базисные вычисления и теорию рассеяния на финитном (занимающем конечную область, т.е., локализованном) потенциале [23]. В настоящей работе исследуется совместное влияние указанных топологических законов на поведение спектра рассеяния в широком диапазоне значений параметра Рэлея, то есть, отношения размера неоднородной области к длине волны, в интервале между указанными пределами рассеяния [26, 27, 37]. Необходимо заметить, что условия резонансного рассеяния Лауэ [4], использовавшего [8], как он сам отмечает в [7], и закон зеркального резонансного отражения Брэгга [5], опубликовавшего его одновременно с российским известным физиком Георгием Викторовичем Вульфом [6], удовлетворяющий условиям Лауэ, вследствие их родства как физическое условие фазового синхронизма рассеянных волн, названы в настоящей работе законами Лауэ-Брэгга-Вульфа вслед их названию Лауэ-Брэгга в юбилейном сборнике [9] (страница 253), содержащем также английский перевод оригинальной статьи [4].

Задача рассеяния волны Рэлея

Пусть полубесконечная изотропная упругая среда со свободной поверхностью занимает полупространство

$$x_3 \geq 0, \tag{1}$$

$\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)$ есть радиус-вектор в декартовой системе координат. Среда имеет поверхностную шероховатость, занимающую область конечного размера. Шероховатость является детерминированной (нестатистической) по обеим координатам и описывается следующей функцией

$$x_3 = f(x_1, x_2) = \delta_0 f_{||}(\vec{x}_{||}) \equiv \delta_0 f_0(x_{||}), \tag{2}$$

где $\vec{x}_{||} = (x_1, x_2, 0)$; $f_{||}(\vec{x}_{||})$ есть произвольная детерминированная безразмерная функция; δ_0 – нор-

мировочная амплитуда шероховатости, имеющая размерность длины; f_0 является цилиндрически симметричной, так как зависит только от $x_{||} = |\vec{x}_{||}|$.

Пусть следующая поверхностная акустическая волна Рэлея [2], являющаяся связанным состоянием продольной волны и поперечной волны вертикальной поляризации, распространяется вдоль положительного направления оси x_1 и падает на шероховатый участок поверхности (2)

$$u_{\mu}^{(0)}(x, t) = u_{\mu}^{(0)}(\vec{k}_{||}^{(0)}, \omega, x_3) e^{i\vec{k}_{||}^{(0)} \vec{x}_{||} - i\omega t}, \quad \mu = 1, 2, 3; \quad (3)$$

где $\vec{k}_{||}^{(0)} = (k_R; 0; 0)$; ω , c_R есть угловая частота и скорость волны Рэлея соответственно;

$$u_1^{(0)} = A^{(0)}(e^{-\alpha k_R x_3} - \gamma e^{-\beta k_R x_3}); \quad u_2^{(0)} = 0; \quad u_3^{(0)} = i\alpha A^{(0)}(e^{-\alpha k_R x_3} - (1/\gamma)e^{-\beta k_R x_3}),$$

$$\alpha = (1 - c_R^2/c_t^2)^{1/2}; \quad \beta = (1 - c_R^2/c_l^2)^{1/2}; \quad \gamma = 1 - c_R^2/(2c_t^2); \quad \alpha\beta = \gamma^2; \quad k_R = \omega/c_R,$$

где $c_{t,l}$ – скорости поперечной и продольной объёмных акустических волн соответственно [1]; $A^{(0)}$ – комплексная амплитуда. Только действительная часть комплексного выражения (3) имеет физический смысл поля смещения в волне Рэлея [2]. Все обозначения физических величин в настоящей работе совпадают с [37]. В результате рассеяния падающей волны Рэлея (3) на шероховатости (1), (2) на больших расстояниях от шероховатости по сравнению с радиусом шероховатой области d образуется рассеянная цилиндрическая рэлеевская волна и сферические объёмные продольная и поперечная волны (см. ссылку [1] в [37]). В настоящей работе, как и в [26 – 37], исследуется только рассеянная рэлеевская волна. Выражение для вектора смещения в ней приведено в [37] (формулы (13) – (16) в [37]). С помощью решения данной задачи рассеяния, справедливом во всей области частот от рэлеевского [1], т.е., длинноволнового $\lambda \gg d$ предела, до предела Лауэ-Брэгга-Вульфа [4 – 11] $\lambda \ll d$, необходимо исследовать влияние новых по сравнению с [1 – 11] топологических законов рассеяния волны Рэлея [26 – 37], формулы (29) – (32) и (33) – (39) работы [37] соответственно (или в более общем виде (27) – (32) в [33] и (15) – (18) в [30] для рэлеевского предела; и (32) – (34) в [30] для предела Лауэ-Брэгга-Вульфа).

Локализация спектра рассеяния волны Рэлея

Возьмём в качестве шероховатости $f_0(x_{||})$ (2) последовательность Пруэ-Туэ-Морса [26, 28, 34 – 37]. В [26] впервые в литературе установлено, что она обладает свойством занулять одновременно заданное наперёд количество своих пространственных моментов, задавая тем самым топологию шероховатостей, отличной от рэлеевской топологии. Последняя определяется отличием среднего значения шероховатости от нуля. Для цилиндрически симметричной шероховатости (2) частотная зависимость индикатрисы рассеяния ((18), (19) в [37]; (2), (3) в [33]) есть $I_{||,3}^{(R)} \sim (d/\lambda)^{4[n/2]+5}$, где $n = 0, 1, 2, \dots$ – число переворотов всей предыдущей части последовательности Пруэ-Туэ-Морса относительно оси абсцисс (формулы (1) – (18)) в [29], [...] – целая часть числа. $(n - 1)$ есть порядок момента шероховатости, вплоть до которого, включительно, равны нулю все моменты шероховатости. $n = 0$ соответствует рэлеевской топологии, $n = 1$ – равно нулю только среднее значение шероховатости. n – й момент шероховатости для последовательности Пруэ-Туэ-Морса отличен от нуля (формулы (33) – (37) в [35]). Таким образом, n определяет порядок пространственной статистической симметрии шероховатости. $n > 0$ даёт новые топологические законы рассеяния волны Рэлея, то есть, мета-рэлеевское рассеяние [34]. Для цилиндрически симметричной шероховатости (2) имеют значение только нечётные моменты шероховатости [26, 28, 34 – 37]. Возьмём в качестве элементарной ячейки ψ_0 шероховатости в виде последовательности Пруэ-Туэ-Морса ((49) – (52) в (37) модулированные полиномы Чебышёва [37]. В виде [37] (формулы (49) – (52) в [37]) сама такая элементарная ячейка не изменяет порядок пространственной статистической симметрии шероховатости, так как весовая функция, с которой ор-

тогональны полиномы Чебышёва не входит в данное определение ψ_0 . Но быстро осциллирующие полиномы позволяют дополнительно управлять значением отличного от нуля n – го момента шероховатости путём изменения порядка полинома Чебышёва. Полученная таким образом шероховатость позволяет дополнительно подавлять рассеяние в рэлеевской области, увеличивая n . В то же время, последовательность Пруэ-Туэ-Морса есть периодическая решётка, состоящая из 2^n звеньев. Но согласно новым топологическим законам, то есть, мета-рассеянию Лауэ-Брэгга-Вульфа, рассеяние волны Рэлея в пределе Лауэ-Брэгга-Вульфа происходит на разрывах шероховатости или её производных наименьшего порядка n_d , включая нулевой, отличных от нуля. Не каждый узел решётки Пруэ-Туэ-Морса является таким разрывом. Поэтому решётка Пруэ-Туэ-Морса является непериодической, которая также подчиняется закону Лауэ-Брэгга-Вульфа, но для виртуальной периодической решётки, часть узлов которой совпадает с реальной непериодической решёткой разрывов Пруэ-Туэ-Морса, а для остальных виртуальных узлов амплитуды разрывов равны нулю [31]. Таким образом, вступают в силу новые топологические законы, т.е., мета-рассеяние Лауэ-Брэгга-Вульфа. Согласно данным законам зависимость огибающей высокочастотных осцилляций индикатрисы рассеяния в пределе Лауэ-Брэгга-Вульфа есть $I_{||,3}^{(R)} \sim (d/\lambda)^{2-2n_d}$. При $n_d = 0$, когда высокочастотное рассеяние происходит на решётке разрывов самой шероховатости, а не её производных, получается классический нелокализованный по параметру Рэлея d/λ спектр рассеяния, изображённый на рисунках 1 – 4 в [37]. При $n_d > 1$ согласно новым топологическим законам, т.е., мета-рассеянию Лауэ-Брэгга-Вульфа, огибающая убывает с ростом параметра Рэлея d/λ . Это не было известно Лауэ, Брэггу и Вульфу [4 – 14].

Таким образом, варьируя n для решётки Пруэ-Туэ-Морса и $n_d = n_0$ (формулы (49) – (53) в [37]), определяющее порядок производной, на разрывах которой происходит рассеяние волны Рэлея, для модулированных полиномов Чебышёва в качестве элементарной ячейки решётки Пруэ-Туэ-Морса, можно локализовать спектр рассеяния по параметру Рэлея d/λ в произвольной области между пределами Рэлея и Лауэ-Брэгга-Вульфа. Данная локализация спектра рассеяния волны Рэлея представлена на рисунке 29 в [37]. Соответствующие аналитические выражения для индикатрисы рассеяния даны формулами (53) в [37].

Заключение

Впервые в литературе теоретически получена локализация спектра рассеяния поверхностной акустической волны Рэлея на поверхностной шероховатости изотропного твёрдого тела путём использования новых топологических законов рассеяния в пределах Рэлея и Лауэ-Брэгга-Вульфа, т.е., мета-рэлеевского рассеяния и мета-рассеяния Лауэ-Брэгга-Вульфа [34, 37]. Указанное физическое явление может быть использовано в разных областях экспериментальной и теоретической физики [1 – 25] и в технике для разработки новых технологий, в частности в акустоэлектронике [17, 18]; акустической микроскопии [15, 25]; рентгенографии [14]; для фокусировки волнового излучения путём конструирования рассеивающих решёток, например, методом лазерной литографии [16, 19]; в сонолюминисценции и физике люминисценции в целом [20]; в физике акустических метаматериалов [21]; в сейсмологии для создания ловушек сейсмических волн [22], в медицине [25].

Работа выполнена в рамках Госзадания НИОКТР № 122041400112-8, код темы FFZR-2022-0012.

-
1. Стретт, Дж.В. (Лорд Рэлей). Теория звука. Т.1,2. М: Гостехиздат, 1955.
 2. Lord Rayleigh. // Proc. London Math. Soc. – 1885. – V.17. – P.4.
 3. Lord Rayleigh. // Proc. Royal. Soc. London. – 1907. – V.A79. – P.399.
 4. Laue, M, Friedrich, W., Knipping, P. // Ber. Bayer. Akad. –1912. – V.363. – P.303.
 5. Bragg, W.L. // Proc. Camb. Philos. Soc. – 1913. – V.17. – P.43.
 6. Wulff, G.V. // Physikalische Zeitschrift. – 1913. – V.14. – P.217.

7. Лайэ, М. История физики. М: Гостехиздат, 1956.
8. Scherard, F.M. Beugungserscheinungen Aus Den Fundamentalgesetzen der Undulationstheorie. Mannheim, 1835.
9. Laue, M., Friedrich, W., Knipping, P.. In: X-Ray and Neutron Diffraction (in English) / G.E. Bacon (Ed.). Pergamon Press, 1966. P.253.
10. Bijvoet, J.M., Burgers, W.G., Hagg, G. (Eds.). Early Papers on Diffraction of X-Rays by Crystals. V.I. Springer, 1969. 372 p. V.II. Springer, 1972. 484 p.
11. Ewald, P.P. // Acta Cryst. – 1969. – V.A25. – P.103.
12. Ньютон, Р. Теория рассеяния волн и частиц. М: Мир, 1969. С.62.
13. Бирюков, С.В., Гуляев, Ю.В., Крылов, В.В., Плесский, В.П.. Поверхностные акустические волны в неоднородных средах. М: Наука, 1991.
14. Robinson, I.K., Twest, D.J. // Rep. Prog. Phys. – 1992. – V.55. – P.599.
15. Maev, R.G. Acoustic Microscopy. Fundamentals and Applications, Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
16. Goray, L.I., Berezovskaya, T.N., Mokhov, D.V., et.al. // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. – 2023. – V.17. – Suppl.1. – P.S104.
17. Morgan, D., Paige, E.G.S. Surface acoustic wave filters. Elsevier, 2007.
18. Кайно, Г. Акустические волны. Устройства, визуализация, и аналоговая обработка сигналов. М.: Мир, 1990.
19. Шур, В.Я., Ахматханов, А.Р., Чувакова, М.А., Лисьих, Б.И., Кособоков, М.С., Бойко, А.А. Сборник научных трудов XIV международной конференции по фотонике и информационной оптике. 29-31 января 2025, Москва, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ.
20. Паперный, В.Л., Черных, А.А., Раджабов, Е.А., Мартынович, Е.Ф., Дресвянский, В.П. Материалы XX международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике. Иркутск, Россия, 30 июня – 5 июля 2025 г. С. 55.
21. Deymier, P.A. (Ed.). Acoustic metamaterials and phononic crystals. Springer, 2013.
22. Sarris, G., Haslinger, S.G., Huthwaite P. et al. // J. Acoust. Soc. Am. – 2021. – V.149. – P.4298.
- Shirokov, A.M., Mazur, A.I., Mazur, I.A., Vary, J.P. // Phys. Rev. – 2016. – V.C94. – P.064320. DOI: 10.1103/PhysRevC.94.064320
23. Емельянцева, П.С., Пышков, Н.И., Свяховский, С.Е. // Письма в ЖЭТФ. – 2023. – Т.117. – N.11. – С.826.
24. Храмова, Е.А., Мороков, Е.С., Григорьев, Т.Е., Губарева, Е.А., Сотниченко, А.С., Куевда, Е.В., Левин, В.М., Петронюк, Ю.С. // Учёные записки Физического факультета Московского университета. – 2017. – N.5. – С.1750710.
25. Chukov, V.N., Surface Roughness Structure and Rayleigh Scattering Laws of Rayleigh Wave. Preprint. IBCP RAS. Moscow: Lebedev Physical Institute 2003. 36p. (Russian State Library).
26. Chukov, V.N. in: Days on diffraction'2009. International Conference. Abstracts. St.-Petersburg: Universitas Petropolitana MDCCXX V, 2009. С.7.
27. Chukov, V.N. Proc. "Days on Diffraction" Int. Seminar. St. Petersburg. 2011. P.55. <https://doi.org/10.1109/DD.2011.6094365>.
28. Chukov, V.N. // Ultrasonics. – 2012. – V.52. – No.1. – P. 5.
29. Chukov, V.N. Topological laws of the Rayleigh wave scattering. Beau Bassin: Lambert Academic Publishing, 2018. ISBN: 978-613-9-84837-9.
30. Чуков, В.Н. Сборник трудов Всероссийской Акустической конференции. Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. С. 87. <https://acoust-conference.iapras.ru>
31. Chukov, V.N. // St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics. – 2023. – V.16. – No.1.2. – P.557. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.161.285>.
32. Чуков, В.Н. Новые законы диффузного рассеяния волны Рэлея и нарушение закона Лауэ-Брэгга-Вульфа. Препринт. ИБХФ РАН. Москва: ООО "Паблит", 2023. ISBN: 978-5-6049489-7-2 (ИБХФ РАН), 978-5-16-019405-9 (ИНФРА-М). (Российская государственная библиотека).
33. Chukov, V.N. // Russ. Phys. J. – 2024. – V.67. – P.1787.
34. Chukov, V.N. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – V.89. – No.1. – P.96.
35. Chukov, V.N. // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – 2025. – V.18. – No.5. – P.1.
36. Chukov, V.N. Meta-Rayleigh and topological diffuse scattering of the Rayleigh wave on deterministic cylindrical roughness with spatial statistical symmetry of an arbitrary order. Preprint. IBCP RAS. Moscow: "Publit", 2024. ISBN: 978-5-6051794-7-4. (The Russian State Library.)

БАЙЕСОВСКИЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ДЛЯ РЕГРЕССИИ И ЭКСТРАПОЛЯЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ NO-CORE SHELL MODEL

Р.Э. Шарыпов

Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

2017104939@togudv.ru

В работе рассматривается применение байесовских нейронных сетей с обучаемыми априорными распределениями для задачи регрессии и экстраполяции результатов расчётов в рамках no-core shell model (NCSM). NCSM обеспечивает микроскопически точное описание структуры ядер, однако его вычислительная сложность резко возрастает с увеличением числа нуклонов, что делает прямые расчёты невозможными в ряде областей. Разработанная модель использует трёхслойную архитектуру с вариационными стохастическими слоями, обучаемыми с помощью вариационного вывода в библиотеке TensorFlow Probability. В процессе обучения применяются методы повышения стабильности и точности: механизм ранней остановки, косинусный режим изменения скорости обучения с фазой разогрева (warmup) и ограничение нормы градиентов. Байесовский подход обеспечивает не только высокую точность аппроксимации результатов NCSM, но и количественную оценку неопределённости предсказаний, что критически важно при экстраполяции в область, недоступную для прямых вычислений.

No-core shell model (NCSM) даёт микроскопически обоснованные значения энергий и других характеристик лёгких ядер, но его применение ограничено из-за экспоненциального роста вычислительных затрат при увеличении размерности модельного пространства [1, 2]. В данной работе рассматривается построение вероятностной аппроксимирующей модели, основанной на байесовских нейронных сетях (Bayesian Neural Networks, BNN), для приближения и частичной экстраполяции результатов NCSM с оценкой апостериорной неопределённости предсказаний [3, 4].

Модель представляет собой компактную многослойную нейронную сеть с вариационными (стохастическими) слоями, реализованную с помощью TensorFlow Probability [5, 6]. Для параметров сети используются нормальные априорные распределения; постериорные приближения для весов задаются в вариационной форме (также нормальными). Целевая функция — отрицательное лог-правдоподобие наблюдаемых значений на фоне регуляризации в виде дивергенции Кульбака–Лейблера (ELBO):

$$L(\theta) = -\mathbb{E}_{q_{\theta}(w)}[\log p(y | x, w)] + \lambda_{KL}[q_{\theta}(w) \parallel p(w)], \quad (1)$$

где первый член — среднее (по вариационному распределению параметров) отрицательное лог-правдоподобие наблюдений (negative log-likelihood); второй — регуляризационный член: взвешенная с помощью параметра λ_{KL} дивергенция Кульбака–Лейблера между вариационным приближением и априорным распределением параметров. Данные: x — входные признаки y — соответствующие целевые значения (вектор наблюдений). Реализация допускает как фиксированные, так и обучаемые априорные распределения; последний вариант требует дополнительных мер стабилизации из-за роста числа параметров.

В докладе сравниваются нейронные сети с тремя различными нормальными априорными распределениями: фиксированным, с обучаемыми μ, σ и с параметрами μ, σ , унаследованными от подхода с использованием ансамбля детерминированных нейронных сетей (как в работе [7]).

Исходные данные (рис. 1) представляют собой результаты расчетов в NCSM и зависят от двух параметров – размера базисного пространства модели, определяемого максимальным числом осцилляторных квантов возбуждения N_{max} и величины осцилляторной энергии $\hbar\Omega$. Они предварительно масштабируются методом MinMax. Масштабирующие функции сохраняются и используются при выводе для обратного приведения предсказаний к физическим единицам. Данные разбиваются на обучающую, валидационную и тестовую выборки. Также проводится их интерполяция с помощью кубических сплайнов.

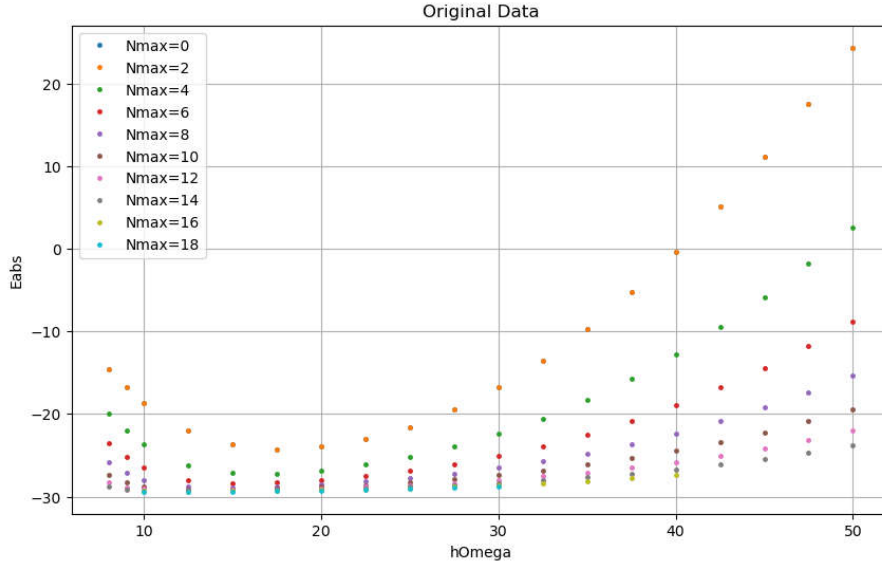


Рис. 1. Исходные данные. Зависимость от $\hbar\Omega$ энергии основного состояния ядра ${}^6\text{He}$ в расчетах с NN-потенциалом Daejeon16.

Для стабилизации процесса обучения применяется косинусный режим скорости обучения с фазой разогрева (cosine decay with warmup), который представляет собой устойчивую и широко используемую технику оптимизации нейросетевых моделей. Идея состоит в двух последовательных этапах: (i) *warmup* — кратковременное плавное увеличение шага оптимизации от малого начального значения до целевого значения, что стабилизирует начальную фазу адаптивных оптимизаторов (таких как Adam) и уменьшает риск больших начальных градиентов; (ii) *cosine decay* — последующее монотонное снижение шага по косинусному закону, обеспечивающее гладкое уменьшение величины обновлений и способствующее тщательной донастройке в поздней фазе обучения. В практическом исполнении длину warmup выбирают либо в абсолютных шагах, а минимальный уровень learning rate фиксируют строго положительным (или используют «пороговую» величину), чтобы избежать полного «замирания» обучения. Косинусное затухание может применяться в варианте с перезапусками, где после снижения до малого значения скорость периодически восстанавливается, либо в монотонном варианте без рестартов, как в настоящей работе; выбор зависит от задачи и желаемого поведения оптимизации. На практике сочетание warmup + cosine часто сопровождают дополнительными приёмами: линейным или экспоненциальным снижением веса KL (KL-annealing) при вариационном обучении, усечением градиентов, а также увеличением параметра ε в Adam для повышения численной устойчивости.

Режим скорости обучения показан на рис. 2. Для предотвращения взрывного роста градиентов применяется усечение (gradient clipping): Усечение по норме (clipnorm) действует глобально на все обучаемые параметры, включая параметры обучаемого априорного распределения, поэтому оно эффективно и для тех случаев, когда априорное распределение является обучаемым.

Ключевой механизм контроля длительности обучения – мониторинг целевой функции на валидационной выборке. Этот механизм останавливает обучение при отсутствии улучшения метрики в течение некоторого окна эпох и восстанавливает веса из лучшего найденного чекпоинта.

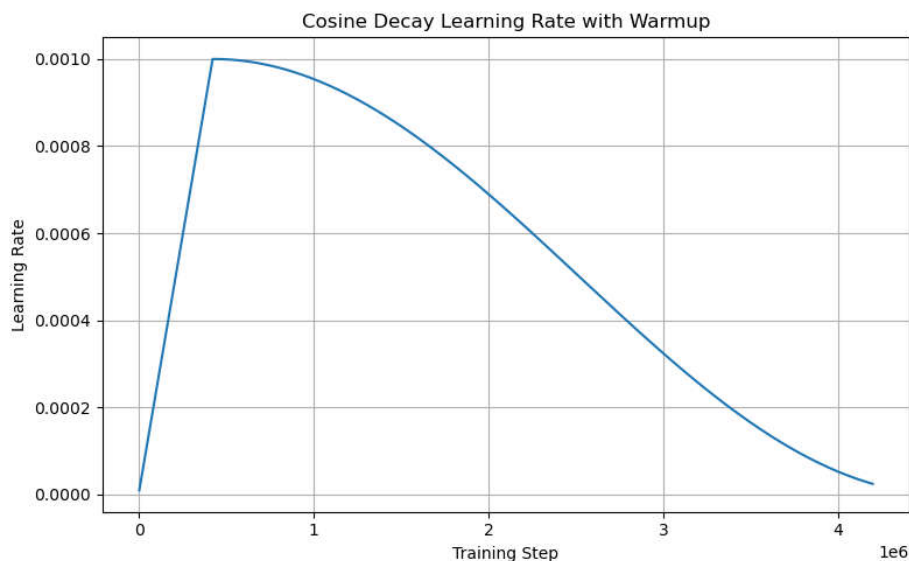


Рис. 2. Режим скорости обучения.

Использование BNN для аппроксимации и последующей экстраполяции расчетов NCSM является перспективным: модель с вероятностной формулировкой даёт интерпретируемую оценку неопределённости и в ряде случаев пригодна для экстраполяции в недоступные зоны NCSM. Вместе с тем trainable prior требует осторожной настройки (инициализация, регуляризация, контроль числа параметров и оптимизация), особенно при ограниченной обучающей выборке; предложенные практики существенно повышают устойчивость и качество предсказаний.

1. Navrátil P., Vary J.P., Barrett B.R. Large-basis ab initio no-core shell model and its application to ^{12}C // Phys. Rev. C. – 2000. – Vol. 62. – Article 054311.
2. Navrátil P., Quaglioni S., Stetcu I., Barrett B.R. Recent developments in the no-core shell model // arXiv preprint arXiv:0904.0463, 2009.
3. Neal R.M. Bayesian Learning for Neural Networks. // New York: Springer-Verlag, 1996. – Lecture Notes in Statistics.
4. Blundell C., Cornebise J., Kavukcuoglu K., Wierstra D. Weight Uncertainty in Neural Networks // Proc. 32nd Int. Conf. on Machine Learning (ICML). – 2015. – arXiv:1505.05424.
5. TensorFlow Probability. URL: <https://www.tensorflow.org/probability> (дата обращения: 10.08.2025).
6. Dillon J.V., Langmore I., Tran D., Brevdo E., Vasudevan S., Moore D., Patton A., Alemi A., Hoffman M., Saurous R. TensorFlow Distributions // arXiv preprint arXiv:1711.10604, 2017.
7. R.E. Sharypov, A.I. Mazur, A.M. Shirokov, Machine learning for extrapolating no-core shell model results to infinite basis // Journal of Subatomic Particles and Cosmology, – 2025, V. 4, 100083
8. Loshchilov I., Hutter F. SGDR: Stochastic Gradient Descent with Warm Restarts // arXiv preprint arXiv:1608.03983, 2016.
9. Goyal P., Dollár P., Girshick R., Noordhuis P., Wesolowski L., Kyrola A., Tulloch A., Jia Y., He K. Accurate, Large Minibatch SGD: Training ImageNet in 1 Hour // arXiv preprint arXiv:1706.02677, 2017.
10. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is All You Need // Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS). – 2017. – P. 6000–601

Секция

«Физика конденсированных сред»

УДК 537.226

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОГО РАСТВОРА $\text{Pb}_{0,9}\text{Ba}_{0,1}(\text{Zr}_{0,9}\text{Ti}_{0,1})\text{O}_3$, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ НАНОПОРОШКОВ

С.В. Барышников

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

Исследованы температурные зависимости диэлектрической проницаемости и величина спонтанной поляризации для керамики $\text{Pb}_{0,9}\text{Ba}_{0,1}(\text{Zr}_{0,9}\text{Ti}_{0,1})\text{O}_3$, полученной из нанопорошков. Обнаружено, что добавление наночастиц титаната бария в цирконат свинца приводит к увеличению диэлектрической проницаемости и возникновению сегнетоэлектрической фазы в широком температурном интервале.

Введение

В современной электронной промышленности особое внимание уделяется развитию наноматериалов, обладающих уникальными свойствами, отличающимися от характеристик классических аналогов. Одними из ярких представителей данной категории являются нанокерамические материалы, чьи физико-химические особенности существенно зависят от размеров частиц и структуры образующих их элементов. Переход вещества в наномасштабную размерность оказывает значительное воздействие на многие ключевые параметры материала, такие как механическая прочность, теплопроводность, электрофизические показатели и химическая активность. Причина подобного поведения кроется в резком увеличении удельной поверхности и снижении общей энергии системы, что способствует увеличению химической устойчивости и улучшению функциональных качеств наноматериала.

Среди широкого спектра перспективных нанокерамических соединений особое место занимает цирконат свинца (PbZrO_3), впервые признанный антисегнетоэлектриком ещё в первой половине XX века [1]. Его уникальная способность изменять свою структуру при варьировании внешних условий представляет значительный интерес для фундаментальных исследований и практических приложений. Известно, что при температуре около 230 °С структура PbZrO_3 переходит из кубической симметрии (параметры решётки $a \approx 4,15 \text{ \AA}$) в орторомбическую модификацию ($a = 5,888 \text{ \AA}$, $b = 11,758 \text{ \AA}$, $c = 8,222 \text{ \AA}$) [2, 3], сопровождаясь характерной диэлектрической аномалией. Эта особенность обуславливает появление специфической сегнетоэлектрической фазы, наблюдаемой в ограниченном температурном диапазоне около 10 – 25 °С ниже фазового перехода [4, 5].

В ряде работ была продемонстрирована возможность управления стабильностью сегнетоэлектрической фазы путём внешних воздействий, такими как приложение электрического поля или механических

напряжений. Поверхностные явления, возникающие в тонких слоях материала, играют ключевую роль в формировании сегнетоэлектрической активности в тонких пленках.

Актуальность детального понимания механизмов возникновения и стабилизации сегнетоэлектрической фазы обусловлена возможностью практического применения цирконата свинца в современных электронных устройствах. Важнейшим направлением является изучение способов контроля соотношения ферро- и антиферроэлектрических состояний в тонких плёнках и композитах.

Цель настоящей работы заключалась в изучении влияния добавок частиц титаната бария диаметром 200 нм на процесс формирования и стабильность сегнетоэлектрической фазы в керамической матрице PbZrO_3 , приготовленной из высокодисперсных порошков оксида свинца и оксида циркония.

Получение керамических образцов

Для приготовления образцов PbZrO_3 был использован химически чистый PbO , предварительно измельченный в течение часа на вибрационной мельнице MM 500 Control при частоте 30 Гц (в присутствии воды), после измельчения средний размер частиц PbO составлял 500 нм. В качестве второго компонента использовался ZrO_2 высокой чистоты (99,9 %) с размером частиц 20 нм производства Zhengzhou Haixu Abrasives Co., Ltd. (Китай). В качестве добавки для получения композитной керамики использовался титанат бария со средним размером частиц 200 нм от компании Mann Grain Nano Technology Co., Ltd. (КНР) с чистотой 99,9 %. Процентное содержание BaTiO_3 составляло 10 моль %.

Приготовленная шихта в течение часа перемешивалась с использованием вибрационной мельницы. После этого смесь прессовалась при давлении $8 \cdot 10^3$ кг/см². Образцы после прессования имели форму дисков с диаметром 10 мм и толщиной 1,5 мм. Температура спекания составляла 1150 °С, время выдержки при заданной температуре – 2 ч.

Методы исследования

Диэлектрические характеристики определялись с помощью измерителя импеданса марки Е7-25, работающего в частотном диапазоне от 25 Гц до 10^6 Гц. Контроль температуры проводился прибором «Термодат-13К5», оснащённым хромель-алюмелевой термопарой, обеспечивающей точность измерения порядка 0,1 °С. Для достижения наиболее полных результатов исследование велось методом последовательного нагревания и охлаждения образца в температурном диапазоне 25 – 250 °С, данные фиксировались пошагово с интервалом в 0,2 градуса.

Исследование спонтанной поляризации полученной керамики проводилось методами нелинейной диэлектрической спектроскопии [6, 7], петель гистерезиса [8] и пирозлектрического эффекта [9].

Метод нелинейной диэлектрической спектроскопии заключается в определении коэффициента третьей гармоники $\gamma_{3\omega}$, вычисляемого как отношение амплитуд третьего гармонического сигнала ($I_{3\omega}$) к исходному току на основной частоте ($\omega = 2\pi \cdot 2000$ с⁻¹). Данный коэффициент непосредственно отражает величину спонтанной поляризации, позволяя детально проследить её изменение в зависимости от температуры. При полях порядка коэрцитивного коэффициент третьей гармоники пропорционален спонтанной поляризации. Однако при малых полях величина $\gamma_{3\omega}$ пропорциональна $\sim P^2 \varepsilon^3$ и определение абсолютной величины спонтанной поляризации проблематично [10].

Для определения спонтанной поляризации методом петель гистерезиса тоже требуются электрические поля больше или порядка коэрцитивного. При меньших полях мы можем утверждать только то, что спонтанная поляризация не меньше какой-то величины.

В этом смысле пирозлектрический эффект является более универсальным методом, однако полученный результат зависит от степени предварительной поляризации образца. В эксперименте измерения пирозлектрического тока производилось в условиях короткого замыкания, которое поддерживалось с помощью операционного усилителя [9]. Спонтанная поляризация вычислялась путем интегрирования пирозлектрического тока по времени.

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис.1 представлены температурные зависимости диэлектрической проницаемости и коэффициента третьей гармоники для образцов керамики $\text{Pb}_{0,9}\text{Ba}_{0,1}(\text{Zr}_{0,9}\text{Ti}_{0,1})\text{O}_3$, спечённых при температуре 1150 °С. Согласно полученным данным, максимальное значение диэлектрической проницаемости достигает ~18000. Из температурной зависимости $\gamma_{3\omega}$ следует, что сегнетоэлектрическая фаза возникает ниже фазового перехода при 225 °С и существует вплоть до комнатной температуры (23 °С). Наличие большой диэлектрической проницаемости и широкой области существования полярной фазы в отличие от керамики того же состава, полученной из частиц с микронными размерами, [11] может быть интерпретировано как следствие более эффективного взаимодействия наночастиц BaTiO_3 с PbZrO_3 на стадии формирования твердого раствора.

Так как модулирующее поле в эксперименте составляло ~ 500 В/см, что меньше коэрцитивного, коэффициент $\gamma_{3\omega}(T)$ может только качественно характеризовать спонтанную поляризацию.

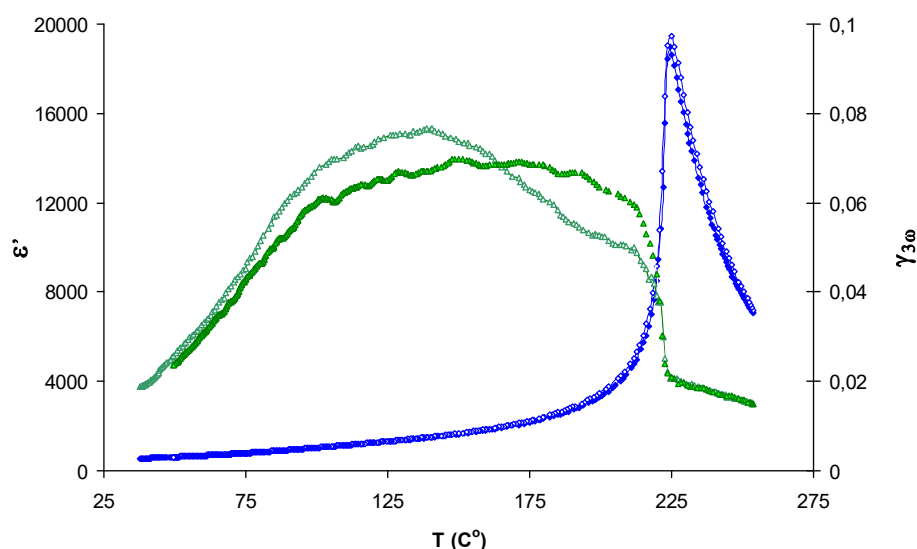


Рис.1. Зависимости $\epsilon'(T)$ и $\gamma_{3\omega}(T)$ для керамики $\text{Pb}_{0,9}\text{Ba}_{0,1}(\text{Zr}_{0,9}\text{Ti}_{0,1})\text{O}_3$.

Заполненные маркеры – нагрев, незаполненные – охлаждение.

Абсолютное значение спонтанной поляризации можно было бы получить из петель гистерезиса. Наличие петель гистерезиса подтверждает существование спонтанной поляризации в интервале температур от 50 °С до температуры фазового перехода. Значение спонтанной поляризации, определённое из петли гистерезиса при 150 °С (рис. 2), составляет не менее 12 мКл/см². Максимальная напряженность поля в эксперименте составляла ~7 кВ/см, что недостаточно для выхода поляризации на насыщение, и, следовательно, не позволяет более точно определить величину P_s .

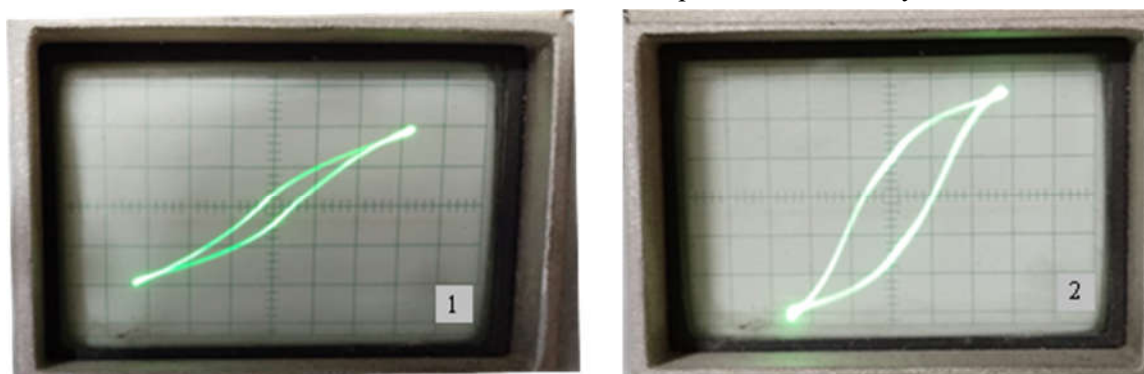


Рис. 2. Петли гистерезиса для образца $\text{Pb}_{0,9}\text{Ba}_{0,1}(\text{Zr}_{0,9}\text{Ti}_{0,1})\text{O}_3$ при температуре 50 С° (1) и 150 С° (2).

Поэтому для уточнения значения спонтанной поляризации керамики $\text{Pb}_{0.9}\text{Ba}_{0.1}(\text{Zr}_{0.9}\text{Ti}_{0.1})\text{O}_3$ были проведены пьезоэлектрические измерения. Для полной поляризации образцов последние нагревались до температуры 230°C и под полем (5 кВ/см) охлаждались. На рис. 3 приведена зависимость $P_s(T)$, полученная из пьезоэлектрических измерений (кривая 1). Для сравнения на этом же графике приведена зависимость $P_s(T)$ для поляризованной керамики титаната бария (кривая 2), полученная при тех же условиях. Откуда следует, что спонтанная поляризация для керамики $\text{Pb}_{0.9}\text{Ba}_{0.1}(\text{Zr}_{0.9}\text{Ti}_{0.1})\text{O}_3$, полученной из нанопорошков, примерно в три раза больше, чем у керамики BaTiO_3 .

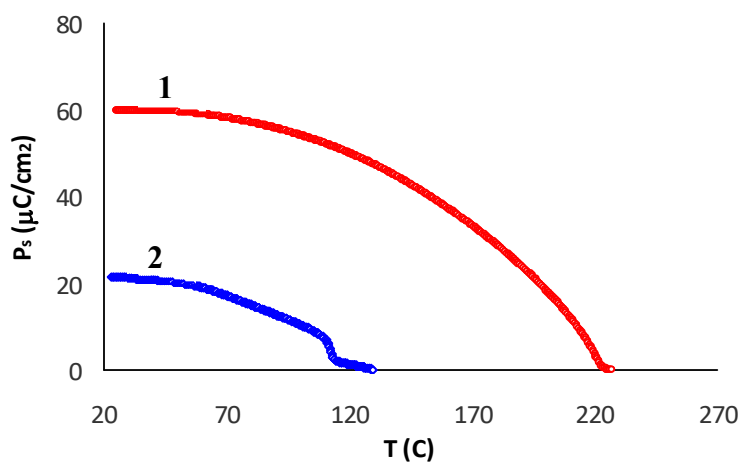


Рис.3. Зависимости $P_s(T)$ для керамики $\text{Pb}_{0.9}\text{Ba}_{0.1}(\text{Zr}_{0.9}\text{Ti}_{0.1})\text{O}_3$ (1) и BaTiO_3 (2), полученные из пьезоэлектрических измерений.

Заключение

В результате проведённого исследования установлено, что добавление наночастиц титаната бария (BaTiO_3) в керамику на основе цирконата свинца (PbZrO_3) приводит к значительной модификации её диэлектрических свойств. Титанат бария способствует расширению температурного интервала существования сегнетоэлектрической фазы вплоть до комнатной температуры. При этом спонтанная поляризация полученной керамики соизмерима со спонтанной поляризацией таких сегнетоэлектриков, как титанат свинца ($P_s > 60\text{ мкКл/см}^2$) и ниобат лития ($P_s > 70\text{ мкКл/см}^2$) [9].

1. Sawaguchi E., Maniva H., Hoshino S. Antiferroelectric structure of lead zirconate. // Phys. Rev. –1951. – V. 83. – P. 1078.
2. Shirane G., Sawaguchi S., Tagaki Y. Dielectric Properties of Lead Zirconate Phys. Rev. – 1951. – V. 84. – P. 476.
3. Jaffe B., Cook W. R., Jaffe H. Piezoelectric Ceramics. London and New York: Academic Press. – 1971. – 317 p.
4. Tennery, V.J. High-temperature phase transition in PbZrO_3 . // Journ. Amer. Ceram. Soc. – 1966. – V.49. – P. 483 – 486.
5. Scott, B.A. Crystal growth and observation of the ferroelectric phase of PbZrO_3 / B.A. Scott, G. Burns // Journ. Amer. Ceram. Soc. – 1972. – V.55. – P. 331 – 333.
6. Miga S., Dec J., Kleemann W. Computer-controlled susceptometer for investigating the linear and nonlinear dielectric response //Rev. Sci. Instrum. – 2007. –V. 78, No. 3. – P. 033902.
7. Baryshnikov S. V., Milinsky A. Yu., Stukova E. V. Linear and nonlinear dielectric properties of ceramics obtained from barium titanate nanopowder. // Glass and Ceram. – 2024. – V.81.– P.152 – 156.
8. Г.А. Смоленский, В.А. Боков, В.А. Исупов, Н.Н. Крайник, Р.Б. Пасынков, М.С. Шур. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. Л.: Наука – 1971. – С. 355.
9. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. / Перевод с английского под редакцией Леманова В.В., Смоленского Г.А. М.: Мир – 1981. – 736 с.

10. Милинский, А.Ю. Шацкая Ю.А., Антонов А.А., Барышников С.В. Метод нелинейной диэлектрической спектроскопии для исследования сегнетоэлектриков в случае сильных полей. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – №4. – С.83-89.

11. Smolensky G.A., Agranovskaya A.T., Krainik N.N. Ferroelectric Properties of BaTiO₃-PbZrO₃ Solid Solutions. // Doklady Akademii Nauk SSSR. – 1953. –V. 91. – P. 55-58.

УДК 538.915

ХАОТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛЕГИРОВАННЫХ III-НИТРИДОВ

В.Б. Бондаренко, А.В. Филимонов, В.В. Кораблев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург)

vyacheslav.b.bondarenko@mail.ru

В работе исследуется естественный размерный эффект на поверхности легированных III-нитридов на примере нитрида галлия n-типа. Обсуждаются особенности экранирования электроактивных дефектов (точечных и линейных) и структуры хаотического потенциала на поверхности GaN в условиях самокомпенсации. В рамках статистического анализа пуассоновского ансамбля заряженных дефектов определены амплитуда и масштаб хаотического потенциала. Показано, что при больших степенях самокомпенсации на поверхности доминируют неоднородности полей заряженных дислокаций.

Замечательные свойства III-нитридов (AlN, GaN, InN) для полупроводниковой электроники в значительной мере девальвированы дефектностью соответствующих исходных кристаллических структур. Наличие в данных системах технологически обусловленных прорастающих дислокаций несоответствия с концентрацией более 10^9 см⁻² ухудшают параметры контактных структур на основе данных материалов [1, 2]. Ситуация осложняется нетривиальным экранированием электрических полей сосредоточенных зарядов в слоях обеднения у поверхности, где имеет место естественный размерный эффект [3 – 7] – сопоставимость характерной длины экранирования со средним расстоянием между источниками полей. В ряде случаев необходимо учитывать изменения размерных отношений и возможную самоорганизацию объёмного и поверхностного заряда в частично компенсированных системах [6]. При этом недостаточно сведений об изменении электрофизических свойств указанных полупроводников и контактов в условиях фактически компенсирующего действия дислокационных состояний. Кроме того, сама локализация подвижных носителей на протяжённых линейных дефектах влечёт формирование неоднородного электрического поля в слоях пространственного заряда III-нитридов и модификацию поверхностного потенциала [8]. Другими словами, на поверхности в зависимости от характера и плотности поверхностных электронных состояний, а также условий экранирования полей сосредоточенных зарядов возникает своеобразный по величине и масштабу хаотический потенциал. Цель настоящей работы – проанализировать естественный размерный эффект у поверхности легированных III-нитридов в условиях их самокомпенсации и определить амплитуду и протяжённость хаотического потенциала, возникающего на поверхности указанных полупроводниковых материалов.

Для определённости рассмотрим нитрид галлия, легированный донорами. При наличии в дан-

ной системе дислокаций с поверхностной концентрацией N_{disl} часть электронов проводимости будет захвачено на дислокационных состояниях. Определяющим фактором, характеризующим указанную компенсацию, будем полагать отношение

$$K = \frac{\lambda N_{disl}}{e N_0}, \quad (1)$$

где λ – линейная плотность заряда на дислокациях; N_0 – уровень легирования; $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ СГСЭ – элементарный заряд.

Поле поверхностного заряда при этом будет экранировано на масштабе области изгиба зон:

$$L_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon U_0}{2\pi e^2 N_0 (1 - K)}}. \quad (2)$$

Здесь U_0 – величина поверхностного изгиба зон; ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника (для GaN $\varepsilon = 10,4$ [9]). Из выражения (2) очевидно, что с увеличением степени компенсации K (например, с ростом величин концентрации линейных дефектов при неизменном уровне заполнения дислокационных состояний) растет и ширина области пространственного заряда L_0 . Указанная зависимость в целом снижает остроту естественного размерного эффекта в слоях обеднения у границ раздела и в контактах, поскольку уже при относительно небольших значениях K может выполняться приближение твердотельной плазмы:

$$N_0 L_0^3 \gg 1. \quad (3)$$

Последнее, однако, достигается ростом структурного беспорядка в системе и, возможно, изменением условий экранирования неоднородных электрических полей электроактивных дефектов на самой поверхности полупроводника. Кроме того, в широком диапазоне параметров $N_{disl} L_0^2 < 1$. Следовательно, учет влияния полей заряженных дислокаций на свойства поверхностной подсистемы является необходимым.

Статистический анализ проявления естественного размерного эффекта у поверхности донорного GaN и оценку флуктуаций электрических полей проведем в предположении некоррелированной локализации дефектов. В этом случае сформированные ансамбли сосредоточенных зарядов можно считать пуассоновскими:

$$p(N) = \frac{\langle N \rangle^N \exp(-\langle N \rangle)}{N!}. \quad (4)$$

В распределении (4) $p(N)$ – вероятность найти ровно N заряженных доноров (или дислокаций) в некотором характерном объеме (или на соответствующем участке поверхности); $\langle N \rangle$ – среднее количество этих дефектов. Параметр данного распределения вероятностей $\langle N \rangle$ задает также второй его момент (т.е. дисперсию распределения) и определяет флуктуацию количества источников электрического поля. Поскольку указанные заряженные дефекты находятся у поверхности, флуктуации поверхностного потенциала зависят от состояния двумерного электронного газа. При наличии на поверхности делокализованных электронных состояний высокой плотности $D \geq 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ для дальнейшего анализа полей электроактивных дефектов можно воспользоваться методом электростатических изображений и приближением Томаса-Ферми [4, 7]. Учитывая статистическую независимость случайных полей заряженных доноров и дислокаций для амплитуды хаотического потенциала на поверхности легированного GaN имеем:

$$\delta U = \frac{1}{D} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\frac{N_0}{L_0} + \frac{\lambda^2 N_{disl}}{e^2} \right)}. \quad (5)$$

Характерный масштаб флуктуаций поверхностного потенциала, определяемый дисперсией диэлектрического отклика двумерного электронного газа, зависит от параметра экранирования в двумерной подсистеме $q_s = 4\pi e^2 D / (\epsilon + 1)$ и оценивается из следующего выражения:

$$R_0 \approx \sqrt{\frac{2L_0}{q_s}}. \quad (6)$$

Полученный масштаб хаотического потенциала (6) увеличивается с ростом степени компенсации K и при выбранной плотности поверхностных состояний существенно превышает характерную длину экранирования в двумерном электронном газе q_s^{-1} .

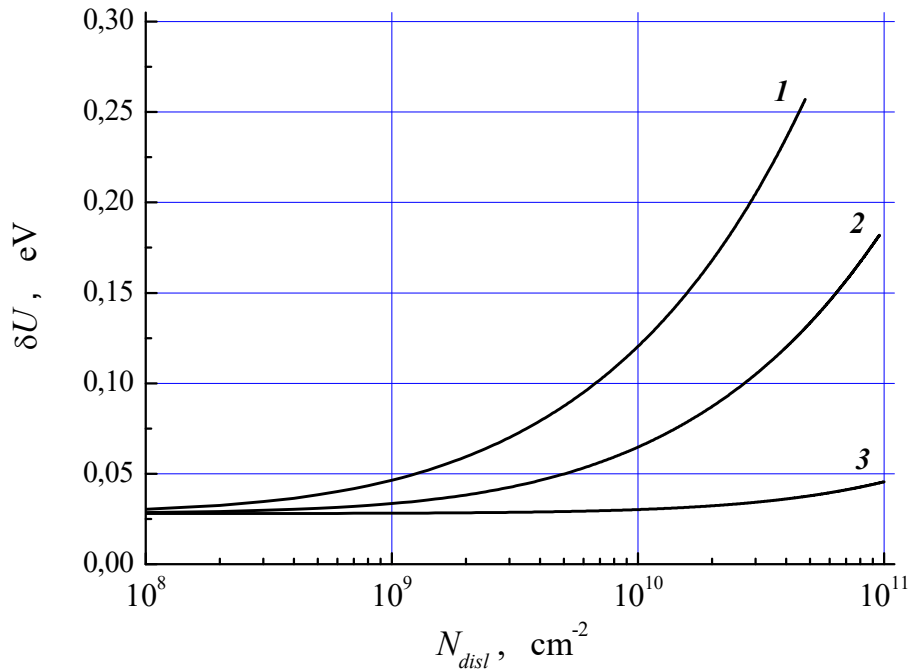


Рис. 1. Графики зависимости амплитуды хаотического потенциала на проводящей поверхности GaN n-типа (концентрация доноров 10^{18} см⁻³, поверхностный изгиб зон 1,5 эВ) с плотностью электронных состояний 10^{13} см⁻²эВ⁻¹ от концентрации дислокаций при трех значениях их линейной плотности заряда λ (в единицах СГСЭ): 1 – 0,01, 2 – 0,005, 3 – 0,001.

На рис.1 приведены результаты расчета по формуле (5) зависимости $\delta U(N_{disl})$ для ряда типичных параметров системы. Из данных зависимостей очевиден рост величин δU при увеличении концентрации заряженных дислокаций. В частности, для близких к предельному значению степени заполнения дислокационных состояний (что соответствует линейной плотности заряда порядка 0,01 СГСЭ) средние флуктуации потенциальной энергии электрона на поверхности при заданной плотности поверхностных состояний превышают его тепловую энергию при комнатной температуре уже при $N_{disl} = 10^9$ см⁻². Увеличение концентрации заряженных дислокаций до уровня 10^{10} см⁻² может приводить к значениям δU порядка 100 мэВ. При этом характерный масштаб данных изменений потенциальной энергии электрона на поверхности R_0 составляет около 30 нм. В этих условиях хаотический потенциал перестает быть мелкомасштабным, поскольку величина R_0 становится сравнимой с длиной волны теплового электрона.

Подведем некоторые итоги проведенных исследований. Оценки показывают, что даже на проводящей поверхности легированных III-нитридов возможно формирование заметного хаотического

потенциала, обусловленного неоднородными полями заряженных дефектов. В рамках статистического анализа установлено, что определяющим фактором роста параметров данного хаотического потенциала является самокомпенсация, связанная с захватом носителей на дислокационных состояниях. В условиях высоких заселенностей этих состояний (т.е. при $\lambda \sim 0,01$ СГСЭ) и плотности дислокаций, превышающей 10^9 см^{-2} , на поверхности доминируют неоднородности полей заряженных дислокаций.

1. Brandt O., Muralidharan R., Waltereit P., Thamm A., Trampert A., von Kiedrowski H., Ploog K.H. Critical issues for the growth of high-quality (Al,Ga)N/GaN and GaN/(In,Ga)N heterostructures on SiC(0001) by molecular-beam epitaxy // Applied Physics Letters. – 1999. – V. 75. No. 25. – P. 4019–4021.

2. Debdeep J., Gossard A. C., Mishra U. K. Dislocation scattering in a two-dimensional electron gas // Applied Physics Letters. – 2000. – V. 76. No. 13. – P. 1707–1709.

3. Бондаренко В. Б., Кудинов Ю. А., Ершов С.Г., Кораблев В.В. Естественные неоднородности потенциала у поверхности примесного полупроводника // Физика и техника полупроводников. – 1996. – Т. 30. № 11. – С. 2068–2076.

4. Бондаренко В. Б., Кузьмин М. В., Кораблев В.В. Анализ естественных неоднородностей потенциала у поверхности примесного полупроводника // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35. № 8. – С. 964–968.

5. Бондаренко В. Б., Давыдов С. Н., Филимонов А. В. Естественные неоднородности потенциала на поверхности полупроводника при равновесном распределении примеси // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44. № 1. – С. 44–47.

6. Бондаренко В. Б., Филимонов А. В. Хаотический потенциал на поверхности компенсированного полупроводника в условиях самоорганизации электрически активных дефектов // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49. № 9. – С. 1223–1226.

7. Бондаренко В. Б., Филимонов А. В., Kumar R. Хаотический потенциал заряженных дислокаций в гетероконтактах III-нитридов // Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. № 1. – С. 12–14.

8. Филимонов А. В., Бондаренко В. Б. Хаотический потенциал заряженных дислокаций в гетероконтактах III-нитридов при локализации двумерного электронного газа // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2024. – Т. 17. № 1. – С. 21–28.

9. Jena D. and Wood C. Polarization Effects in Semiconductors: From Ab Initio Theory to Device Applications. New York: Springer, 2008.

УДК 539.23:535.33: 536.21:537.3

ТОНКИЕ ПЛЕНКИ МОНОСИЛИЦИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ НА КРЕМНИИ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОНИКИ И СПИНТРОНИКИ

Н.Г. Галкин¹, К.Н. Галкин¹, Д.Л. Горошко¹, Е.Ю. Субботин¹, С.А. Балаган¹, О.А. Горошко¹, И.М. Чернев¹, А.М. Маслов¹, О.В. Кропачев¹, С.А. Доценко¹, А.В. Герасименко², И.А. Ткаченко²

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

²Институт химии ДВО РАН (г. Владивосток)

galkin@iacp.dvo.ru

Методами твердофазной эпитаксии и молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках кремния с ориентациями (111) и (100) выращены ультратонкие (УТ, 3 – 4 нм) и тонкие (14 – 80 нм) пленки FeSi, CrSi и CoSi в

© Галкин Н.Г., Галкин К.Н., Горошко Д.Л., Субботин Е.Ю., Балаган С.А., Горошко О.А., Чернев И.М., Маслов А.М., Кропачев О.В., Доценко С.А., Герасименко А.В., Ткаченко И.А., 2025

диапазоне температур от 350 °C до 500 °C. Температурные измерения магнетосопротивления и эффекта Холла позволили определить механизмы проводимости в различных температурных диапазонах. Установлено, что УТ пленки моносилицидов обладают двумерной проводимостью, регистрируемой ниже 30 К. В УТ и тонких пленках FeSi в диапазоне температур 50 – 160 К наблюдается эффект Кондо с открытием малой запрещенной зоны 8,8 – 23 мэВ. Температурные (80-450 К) измерения термо-эдс показали, что в тонких пленках FeSi, CrSi и CoSi в случае роста методом МЛЭ наблюдается слабая температурная зависимость фактора мощности и его высокие значения: (2,0 – 5,0) мВт/(м·К²). Первопринципные расчеты решеточной теплопроводности для FeSi и CoSi позволило провести оценочные расчеты термоэлектрической добротности: $ZT = 0,25 - 0,50$ при $T = 200 - 450$ К. Температурные магнитные измерения для выращенных пленок продемонстрировали наличие ферромагнетизма с переходом в спиновое стекло выше 60 К. Для пленок моносилицидов Fe, Cr и Co предложены применения в термоэлектронике и спинтронике.

Моносилициды переходных металлов (ПМ) (CrSi, FeSi, CoSi) привлекают внимание как сильно коррелированные материалы для термоэлектроники и спинтроники с теоретической и экспериментальной точек зрения [1, 2]. Это связано с разнообразием их оптических, электрических, магнитных и спиновых свойств [3 – 6] как полуметаллов. Однако ультратонкие (УТ) пленки FeSi с точки зрения транспорта носителей только начали исследоваться [2, 7]. Кроме того, для них теоретически продемонстрирована перестройка структуры из кубической (B20, P2₁3) в моноклинную [7]. УТ пленки FeSi, CrSi и CoSi еще не исследовались на предмет низкотемпературного магнеторезистивного эффекта и термоэлектрических свойств в среднетемпературном диапазоне от 200 до 450 К. Ранее проведенные исследования кристаллической структуры методами ХРД и ВР ПЭМ для пленок FeSi и CrSi впервые показали формирование эпитаксиальных ориентаций с кубической и моноклинной структурами [7, 8].

В представленной работе собраны и проанализированы низкотемпературные транспортные, магнетотранспортные, магнитные и термоэлектрические свойства УТ и тонких пленок FeSi, CrSi и CoSi на кремниевых подложках и сделаны оценки механизмов транспорта в магнитном поле при низких температурах и причин повышения фактора мощности для термо-эдс.

В данной работе на подложках Si(111) и Si(100) выращены УТ (3 – 4 нм) и тонкие (10 – 30 нм) пленки FeSi и CrSi с толщинами от 2 до 4 нм методом твердофазной эпитаксии (ТФЭ) при $T = 350$ °C и пленки CoSi 4-18 нм методом ТФЭ при $T = 500$ °C в условиях сверхвысокого вакуума (СВВ) – $2 \cdot 10^{-10}$ Торр в двух ростовых установках: Varian (МЛЭ-рост) и А-камера (ТФЭ-рост). До роста пленок моносилицидов ПМ после высокотемпературных кратковременных отжигов при $T = 1150$ °C с суммарной продолжительностью 5 минут [7] формировалась атомарно-чистая поверхность кремниевой подложки, что подтверждалось либо отсутствием пиков углерода и кислорода в спектрах ОЭС, либо появлением картины ДМЭ: Si(111)7×7 или Si(100)2×1. В процессе роста пленок моносилицидов осаждался металл с толщинами от 2 нм до 10 нм с последующим отжигом (метод ТФЭ), либо смесь металла с кремнием при выбранной температуре подложки (метод МЛЭ). После выгрузки образцы с выращенными пленками исследовались методом АСМ (сразу после выгрузки), а затем в течение нескольких дней готовились под транспортные, термоэлектрические (осаждение и отжиг контактных площадок) и магнитные измерения. Температурные зависимости удельного сопротивления и термо-эдс УТ пленок на кремниевых подложках получены с использованием установки Teslatron TP, оснащенной системой охлаждения замкнутого цикла (работающей в диапазоне 1,5 – 300 К) и сверхпроводящим магнитом (создающим поля до 8 Тл) для измерений Холла и магнетосопротивления. Магнитные свойства образцов изучались с помощью вибрационного магнитометра из состава комплекса измерения физических свойств Quantum Design PPMS 9T ЕСII. Полевые зависимости получены при двух температурах: 300 и 3(4) К, и диапазоне полей ±2 Тл для двух направлений (вдоль (in-plane) и перпендикулярно (out-plane) к плоскости пленки) магнитного поля. Кристаллическую структуру выращенных пленок исследовали

методом рентгеновской дифракции (РД) в диапазоне углов 2θ от 5° до 90° с шагом по углу $0,01^\circ$ на дифрактометре D8 ADVANCE (ИК ДВО РАН) в геометрии Брэгга-Брентана. Термоэлектрические свойства пленок исследовали в атмосфере азота в диапазоне температур от 80 до 473 К на лабораторной установке «Криотел». *Ab initio* расчеты фононной зонной структуры объемного CoSi, а также решеточной теплопроводности, групповой скорости, скорости рассеяния и длины свободного пробега фононов для CoSi в объемном состоянии и в виде нанопроволок проводились с использованием пакета VASP [9] и с использованием методик, описанных в работе [10].

После выгрузки образцов из А-камеры и из камеры установки Varian с различными толщинами осажденных металлов или смесей металл-кремний, отожженных для железа и хрома при $T = 350^\circ\text{C}$ и для кобальта – при $T = 500^\circ\text{C}$, исследовали морфологию всех образцов с пленками методом АСМ. Установлено, что пленки с минимальной толщиной металла (Fe, Cr, Co) (2 нм), сформированные методом ТФЭ, имели гладкую поверхность с шероховатостью около 0,4 – 0,8 нм. С увеличением толщины (от 4 до 10 нм) осажденного металла происходит переход к росту нанокристаллитов с размерами от 50 до 100 нм и растет среднеквадратичная шероховатость от 1,2 до 3,9 нм. Для образцов с большей толщиной использовался метод МЛЭ с предварительным формированием затравочного слоя методом ТФЭ (толщина металла 2 нм, плюс отжиг). Образцы с большей толщиной пленок моносилицидов Fe, Cr и Co (14 – 80 нм) по данным АСМ состояли из нанокристаллов с размерами 50 – 150 нм и шероховатостью 5 – 14 нм. Исследования структуры пленок с минимальной толщиной в методе ТФЭ являлись однофазными моносилицидами. Но при росте толщины осажденного металла на поверхности оставалось непрореагировавший металл. При росте методом МЛЭ пленки являлись по большей части однофазными с эпитаксиальной ориентацией, но появлялись зерна с другой ориентацией, то есть пленки становились поликристаллическими с ростом толщины осажденной смеси металл – кремний. Полученные из рентгенограмм значения постоянных решеток FeSi, CrSi и CoSi при росте методом ТФЭ имели напряженную структуру до $-(1-2)\%$ (сжатие). Пленки, выращенные методом МЛЭ, показали практически $(0,1 - 0,16\%)$ релаксированную структуру.

Проведены исследования низкотемпературного транспорта (2 – 300 К) ряда УТ и тонких пленок FeSi, CrSi и CoSi. Поскольку рост пленок осуществлялся на высокоомной подложке кремния Si(111) FZ1000 n-типа проводимости, то после СВВ-очистки при 1150°C в ней изменяется тип проводимости с n- на p-тип, что коррелирует с данными работы [11], а также сильно падает слоевое сопротивление, что увеличивает степень шунтирования пленки подложкой. Установлено, что существует диапазон температур (2 – 30 К), где шунтирование отсутствует, поэтому все дальнейшие транспортные и магнетотранспортные измерения анализировались в указанном диапазоне температур. Все выращенные УТ пленки моносилицидов ПМ продемонстрировали логарифмический характер проводимости от 2 до 30 К (рис. 1), соответствующий двумерному механизму проводимости и отсутствию вклада кремниевой подложки.

Исследование магнетотранспорта показали, что для УТ пленок FeSi при $T = 10 - 30$ К наблюдается отрицательное магнетосопротивление (ОМС) и переход через нуль (кроссовер) и положительное магнетосопротивление (ПМС) (рис. 2а), что соответствует механизму двумерной слабой локализации [12], а для УТ пленок CrSi данный эффект отсутствует (рис. 2, б), поскольку при всех температурах 2 – 30 К наблюдается только ПМС.

При этом обнаружено, что УТ пленки FeSi являются полупроводником при $T = 40 - 100$ К с $E_g \approx 14,8$ мэВ и переходом в металлическую 2D проводимость ниже 30 К [13]. УТ (3,8 нм) пленка CoSi проявляет сложные зависимости магнетосопротивления в температурном диапазоне (1,5 – 3,0 К), где наблюдаются области ОМС, ПМС и кроссоверы между ними (рис. 2в), что также соответствует механизму двумерной слабой локализации [12]. При увеличении толщины пленки до 18 нм режимы ОМС,

ПМС и кроссоверы между ними наблюдаются только при 2 К. При увеличении температуры выше 10 К наблюдается только ветви ПМС при отрицательном и положительном магнитном поле, что соответствует трехмерному механизму проводимости.

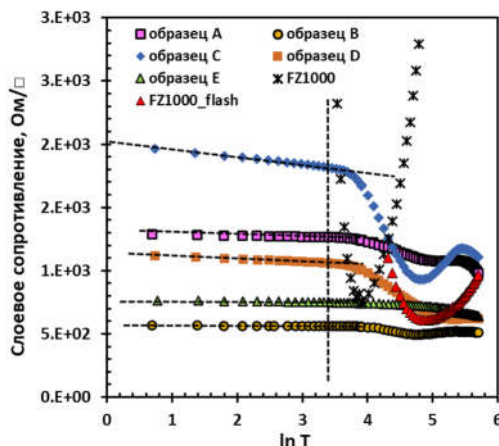


Рис. 1. Зависимости слоевого сопротивления от $\ln(T)$ для образцов с ультратонкими пленками FeSi (образцы A и B), CrSi (образцы C и D) и CoSi (образец E), а также – для не отожженной подложки FZ1000 и подложки после высокотемпературного отжига в сверхвысоком вакууме (FZ_flash); пунктирные линии обозначают область двумерной проводимости и ее границу ($T = 34$ К).

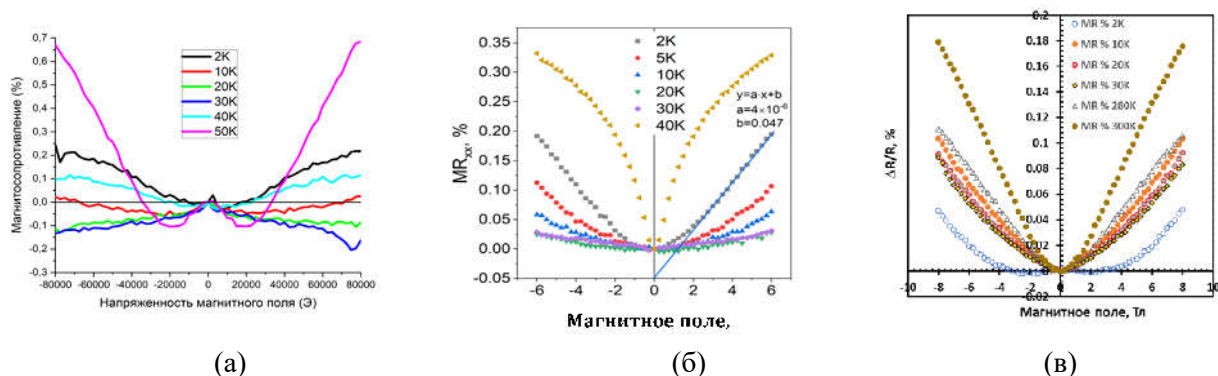


Рис. 2. Зависимости магнетосопротивления (M_{xx}) от приложенного магнитного поля в двух направлениях и при температурах $T=2-50$ К для выращенных пленок моносилицидов на кремнии: (а) пленка FeSi (толщина 3 нм); пленка CrSi (толщина 3 нм); (в) пленка CoSi (толщина 3,8 нм).

Термоэлектрические измерения для образцов с УТ и тонкими пленками CrSi (рис. 3а) и FeSi (рис. 3б) в диапазоне температур 120 – 450 К показали, что коэффициент Зеебека сохраняется положительным (50 – 200 мкВ/К) до 400 К и затем (при 400 – 450 К) меняет знак на отрицательный, что связано увеличением вклад электронов подложки в конкуренции с дырками в пленке. В то же время вклад подложки не может быть основным во всем диапазоне температур, поскольку она имеет чрезвычайно большой и отрицательный коэффициент Зеебека (от минус 300 мкВ/К при $T = 470$ К до минус 1500 мкВ/К при $T = 280$ К) [14]. То есть вклад в коэффициент Зеебека определяют носители в пленках FeSi (рис. 3а) и CrSi (рис. 3б): сначала дырки в диапазоне от 120 К до 430 К, а затем электроны от 440 К до 450 К, что свидетельствует о преимущественном вкладе кремниевой подложки.

Проведены расчеты температурных зависимостей эффективного фактора мощности и показано, что максимальные его величина 5 мВт/(м $\cdot$ К 2) при температуре 250 К наблюдаются для УТ пленки FeSi толщиной 2,85 нм, а для УТ пленки CrSi (3 нм) он резко возрастает с уменьшением температуры до 5,0 мВт/(м $\cdot$ К 2).

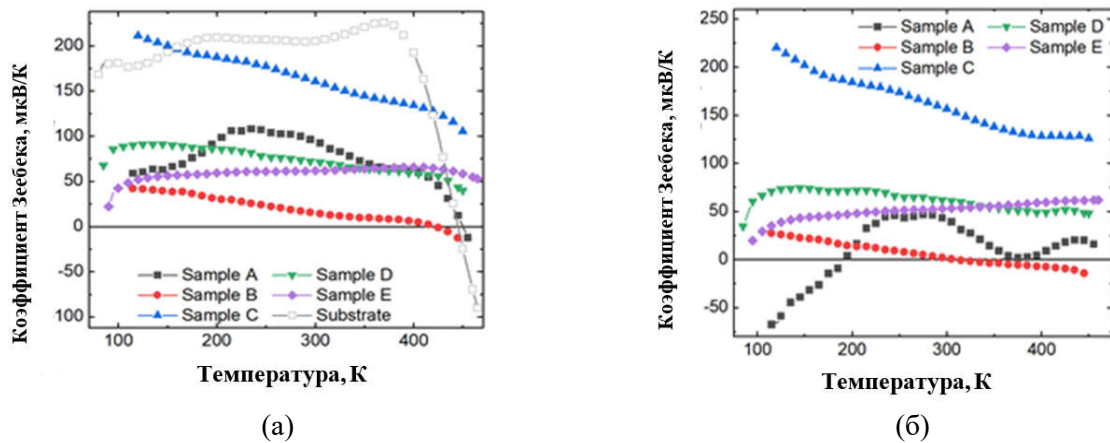


Рис. 3. Температурные зависимости коэффициента Зеебека для образцов с пленками моносилицидов: (а) FeSi/Si (с толщинами от 3 до 18 нм); (б) CrSi/Si (с толщинами от 3 до 18 нм).

Для образца A101 с пленкой CoSi толщиной 14 нм сняты зависимости эффективного удельного сопротивления (рис. 4а) и эффективного коэффициента Зеебека (S) (рис. 4б). Видно, что слоиое сопротивление имеет максимум при температуре 200 К с последующим его уменьшением к 80 К, что коррелирует с данными низкотемпературных измерений слоевого сопротивления. При этом эффективный коэффициент Зеебека имеет отрицательный знак и немонотонно уменьшается по модулю с уменьшением температуры (рис. 4б). После учета вклада кремниевой подложки (данные на графике (рис. 4а)) были проведены расчеты параметров пленки CoSi по двухслойной модели для термо-эдс и проводимости [15]. Установлено, что для пленки CoSi отрицательный знак Зеебека сохраняется и несколько уменьшается по модулю (рис. 4б), что приводит к появлению положительного коэффициента Зеебека для пленки CoSi при температурах ниже 100 К. Расчет фактора мощности ($PF=S^2 \times \sigma$) для пленки (рис. 4в) показал, что резкое уменьшение фактора мощности в районе 100 К связано со сменой знака коэффициента Зеебека для пленки CoSi (рис. 4б), а максимальный фактор мощности наблюдается в диапазоне температур от 250 К до 450 К. Его величина изменяется от 1,5 до 4,0 мВт/м²·К, что близко к данным для монокристалла CoSi [16].

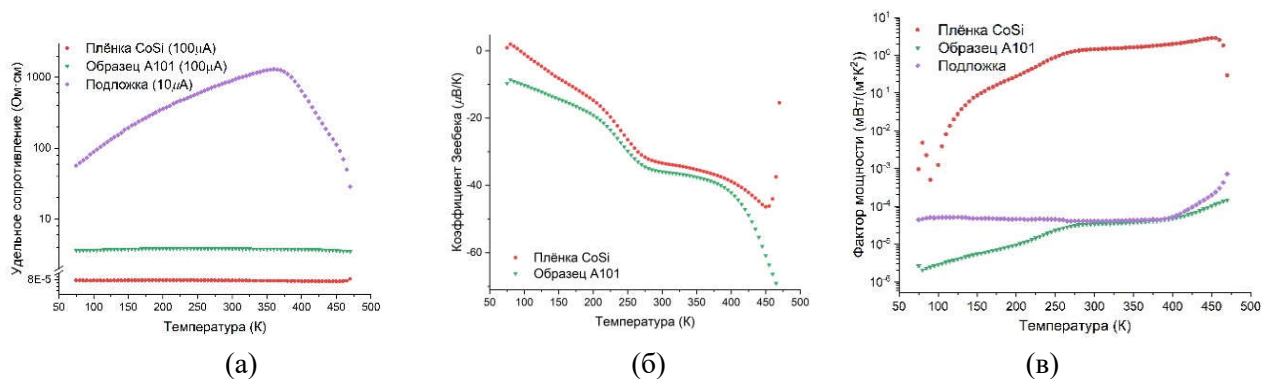


Рис. 4. Температурные зависимости удельного сопротивления (а), коэффициента Зеебека (б) и фактора мощности (в) для образца A101 с пленкой CoSi толщиной 14 нм, кремниевой подложки после высокотемпературного отжига ($T=1150$ °С, 5 минут) в сверхвысоком вакууме и пленки CoSi после расчетов в рамках двухслойной модели термо-эдс [21].

Согласно проведенным нами первопринципным расчетам фононной структуры CoSi является устойчивым соединением. Расчеты теплопроводности для объемного CoSi и его нанопроволок показали примерно (8 – 4)-кратное ее уменьшение в диапазоне от 100 К до 450 К для нанопроволок с диаметром от 4 до 18 нм по сравнению с объемным CoSi. С увеличением температуры теплопроводность (к) нанопроволок CoSi уменьшается от (8 – 5) Вт/(м·К) до (3 – 2) Вт/(м·К). Полученные величины теп-

лопроводности были использованы для оценки безразмерной термоэлектрической эффективности ($ZT = (S^2 \times \sigma \times T/k)$). Для тонкой пленки CoSi в диапазоне от 150 К до 450 К она может быть оценена следующими величинами: от $ZT = 0,0045$ при $T = 150$ К до $ZT = 0,45$ при $T = 450$ К, что заметно выше, чем для объемного и нелегированного CoSi: $ZT = 0,15$ при $T = 450$ К [17].

Полученные значения фактора мощности для УТ пленок FeSi, CoSi и CrSi сопоставимы с лучшими значениями для известных перспективных термоэлектрических материалов с $PF = 3,0 - 4,5$ мВт/(м·К²) [18 – 20], что доказывает перспективность моносилицидов переходных металлов в качестве термоэлектриков при температурах от 100 К до 400 К.

В ростовых экспериментах пленки FeSi, CrSi и CoSi не были намеренно легированы металлами в процессе роста. Однако во время высокотемпературной очистки подложки (1150 °С) на поверхности образовался слой кремния р-типа за счет легирования бором из боросиликатных стекол [11]. Это также было подтверждено экспериментально путем изучения низкотемпературной (100 – 470 К) проводимости (рис. 1) и термо-эдс (рис. 3а) высокоомного кремния (FZ1000), подвергнутого высокотемпературной очистке в сверхвысоковакуумной камере. При выращивании пленок моносилицидов на такой поверхности атомы бора могли легировать пленки FeSi и CrSi, что наблюдалась для легированных пленок FeSi [21] и CoSi [22]. В этом случае максимальная концентрация бора должна наблюдаться в тонкой пленке, выращенной методом МЛЭ (рис. 3б). Поскольку атомы бора могут легче диффундировать из подложки и встраиваться в растущий слой с-FeSi (CrSi), пленка с-FeSi (CrSi) на образце $C(E)$ демонстрирует проводимость р-типа и положительный коэффициент Зеебека во всем диапазоне температур ($T = 100 - 470$ К, рис. 3(а, б)).

Впервые для УТ пленок FeSi (рис. 5(а, б)) и CrSi (рис. 5(в, г)) обнаружено слабое ферромагнитное упорядочение, которое сохраняется в диапазоне от 3 К до 300 К и имеет параллельную и/или перпендикулярную пленке ориентации. Предположено, что появление ферромагнитного упорядочения обусловлено поверхностью или границей раздела пленка-подложка или атомами Fe (Cr) в решетке.

Асимметрия петли гистерезиса (вставка на рис. 5а) свидетельствует о наличии в пленке двухфазного ФМ-АФМ состояния. Такое смещение петли гистерезиса объясняется обменным взаимодействием, которое наблюдалось в слоистых структурах на границе слоев с ферромагнитным и антиферромагнитным упорядочением, в которых присутствовали взаимодействующие кластеры с различным ФМ-АФМ упорядочением. Магнитная необратимость ниже $T_b = 50$ К (рис. 5б), обусловленная расхождением кривых намагничивания $ZFC(T)$ и $FC(T)$, соответствует суперпарамагнитным частицам или спиновому стеклу. Следовательно, в исследуемом образце с УТ пленкой FeSi присутствуют ФМ-фаза и фаза со свойствами спинового стекла иного ФМ-АФМ порядка. Для образца с УТ пленкой CrSi при 300 К (рис. 5в) обнаружены ферромагнитные петли с остаточной намагниченностью для приложенных магнитных полей в плоскости пленки и перпендикулярно ей. При охлаждении до 3 К петли симметричны – вклад АФМ отсутствует (рис. 5г), но при этом наблюдается небольшое увеличение значения насыщения магнитного момента до 5,5 (в плоск.) и 3,5 (перпенд. плоск.) нА·м² (рис. 5г), что связано с ослаблением температурных флуктуаций магнитного момента в УТ пленке CrSi. В тонкой (14 нм) пленке CoSi при температуре 300 К наблюдалась ферромагнитная петля с практически нулевой коэрцитивной силой и магнитным моментом насыщения 7 мкм (рис. 6а).

При уменьшении температуры до 3 К наблюдается сильное возрастание коэрцитивной силы до 0,05 Тл и увеличение магнитного момента насыщения до 10,5 нА·м² (рис. 6б). На кривой FC (рис. 6в) наблюдается плавное увеличение магнитного момента в магнитном поле 0,05 Тл. Напротив, при охлаждении в нулевом магнитном поле (кривая ZFC, рис. 6в) при температуре около 60 К наблюдается максимум (температура блокировки) и далее магнитный момент резко падает с уменьшением температуры и возрастает коэрцитивная сила.

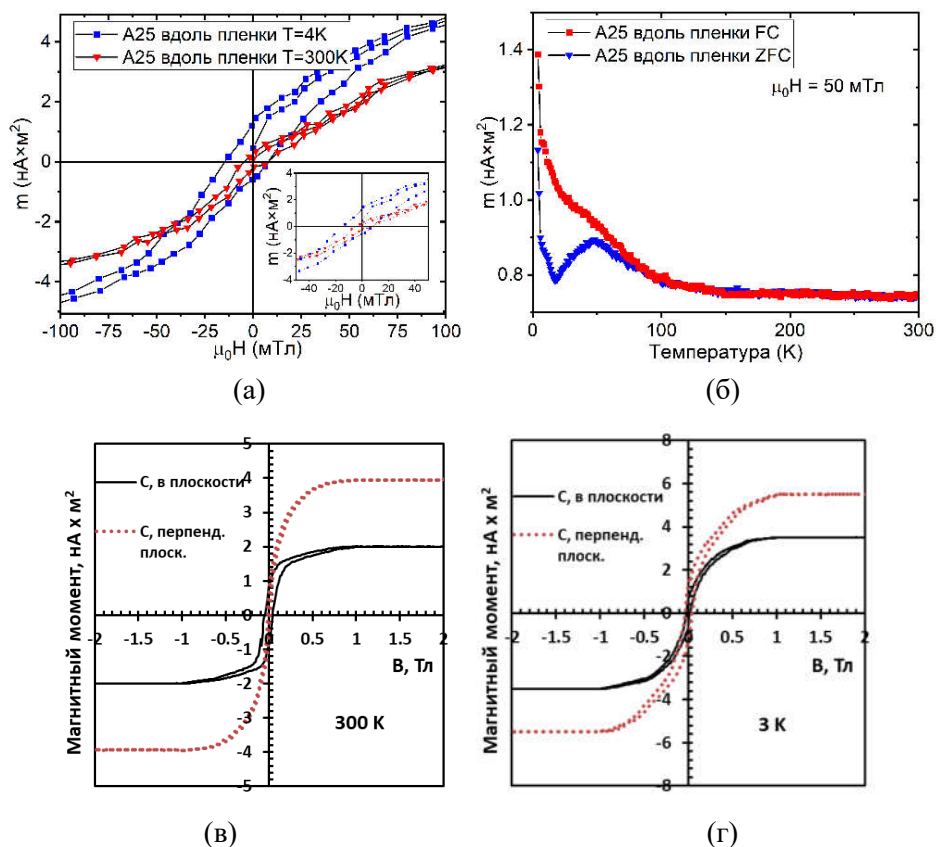


Рис. 5. Образец с УТ (3 нм) пленкой FeSi (A25): (а) ферромагнитные петли в плоскости пленки и перпендикулярно ей; (б) кривые изменения магнитного момента при остывании в магнитном поле $B = 50$ мТл (FC) и без магнитного поля (ZFC). Образец с УТ (3 нм) пленкой CrSi: (в) ферромагнитные петли в плоскости пленки и перпендикулярно ей при $T = 300$ К и (г) ферромагнитные петли в плоскости пленки и перпендикулярно ей при $T=3$ К.

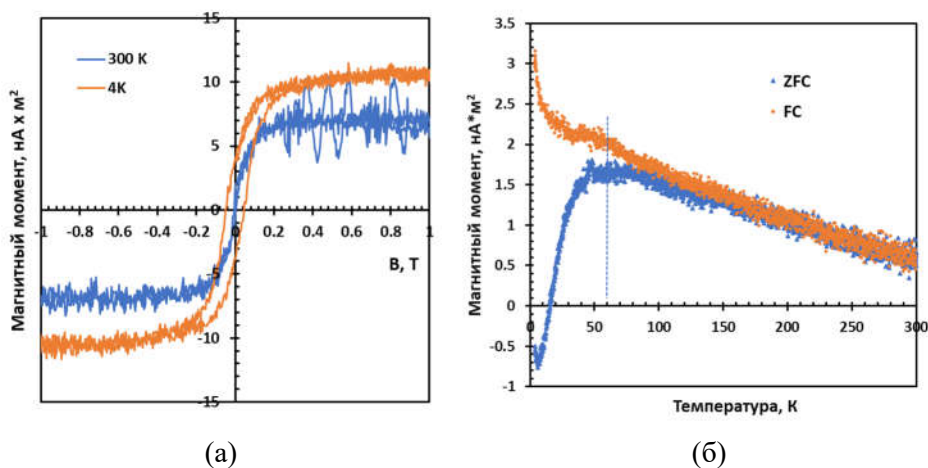


Рис. 6. Образец с тонкой (14 нм) пленкой CoSi: ферромагнитные петли с магнитным полем в плоскости пленки при температуре 300 К и 3 К (а). Кривые изменения магнитного момента при остывании в магнитном поле $B=50$ мТл (FC) и без магнитного поля (ZFC).

То есть в образце имеются большие зерна, которые имеют ферромагнитное упорядочение при температурах ниже 60 К. Нулевая коэрцитивная сила при $T = 300$ К связана с наличием в пленке частиц с малыми размерами (единицы нанометров), которые проявляют суперпарамагнитные свойства. На основе УТ и тонких пленок моносилицидов возможно создание датчиков магнитного поля.

Выводы

В работе ультратонкие (УТ, 3-4 нм) и тонкие (14-80 нм) пленки моносилицидов железа (FeSi), хрома (CrSi) и кобальта (CoSi) выращены методами твердофазной эпитаксии (ТФЭ) и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках кремния с ориентациями (111) и (100) в диапазоне температур от 350 °С до 500 °С. Проведены температурные измерения слоевого сопротивления, магнетосопротивления и эффекта Холла на выращенных образцах. Установлено, что УТ пленки моносилицидов обладают двумерной проводимостью, регистрируемой ниже 30 К, а переход от отрицательного к положительному магнетосопротивлению при температурах ниже 5 К и магнитных полях до 6 Тл связано с эффектом локализации и антилокализации. В УТ и тонких пленках FeSi в диапазоне температур 50-160 К наблюдается эффект Кондо с открытием малой запрещенной зоны 8,8 – 23 мэВ по отношению к величине в объемном FeSi (50 – 60 мэВ), что связано с растворением излишков атомов железа в кристаллической решетке FeSi. При температурах выше 160 К пленки моносилицидов Fe, Cr и Co обладают полуметаллической проводимостью, что определяется невысокой плотностью состояний дырок и электронов на уровне Ферми и сменой с ростом температуры знака коэффициента Зеебека. Проведенные температурные (80 – 450 К) измерения термо-эдс и проводимости показали, что в тонких пленках FeSi, CrSi и CoSi в случае роста методом МЛЭ наблюдается слабая температурная зависимость фактора мощности и достигаются его высокие значения: (2,0 – 5,0) мВт/(м·К²), что объяснено диффузией атомов бора в решетку моносилицидов и повышение их положительного коэффициента Зеебека. *Ab initio* расчеты решеточной теплопроводности для объемных образцов и нанопроволок FeSi и CoSi продемонстрировали 4-х – 8-ми кратное уменьшение решеточной теплопроводности по сравнению с оной в монокристаллах. Это позволило провести оценочные расчеты термоэлектрической добротности тонких пленок FeSi и CoSi ($ZT=0,25 - 0,50$ при $T=200 - 450$ К). Температурные магнитные измерения на УТ и тонких пленках моносилицидов Fe, Cr и Co продемонстрировали наличие ферромагнетизма. Установлено, что УТ пленки m-FeSi при комнатной температуре являются ультрамягким ферромагнетиком (ФМ) с перпендикулярной анизотропией, а в продольном магнитном поле они сочетают свойства ФМ и спинового стекла с ФМ-АФМ порядком. Показано, что УТ пленки m-CrSi обладают внутри плоскостными и вне плоскостными ФМ свойствами с остаточной намагниченностью для приложенных магнитных полей от минус 2 Тл до +2 Тл и для температур от 4 К до 300 К. При увеличении толщины пленки CrSi более 14 нм обнаружено формирование только ФМ свойств с малой коэрцитивной силой при $T = 4 - 300$ К в плоскости пленки. Для тонких пленок CoSi обнаружено ФМ упорядочение при $T = 3 - 60$ К от крупных зерен, а при 300 К наблюдается переход в состояние суперпарамагнетизма с температурой блокировки 60 К. Для исследованных пленок моносилицидов ПМ предложены потенциальные применения в термоэлектронике и спинтронике.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 22-12-00036, <https://rscf.ru/project/22-12-00036>. Исследования формирования пленок методами электронной спектроскопии и атомной силовой микроскопии выполнены в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема FFW-2021-0002). Рентгеновские и магнитные измерения проводились на оборудовании ЦКП Института химии ДВО РАН. Расчеты фононных зонных структур и теплопроводности произведены с использованием оборудования ЦКП "Дальневосточный вычислительный ресурс" ИАПУ ДВО РАН (<https://cc.dvo.ru>) и вычислительного кластера «Академик В. М. Матросов» (<https://hpc.icc.ru>).

1. Pshenay-Severin, D.A., Burkov A.T. Electronic Structure of B20 (FeSi-Type) Transition-Metal Monosilicides // Materials. 2019. – V.12. – P.2710.

2. Fang, Y., Ran, S., Xie, W., Wang S., Meng Y.S., Maple, M.B. Evidence for a conducting surface ground state in high-quality single crystalline FeSi // PNAS Latest Articles. 2018. - V.115. – P.8558-8562.

3. V. Jaccarino, G.K. Wertheim, J.H. Wernick, L.R. Walker, S. Aarj, Paramagnetic excited state of FeSi // *Phys. Rev.* 1967. – V. 160. – P.476-482.
4. Lacerda, A., Zhang, H., Canfield, P.C., Hundley, M.F., Fisk, Z., Thompson, J.D., Seaman, C.L., Maple, M.B. and Aeppli, G. Narrow-gap signature of $\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x}\text{Si}$ single crystals // *Physica B*. 1993. – V.186-188. – P.1043-1054.
5. K. Tajima, Y. Endoh, J.E. Fischer, G. Shirane, Spin fluctuations in the temperature-induced paramagnet FeSi // *Phys. Rev. B*. 1988. – V.38. – P.6954-6960.
6. J. Beille, J. Voiron, M. Roth, *Solid State Commun.* 47 (1983) 399.
7. Galkin, N.G., Migas, D.B., Medvedeva, N.V., Filonov, A.B., Dotsenko, S.A., Maslov, A.M., Chernev, I.M., Subbotin, E.Yu., Goroshko, D.L., Samardak, A.Yu., Gutakovskii, A.K., Tkachenko, I.A., Gerasimenko, A.V. New monoclinic ground state of FeSi // *Comp. Mater. Science*. 2024. - V. 233. - P. 112762.
8. Galkin, N.G., Galkin, K.N., Kropachev, O.V., Dotsenko, S.A. *Journal of Materials Chemistry C*, 2025. – V.13. – P.2987-2999.
9. Kresse, G., Furthmüller J. Efficiency of ab-initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set // *Computational materials science*. 1996. – V.6. - P.15-50.
10. Galkin, K.N., Chernev, I.M., Subbotin, E.Yu., Maslov, A.M., Kropachev, O.V., Goroshko, D.L., Balagan, S.A., Argunov, E.V., Gutakovskii, A.K., Galkin N.G. Ultrathin Cr and Fe monosilicides on Si(111) substrate: formation, optical and thermoelectrical properties // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2023. - V.16. - No.3.1. - P.84-89.
11. Liehr, M., Renier, M., Wachnik, R.A., Werner, J., Scilla, S.G. and Ho, P.S. Electrical Properties of Vacuum Annealed Si Surfaces // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1987. – V.5. – P. 2131-2143.
12. Fisk, Z., Sarrao, J.L., Thompson, J.D., Mandrus, D., Hundley, M.F., Miglari, A., Bucher, B., Schlesinger, Z., Aeppli, G., Bucher, E., DiTusa, J.F., Oglesby, C.S., Ott, H.-R., Canfield, P.C., Brown, S.E. Kondo insulators // *Physica B: Condensed Matter*. 1995. – V. 206-207. – P.798-803.
13. Galkin, N.G., Chernev, I.M., Subbotin, E.Yu., Goroshko, O.A., Dotsenko, S.A., Maslova, A.M., Galkina, K.N., Kropachev, O. V., Goroshko, D.L., Samardak, A.Yu. Gerasimenko, A.V. and Argunov, E.V. Structural, Transport, and Magnetic Properties of Ultrathin and Thin FeSi Films on Si(111) // *J. Surf. Invest.: X-ray, Synchr. and Neutr. Techniq.*, 2024. – V.18. – P.372-383.
14. Galkin, N.G., Galkin, K.N., Dotsenko, S.A., Serhienko, S.A., Khovaylo, V.V., Gutakovskii, A.K. Effect of embedding of CrSi_2 and $\beta\text{-FeSi}_2$ nanocrystals into n-type conductivity silicon on the transport and thermal generation of carriers // *Applied Surface Science*. 2021. – V.566. – P.150620.
15. Bahk, J.H., Favaloro, T., Shakouri, A. Thin film thermoelectric characterization techniques // *Annual Review of Heat Transfer*. 2013. – V.16.
16. Ou-Yang, T.Y., Shu, G.J. and Fuh, H.R. Thermoelectric performance and electronic properties of transition metal monosilicides // *Euro Physics Letters*. 2017. - V.120. - P.17002.
17. Ioannou, M., Symeou, E., Giapintzakis, J. and Kyrtasi, T. Structural Characterization and Thermoelectric Properties of Hot-Pressed CoSi Nanocomposites // *Journal of Electronic Materials*. 2014. - V.43. - No.10. - P. 3824–3830.
18. Huxtable, S. T., Abramson A. R., Tien C.-L., Majumdar A., LaBounty C., Fan X., Zeng G., Bowers J. E., Shakouri, A., Croke E.T., Thermal Conductivity of Si/SiGe and SiGe/SiGe Superlattices, *Applied Physics Letters* 80 (2002) 1737–1739.
19. Taniguchi T., Ishibe, T., Naruse, N., Mera, Y., Alam Md., M., Sawano, K., and Nakamura, Y. High Thermoelectric Power Factor Realization in Si-Rich SiGe/Si Superlattices by Super-Controlled Interfaces // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2020. – V.12. – No.22. – P.25428–25434.
20. Terada, T., Uematsu, Y., Ishibe, T., Naruse, N., Sato, K., Nguyen, T.Q., Kobayashi, E., Nakano, H., and Nakamura Y. Giant Enhancement of Seebeck Coefficient by Deformation of Silicene Buckled Structure in Calcium-Intercalated Layered Silicene Film // *Advanced Material Interfaces*. 2022. – V.9. – P.2101752(1-7).
21. Stern, R., Wang, T., Carrete, J., Mingo, N., & Madsen, G.K.H. Influence of point defects on the thermal conductivity in FeSi // *Physical Review B*. 2018. – V.97. – P.195201.
22. Ren, W.L., Li, C.C., Zhang, L.T., Ito, K., Wu J.S. Effects of Ge and B substitution on thermoelectric properties of CoSi // *J. Alloys and Compounds*. 2005. - Vol. 392. - P. 50-54.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ИОДИДА ДИИЗОПРОПИЛАММОНИЯ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ ОКСИДА КРЕМНИЯ

И.А. Голубева, О.В. Зотова, К.И. Сахненко, Е.В. Стукова

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

golubeva0212@mail.ru

Приводятся результаты диэлектрических исследований композитных образцов иодида диизопропиламмония (DIPAI) с диэлектрическими включениями наночастиц оксида кремния (размер наночастиц 100 нм) с варьированием объемной доли последнего (0,05; 0,10). Исследованы температурные зависимости диэлектрической проницаемости синтезированных соединений (в интервале 30 – 120 °С) в режимах нагрева и охлаждения. Показано наличие сегнетоэлектрического состояния в DIPAI в композитах в отличие от чистого DIPAI. Появление сегнетоэлектрического состояния в DIPAI может быть обусловлено молекулярным взаимодействием между DIPAI и SiO₂.

В настоящее время известны тысячи неорганических и органических материалов, обладающих спонтанной поляризацией. Однако практическое применение в основном получили неорганические оксидные перовскиты, в связи с их высокой стабильностью, большой диэлектрической проницаемостью и спонтанной поляризацией. Несмотря на это, сегодня ведется активный поиск органических сегнетоэлектриков, ввиду их низкой стоимости, простоты обработки, экологичности и биосовместимости.

Известно, что одним из способов модификации свойств сегнетоэлектрических материалов является создание на их основе композитов [1]. Поскольку DIPAI является органическим сегнетоэлектриком со сложной молекулярной структурой, то добавление в него наночастиц SiO₂ может привести к взаимодействию на молекулярном уровне, способствующему закреплению поляризации молекул сегнетоэлектрика, как было показано, например, для триглицинсульфата [2].

В нашем эксперименте получение иодида диизопропиламмония [(iso-C₃H₇)₂NH₂]I, DIPAI основывалось на взаимодействии эквимольных количеств диизопропиламина, (iso-C₃H₇)₂NH (Sigma), и иодоводородной кислоты (57 %, AcrosOrganics) в водном растворе [1]. В общем виде реакция протекает по уравнению:



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

Для проведения диэлектрических исследований были изготовлены образцы на основе иодида диизопропиламмония с добавлением диэлектрических частиц включений оксида кремния с разными объёмными долями: (DIPAI)_{0,90}/(SiO₂)_{0,10} и (DIPAI)_{0,95}/(SiO₂)_{0,05}.

Композиты были получены тщательным перемешиванием порошков DIPAI и SiO₂, и прессова-

лись при давлении 10^4 кг/см². В результате были изготовлены композиты в форме дисков. Исследование диэлектрических свойств композитов на основе иодида диизопропиламмония и оксида кремния методом диэлектрической спектроскопии с помощью измерителя иммитанса (LCR-метра) проводились на частоте 100 кГц в интервале температур от 50 °С до 120 °С. В качестве эталонного использовался образец чистого DIPAI.

Условия получения DIPAI определяют наличие или отсутствие в нем сегнетоэлектрического состояния. В связи с этим для эталонного образца чистого DIPAI были получены зависимости диэлектрической проницаемости от температуры (рис.1).

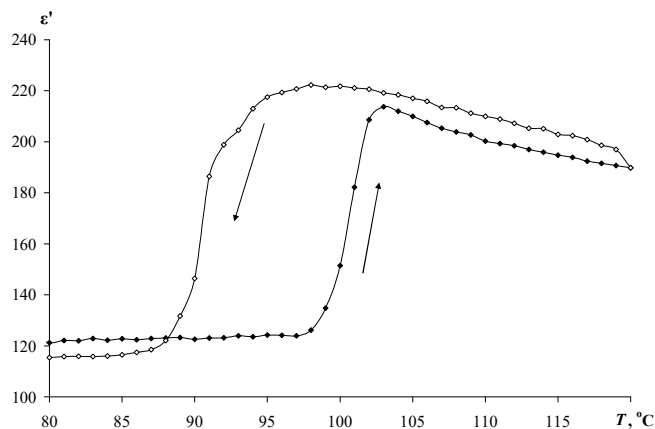


Рис. 1 Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для чистого образца DIPAI.

На приведенных зависимостях наблюдается один фазовый переход при нагреве и один при охлаждении (рис. 1). Это позволяет заключить, что сегнетоэлектрическая фаза не формируется, а переход происходит между двумя параэлектрическими фазами при температурах 103 °С и 93 °С при нагреве и охлаждении.

Для композитов (DIPAI)_{0,95}/(SiO₂)_{0,05} результаты исследования диэлектрической проницаемости указывают на наличие двух фазовых переходов в режиме нагрева максимум при температурах 93 и 105 °С, а при охлаждении наблюдается один максимум около 95 °С.

При увеличении содержания наночастиц SiO₂ до 10 %, по данным диэлектрической проницаемости $\epsilon'(T)$, в режиме нагрева прослеживаются два фазовых перехода: при 89 °С и 106 °С (рис. 2). Это соответствует формированию сегнетоэлектрической фазы, согласно данным работы [1]. В режиме охлаждения наблюдается один фазовый переход при 90 °С.

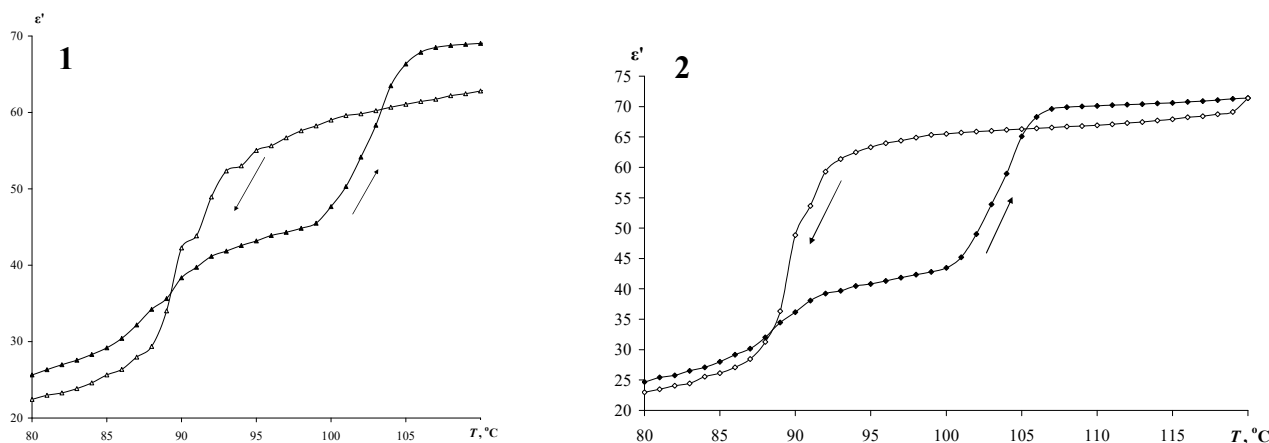


Рис. 2. Зависимости значений диэлектрической проницаемости от температуры для образцов:

1 – (DIPAI)_{0,95}/(SiO₂)_{0,05}; 2 – (DIPAI)_{0,90}/(SiO₂)_{0,10}.

Таким образом, добавление включения оксида кремния в композит DIPAI приводит к индцированию сегнетоэлектрической фазы в DIPAI, а увеличение объемной доли включений оксида кремния до $x = 0,10$ приводит к расширению температурного интервала существования сегнетоэлектрического состояния DIPAI в композите.

Оксид кремния относится к линейным диэлектрикам, и частицы SiO_2 не обладают дипольными моментами, которые могли бы индуцировать появление сегнетоэлектрической фазы в DIPAI. Поэтому единственным возможным механизмом взаимодействия наночастиц DIPAI и SiO_2 является их взаимодействие на молекулярном уровне. Это было подтверждено в работе [3], где для проверки такого предположения были получены ИК-спектры чистого DIPAI и композита $(\text{DIPAI})_{0,80}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0,20}$.

Анализ измеренных температурных зависимостей указывает на изменение последовательности фазовых переходов в композитах по сравнению с чистым DIPAI. Совокупность полученных результатов позволяет сделать вывод, что в структуре нанокompозита проявляется изменение водородных связей с участием аминокрупп, что может приводить к появлению сегнетоэлектрического состояния в DIPAI.

1. Милинский А.Ю., Барышников С.В., Чарная Е.В., Егорова И. В. Условия формирования сегнетоэлектрической фазы в иодиде диизопропиламмония // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2020. – Т. 84. – № 9. – С. 1276-1278.

2. Милинский А.Ю., Барышников С.В., Чарная Е.В., Егорова И.В., Ускова Н.И. Влияние наноконфайнмента на кинетику фазовых переходов в органическом сегнетоэлектрике DIPAI Физика твердого тела. – 2020. – Т. 62. – №7. – С. 1059-1063.

3. Сахненко А.В., Милинский А.Ю., Барышников С.В., Стукова Е.В., Егорова И.В. Диэлектрические и тепловые свойства нанокompозитов на основе иодида диизопропиламмония и наночастиц оксида алюминия // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2023. – Т. 16. – № 3. – С. 19-28.

УДК 537.611.4

ФЛУКТУАЦИИ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ НАНОЧАСТИЦ ПЕРМАЛЛОЯ НА РЕГУЛЯРНОЙ ПЛОСКОЙ РЕШЕТКЕ

О.И. Дьяченко¹, В.И. Белоконов²

¹Владивостокский государственный университет, Инженерная школа (г. Владивосток)

²Дальневосточный федеральный университет, Институт наукоемких технологий

и передовых материалов (г. Владивосток)

diachenko.oi@vvsu.ru, belokon.vi@dyfu.ru

Рассматривается коллективное поведение наночастиц пермаллоя и температурная зависимость времени релаксации их магнитных моментов. Показано, что при температурах порядка 240 – 250 К наблюдается резкое уменьшение времени релаксации, сопровождающееся увеличением доли частиц с неопределённым направлением намагниченности. Используя обобщённую модель релаксации, основанную на законе Блоха и экспериментальных наблюдениях, авторы определяют характер изменения минимальной работы, необходимой для перемагничивания.

Изучение динамики магнитных моментов в наночастицах представляет собой важное направление современной физики конденсированного состояния и наномagnetизма. Особенно интересны системы, в которых реализуются флуктуации направления намагниченности при конечных температурах, что приводит к переходу от стабильного ферромагнитного состояния к суперпарамагнитному режиму. Такие переходы сопровождаются существенным уменьшением времени релаксации магнитных моментов и зависят от размера частиц, анизотропии, взаимодействия и температуры [1, 2]. Пермаллой (сплав NiFe) – один из наиболее изученных мягких магнитных материалов благодаря своей высокой проницаемости и малой коэрцитивной силе. В последние годы интерес сместился к исследованию свойств пермаллоя на наномасштабном уровне, особенно в структурах с геометрическим фрустрированием, таких, как искусственные решётки и массивы [3]. Размещение таких частиц на регулярных двумерных решётках позволяет изучать коллективные эффекты и фазовые переходы, в том числе в условиях, приближённых к спин-ледяным моделям или моделям типа Изинга. В данной работе рассматривается температурная зависимость времени релаксации магнитных моментов в частицах пермаллоя. Особенностью исследуемой системы является отсутствие чётко определённого механизма перемагничивания: наблюдается отклонение от классических моделей, предполагающих однородное вращение магнитного момента.

Механизм перемагничивания частиц, обсуждаемых в работе [4], достаточно сложен и до конца не выяснен. Очевидно, что распределение намагниченности в частице неоднородно и, скорее всего, перемагничивание происходит по причине преодоления кристаллографической анизотропии. Соответственно, оценка критического поля перемагничивания затруднена и составляет величину порядка 4Э. Для совокупности таких частиц время релаксации τ можно оценить, используя известное выражение:

$$\frac{1}{\tau} = f_0 \exp \left[-\frac{R_{min}}{kT} \right], \quad (1)$$

где f_0 – частотный фактор; k – константа Больцмана; T – абсолютная температура; R_{min} – минимальная работа, необходимая для необратимого изменения направления магнитного момента.

Для частиц эллипсоидальной формы:

$$R_{min} = \frac{mH_c}{2}, \quad (2)$$

где m – магнитный момент частицы; H_c – критическое поле, необходимое для перемагничивания вдоль легкой оси намагничивания.

При этом критическое поле $H_c \sim I_s$, $m \sim I_s$, где I_s – намагниченность. При температурах ниже температуры Кюри $T \ll T_c$ намагниченность описывается законом Блоха:

$$I_s(T) = I_s(0) \left(1 - CT^{\frac{3}{2}} \right), \quad (3)$$

где C – экспериментальная константа. Для Ni примерно $C \approx 2 \cdot 10^{-5} K^{-\frac{3}{2}}$. Для пермаллоя берут схожее значение. Однако в нашем случае эта оценка не может быть использована, так как механизм перемагничивания неизвестен, но отличается от простого поворота магнитного момента. Поэтому в дальнейшем мы будем использовать выражение для минимальной работы вида:

$$R_{min} = BI_s(0) \left(1 - CT^{\frac{3}{2}} \right), \quad (4)$$

где B – коэффициент пропорциональности, определяемый из эксперимента. Из экспериментальных данных можно увидеть, что в исследуемой системе частиц при температуре $T = 240$ К наблюдаются частицы, стабильно ориентированные условно «вверх», условно «вниз» и частицы с не определенным направлением магнитного момента (на рисунке белые, черные и серые частицы). Так как время наблюдения 7 с, то такое возможно, если время релаксации ~ 1 с. Частотный фактор $f_0 = 10^{13} \text{ с}^{-1}$ мы связываем с температурой Дебая. Намагниченность $I_s(0) = 810$ Гс. Это позволяет нам определить неизвестный параметр B и использовать в дальнейших вычислениях, позволяющих найти зависимость времени релаксации τ от температуры T :

$$\tau = 10^{\left(-13 + \frac{1}{\ln 10} \frac{BI_S(0) \left(1 - CT^2\right)^{\frac{3}{2}}}{kT}\right)}. \quad (5)$$

График зависимости времени релаксации τ от температуры T приведен на рис. 1.

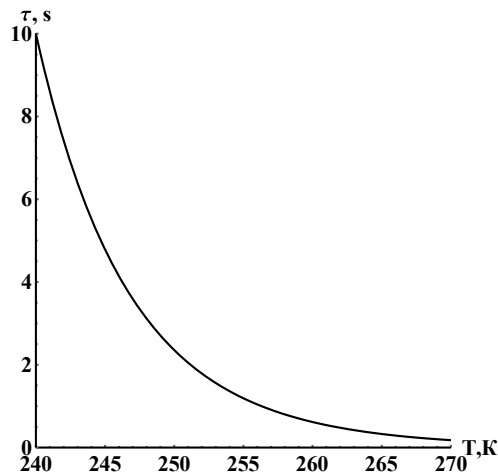


Рис. 1. График зависимости времени релаксации τ от температуры T для частиц пермаллоя.

Из графика видно, что в интервале температур от 240 К до 250 К наблюдается резкое падение времени релаксации и, как следствие, резкое увеличение количества серых частиц. Так как закон Блоха действует при $T \ll T_c$, то дальнейшее увеличение температуры может привести к изменению этой зависимости и, как следствие, к дальнейшему скачку падения времени релаксации. Результаты работы могут быть полезны при разработке устройств спинтроники и изучении коллективных магнитных эффектов в двумерных ансамблях наночастиц.

Авторы благодарны Нефедеву К.В. привлечение внимания к таким системам.

-
1. Brown, W.F. Thermal fluctuations of a single-domain particle // *Physical Review*. –1963. –V. 130– №. 5. – P. 1677.
 2. Néel, L. Théorie du trainage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec applications aux terres cuites // *Annales de Géophysique*. – 1949. – V. 5. – P. 99–136.
 3. Dormann, J.L., Fiorani, D., & Tronc, E. Magnetic relaxation in fine-particle systems // *Advances in Chemical Physics*. – 1999. – V. 98. – P. 283–494.
 4. Strongin V. S. et al. Fluctuations of magnetic moments on the Apamea lattice // *Dal'nevostochnyi Matematicheskii Zhurnal*. – 2025. – V. 25. – №. 1. –P . 90-101.

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ ВКЛЮЧЕНИЙ ТИТАНАТА БАРИЯ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИОДИДА ДИИЗОПРОПИЛАММОНИЯ В КОМПОЗИТЕ

О.В. Зотова, И.А. Голубева, А.В. Сахненко, Е.В. Стукова

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

ovzotova@mail.ru

Приводятся результаты диэлектрических исследований композитных образцов $(DIPAI)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$ ($x = 0,1$ и $0,2$) с размерами включений частиц титаната бария 50 и 400 нм. Показано, что в композитах на основе DIPAI с включениями частиц титаната бария размер частиц включений влияет на значения диэлектрической проницаемости в сегнетоэлектрической фазе композита и практически не влияет на температуры фазовых переходов, а при увеличении объёмной доли происходит небольшое снижение температур фазовых переходов.

Сегнетоэлектрики, спонтанная поляризация P_s которых может быть переключена внешним электрическим полем, исследуются уже более 100 лет [1]. За это время были открыты тысячи неорганических и органических материалов, обладающих спонтанной поляризацией. Однако практическое применение в основном получили неорганические оксидные перовскиты в связи с их высокой стабильностью, большой диэлектрической проницаемостью и спонтанной поляризацией. Несмотря на это, сегодня ведется активный поиск органических сегнетоэлектриков, из-за их низкой стоимости, простоты обработки, экологичности и биосовместимости. В качестве примеров такого успешного поиска можно привести кроконовую кислоту, хлорид диизопропиламмония и бромид диизопропиламмония. Эти вещества по значениям спонтанной поляризации и температуры Кюри конкурируют с неорганическими перовскитными сегнетоэлектриками. Относительно иодида диизопропиламмония (DIPAI) – третьего представителя сегнетоэлектриков на основе диизопропиламина, в литературе имеются противоречивые сведения [2, 3]. В исследовании [2] были выращены кристаллы DIPAI, спонтанная поляризация которых равна ~ 33 мкКл·см⁻². Однако, авторы [3] при исследовании синтезированных ими кристаллов DIPAI не выявили в нем полярного состояния. В работе [4] было показано, что для перевода DIPAI в сегнетоэлектрическое состояние его необходимо нагреть выше температуры 150 °С. Известно, что одним из способов модификации свойств сегнетоэлектрических материалов является создание на их основе композитов [5].

Для проведения исследований были изготовлены образцы на основе иодида диизопропила аммония с добавлением сегнетоэлектрических частиц включений титаната бария $(DIPAI)_{0,9}/(BaTiO_3)_{0,1}$, $(DIPAI)_{0,8}/(BaTiO_3)_{0,2}$ и размером частиц последнего 50 и 400 нм. Композиты были получены тщательным перемешиванием порошков DIPAI и $BaTiO_3$, и прессовались при давлении 10^4 кг/см².

Исследование диэлектрических свойств композитов на основе иодида диизопропиламмония и титаната бария с размерами частиц последнего 50 нм и 400 нм методом диэлектрической спектроскопии проводились на частоте 100 кГц в интервале температур от 50 °С до 130 °С.

При помощи измерителя иммитанса были получены значения ёмкости, с помощью которых рассчитывалась диэлектрическая проницаемость и строились её зависимости для исследуемых образцов. Далее рассмотрены результаты в виде графиков в сравнении между собой для установления закономерностей при изменении состава и размера частиц добавочного сегнетоэлектрика.

На рис. 1 для сравнения представлены температурные зависимости диэлектрической проницаемости композитов $(\text{DIPAI})_{0,9}/(\text{BaTiO}_3)_{0,1}$ с разным размером частиц BaTiO_3 .

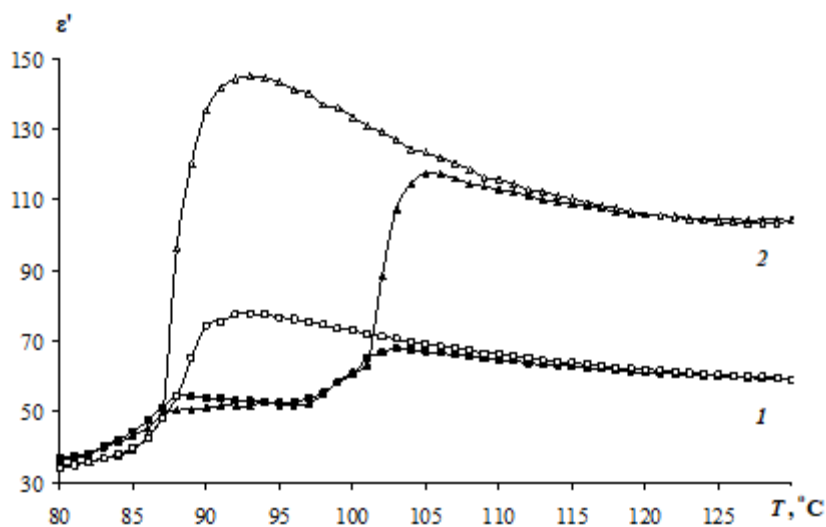


Рис. 1. Зависимость значений диэлектрической проницаемости от температуры образцов $(\text{DIPAI})_{0,9}/(\text{BaTiO}_3)_{0,1}$: 1 – с размерами частиц титаната бария 50 нм; 2 – с размерами частиц титаната бария 400 нм (темные маркеры – нагрев, светлые – охлаждение).

Для образца с размером частиц 50 нм при нагреве наблюдается два фазовых перехода – при 88 °С и 104 °С, а при охлаждении наблюдается максимум диэлектрической проницаемости при 91 °С. В случае образца с размером частиц титаната бария 400 нм при нагреве наблюдается также два фазовых перехода при температурах, аналогичных для образца с размером частиц включений 50 нм, однако значения диэлектрической проницаемости во втором максимуме увеличились практически в два раза. При охлаждении максимум диэлектрической проницаемости составил 145, что также в два раза больше предыдущего образца, фазовый переход пришёлся на 92 °С. Таким образом, размер частиц включений титаната бария влияет на значения диэлектрической проницаемости в сегнетоэлектрической фазе композита и практически не влияет на температуры фазовых переходов

На рис. 2 представлено сравнение композитов температурных зависимостей диэлектрической проницаемости $(\text{DIPAI})_{0,8}/(\text{BaTiO}_3)_{0,2}$ также с разными размерами частиц BaTiO_3 .

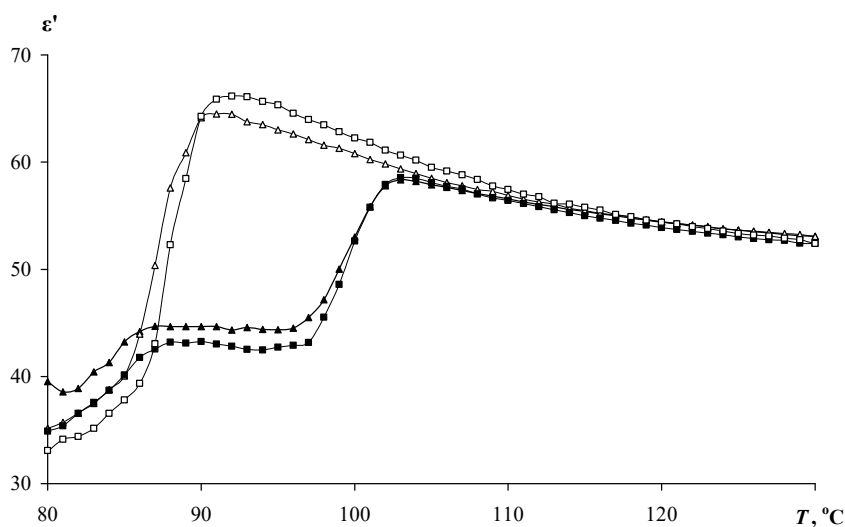


Рис. 2. Зависимость значений диэлектрической проницаемости от температуры образцов : треугольники – с размером частиц титаната бария 50 нм; квадраты – с размером частиц титаната бария 400 нм (тёмные маркеры – нагрев, светлые маркеры – охлаждение).

При таком соотношении объёмных долей размер частиц включений титаната бария практически никак не влияет на диэлектрические свойства композита. При нагреве наблюдаются два фазовых перехода, первый при 87 °С и 88 °С, и второй при 103 °С. При охлаждении фазовый переход приходится на 91 °С. В отличие от образцов композита с объёмной долей частиц включений 0,1 значения диэлектрической проницаемости практически не зависят от размеров частиц включений.

Таким образом показано, что в композитах на основе DIPAI с включениями частиц титаната бария индуцируется сегнетоэлектрическое состояние в DIPAI, при этом размер частиц включений влияет на значения диэлектрической проницаемости в сегнетоэлектрической фазе композита только с малой долей включений ($x = 0,1$) и практически не влияет на температуры фазовых переходов, а при увеличении объёмной доли происходит небольшое снижение температур фазовых переходов.

1. Rabe K.M., Ahn C.H., Triscone J.-M. Physics of Ferroelectrics: A Modern Perspective. Springer Science & Business Media, 2007 г., 388 с.

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

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

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

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

УДК 539.26+669.234

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В СПЛАВАХ Cu-Pd ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

А.А. Клопотов¹, А.И. Потекаев², Ю.А. Абзаев¹, О.Г. Волокитин¹

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет (г. Томск)

²Томский государственный университет (г. Томск)

klopotova@tsuab.ru

В работе проведено комплексное исследование слабоустойчивых состояний и структурных изменений в сплавах Cu-Pd (~40 ат. % Pd) в области структурного фазового перехода (ФП) порядок–беспорядок. Используются методы in situ рентгеноструктурного анализа для определения параметров кристаллической решетки, параметров дальнего порядка и фактора Дебая-Валлера в сплавах после различных температурных обработок. Установлено, что фазовый переход порядок–беспорядок сопровождается структурным переходом B2↔A1. Показано, что в предпереходных областях наблюдаются аномалии: анизотропия атомных смещений, концентрационные неоднородности, гетерофазные флуктуации и нелинейные изменения параметров решетки. Анализ температурных зависимостей динамических характеристик (фактор Дебая-Валлера, среднеквадратичные

смещения атомов) позволил выявить ангармонические эффекты межатомных взаимодействий, играющие ключевую роль в формировании слабоустойчивых состояний. Полученные данные согласуются с теорией Грюнайна и моделью Марадудина, демонстрируя, что ангармонические вклады в потенциал межатомного взаимодействия становятся значительными вблизи ФП. На основе метода Марадудина рассчитаны гармонические и ангармонические составляющие потенциала, что позволило объяснить механизм фазовых превращений через появление второго минимума на потенциальной кривой.

Введение

Фазовые переходы в сплавах на основе меди и палладия (Cu–Pd), особенно в области состава ~40 ат.% Pd, представляют значительный научный интерес в связи с их сложной структурной динамикой и уникальными физико-химическими свойствами. В этих сплавах фазовый переход (ФП) порядок–беспорядок (П–Б) сопровождается структурным фазовым превращением (СФП) между упорядоченной ОЦК фазы в разупорядоченную ГЦК фазу ($B2 \leftrightarrow A1$), что делает их удобной моделью для изучения взаимосвязи между атомным упорядочением и перестройкой кристаллических решёток [1 – 4]. В работе показано, что кроме термического ФП $B2 \leftrightarrow A1$ также под действием пластической деформации происходит СФП $B2 \rightarrow A1$, то есть разрушение атомного дальнего порядка в фазе B2 образованием разупорядоченной A1 фазы [1, 2].

Несмотря на значительный прогресс в исследовании этих систем методами электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа *in situ* и изучения физических свойств, многие аспекты СФП остаются недостаточно изученными. В частности, остаются до конца не изученными аномалии температурных зависимостей параметров решетки, фактора Дебая–Валлера и атомных смещений перед фазовыми переходами, что указывают на существование слабоустойчивых состояний. Не выяснена роль анагармонизма при перестройке кристаллической решетки из ОЦК решетки в ГЦК.

Эти вопросы имеют не только фундаментальное значение для физики твердого тела, но и практическую важность для разработки функциональных материалов, обладающих хорошим комплексом физик-механических свойств.

В данной работе представлены результаты систематического исследования структурных и динамических изменений в сплаве Cu – 39 ат.% Pd при фазовом переходе порядок–беспорядок, который сопровождается структурным переходом $B2 \leftrightarrow A1$, с использованием экспериментальных (*in situ* рентгеноструктурный) и теоретических (ангармоническая модель) методов для установления роли предпериодных состояний и ангармонизма в механизмах фазовых превращений.

Материалы и методика эксперимента

Для проведения исследований на основе рентгеноструктурного анализа (РСА) были выплавлены сплавы Cu – 39 ат. % Pd в атмосфере аргона в печи сопротивления «СШВЛ-0,6/25». Для приготовления слитка использовали электролитическую медь и палладий чистотой 99,99 %. Для рентгеноструктурных исследований из слитка был напilen порошок, который отжигался в вакуумных печах для достижения упорядоченного состояние – длительными отжигами по режиму ступенчатого охлаждения от 600 °C до 300 °C с шагом 10 °C в сутки. Разупорядоченное состояние достигалось нагревом до 800 °C с последующей закалкой в ледяную воду. Высокотемпературные рентгеновские испытания проводили в вакууме в камере ГПВТ-1500 на дифрактометре ДРОН1-1.5. Температуру поддерживали с точностью $\pm 2,5$ °C. Переход от одной температуры к другой проводили последовательно по мере достижения равновесного состояния при изотермических выдержках. Достижение равновесного состояния контролировали по отношению интенсивностей структурных рефлексов упорядоченной фазы B2 к рефлексам разупорядоченной фазы A1 и отношению интенсивностей сверхструктурных рефлексов к основным в упорядоченной фазе с B2 структурой.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования температурных зависимостей интегральных динамических характеристик (фактора Дебая-Валлера, среднеквадратичных смещений атомов, характеристической температуры) показывают, что их нелинейное поведение связано с ангармонизмом межатомных взаимодействий [5, 6]. В рамках модели сферически симметричного потенциала [6] получены выражения для ангармонических поправок, связывающих изменение этих параметров с силовыми характеристиками межатомного потенциала. Однако вблизи фазовых переходов (ФП) традиционные ангармонические модели перестают работать, что свидетельствует о формировании слабоустойчивых состояний решетки.

В сплавах Cu–Pd в области 40 ат.% Pd при нагреве при температурах порядка 600 °С происходит структурный фазовый переход (ОЦК↔ГЦК (B2↔A1) при котором наблюдается анизотропия атомных смещений в предпереходной области. В частности, в ГЦК-фазе происходит «размягчение» решетки вдоль направления $\langle 111 \rangle$, что указывает на подготовку структуры к перестройке в ОЦК-решетку [1, 3, 4]. Это свидетельствует о том, что задолго до самого СФП кристаллическая решетка переходит в метастабильное состояние, для которого характерны локальные флуктуации плотности атомных смещений и изменения межатомного потенциала взаимодействия атомов в кристаллической решетке в определенных кристаллографических направлениях.

За несколько десятков градусов до температуры начала СФП в сплавах Cu – 40 ат.% Pd наблюдаются внутрифазовые структурные изменения [1, 4], которые можно рассматривать как предпереходные состояния. Эти изменения включают перераспределение динамических мод (изменение спектра фононов), локальное искажение решетки, предшествующее глобальной перестройке, и формированию неоднородных упругих полей, способствующих последующему СФП.

Таким образом, в окрестности структурных ФП в сплавах Cu – 40 ат.% Pd наблюдаются слабоустойчивые состояния, характеризующиеся анизотропным «размягчением» решетки в предпереходной области, нелинейным поведением динамических характеристик, связанным с ангармонизмом и внутрифазовыми структурными изменениями, подготавливающими систему к глобальному СФП.

Эти эффекты требуют учета в моделях фазовых превращений, поскольку они определяют кинетику перехода и формирование новой структуры.

Описание температурных зависимостей структурных и динамических характеристик вблизи фазовых переходов (ФП) остается ключевой задачей физики твердого тела. Традиционные гармонические модели оказываются недостаточными из-за ангармонических эффектов, особенно в предпереходных состояниях. В данной работе для анализа этих явлений использован метод Марадудина [6], позволяющий связать экспериментально наблюдаемые параметры (период решетки, коэффициент теплового расширения, фактор Дебая-Валлера) с разложением межатомного потенциала в ряд:

$$U(r) = U(r_0) + 1/2 U''(r-r_0)^2 + 1/3! U'''(r-r_0)^3 + 1/4! U''''(r-r_0)^4 + \dots, \quad (1)$$

где U'' , U''' , U'''' – гармонический, квазигармонический и ангармонический коэффициенты разложения потенциальной энергии, соответственно. Эти коэффициенты выражаются через экспериментальные данные:

$$U'' = 0,1397(2\pi k/h)^2 m \Theta_\infty^2, \quad (2)$$

$$U''' = -4\alpha U''/k\sqrt{2} - 4 U''(r_0)/a\sqrt{2}, \quad (3)$$

$$U'''' = 1,4032 \times [U''']^2/U'' - 4\alpha [U'']^2 \times [\Theta_\infty^2/\Theta_P^2(T) - 1]/kT. \quad (4)$$

Здесь α – коэффициент линейного расширения; m – для неупорядоченных фаз приведенная масса атома в сплаве, а для упорядоченных фаз используют массы атомов палладия m_{Pd} и меди m_{Cu} на каждой подрешетке; Θ_∞ – температура Дебая в низкотемпературной области вдали от СФП; $\Theta_P(T)$ – температура Дебая,

определенная по данным рентгеноструктурного анализа при данной температуре T ; a – параметры ОЦК или ГЦК кристаллических решеток; k – константа Больцмана; h – постоянная Планка.

Здесь необходимо отметить, при расчете потенциала межатомного взаимодействия по данным РСА ключевой проблемой является, то что коэффициенты U''' и U'''' зависят от температурных производных параметров решетки, но их определение сильно коррелировано, что приводит к неустойчивости результатов. В предпереходной области ангармонические вклады становятся сравнимыми с гармоническими, но РСА данные не содержат информации о высших производных потенциала. Поэтому, остается две фундаментальные проблемы. Первая – как корректно учесть высшие ангармонические члены при описании предпереходных состояний? Вторая – каким образом учитывать анизотропию атомных смещений перед СФП?

Наличие этих проблем, в свою очередь, приводит к тому, что надо ответить на следующие вопросы. Как динамические флуктуации (например, «размягчение» определенных фононных мод) влияют на механизм перехода, можно ли в рамках парных потенциалов корректно описать кооперативные перестройки кристаллической структуры?

С учетом этих ограничений в работе рассчитаны парные межатомные потенциалы для фаз В2 и А1 в разных температурных областях в зависимости от исходного структурно-фазового состояния.

В однофазной области существования фазы В2 (рис. 1а) по мере повышения температуры и приближения к T_K СФП В2→А1 наблюдается заметное понижение потенциального барьера. Это свидетельствует о подготовке кристаллической решетки к СФП. Эволюция потенциала парного межатомного взаимодействия в кристаллической решетке в разупорядоченной фазе А1 (рис. 1б), образовавшейся в результате СФП В2→А1, при переходе из двухфазной области (В2+А1) в однофазную А1 проявляется в качественном изменении кривых потенциалов: максимум на потенциальной кривой исчезает и образуются потенциальные кривые с бесконечно высокими барьерами, что соответствует обычной ангармонической модели [6]. Это свидетельствует, что в температурной области выше окончания СФП В2→А1 фаза А1 становится стабильной.

Результаты расчетов потенциалов межатомного парного взаимодействия атомов на основе данных РСА для кристаллической решетки разупорядоченной фазы А1_{ЗАК}, полученной в результате закалки от температуры 800 °С (выше T_K СФП В2→А1) приведены на рис (рис. 1в).

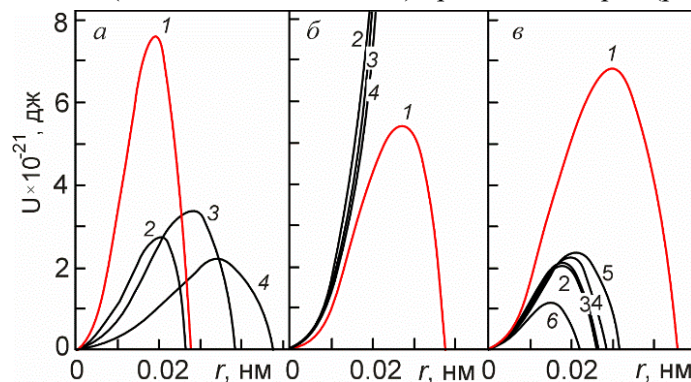


Рис. 1. Эволюция потенциалов парного межатомного взаимодействия в сплавах Cu – 40 ат.% Pd при СФП в зависимости от температуры разных исходных фазовых состояний, °С: а – В2→А1 (в фазе В2: 1 – 500; 2 – 570; 3 – 590; 4 – 600); б – А1→В2 (в фазе А1: 1 – 590; 2 – 610; 3 – 620; 4 – 680); в – А1_{ЗАК}→А1+В2→А1 (в фазе А1: 1 – 25; 2 – 100; 3 – 150; 4 – 200; 5 – 240; 6 – 280).

Из этих кривых видно, что потенциальный барьер на потенциальных кривых межатомного парного взаимодействия в метастабильной фазе А1_{ЗАК}, полученной в результате закалки, уменьшается по мере роста температуры и приближения к температуре СФП А1_{ЗАК}→(А1+В2), который происходит при

температуре 280 °С [1, 4]. Такая эволюция потенциальных кривых межатомного парного взаимодействия в метастабильной фазе $A1_{\text{зак}}$ отражает ее стабильность и подготовку к образованию более стабильной в этом температурном интервале упорядоченной фазы B2. Как показано в [1, 4], последующий нагрев двухфазной области ($A1+B2$) приведет к СФП $(A1+B2) \rightarrow A1_{\text{зак}}$ и который произойдет в температурной области 600 °С.

На рис. 2а показаны среднеквадратичные смещения атомов при СФП $A1_{\text{зак}} \rightarrow (B2+A1) \rightarrow A1$, а также на вставках вид потенциалов взаимодействия на разных стадиях перехода. В фазе однофазной области в метастабильной фазе $A1_{\text{зак}}$ (кривая 1, рис. 2а) среднеквадратичные смещения атомов соответствуют отклонению от обычной линейной зависимости при нагреве металла вдали от СФП. По мере приближения к температуре T_K СФП $A1_{\text{зак}} \rightarrow (B2+A1)$ наблюдается заметное снижение высоты потенциального барьера с увеличением ширины потенциальной ямы. В двухфазной области ($B2 + A1$) после СФП $A1_{\text{зак}} \rightarrow (B2+A1)$, после наблюдается расщепление динамических характеристик для подрешеток, которые занимают атомы Cu и Pd (кривые 2 и 3, рис. 2а). На рис. 2д приведены среднеквадратичные смещения атомов, которые происходят при охлаждении сплава Cu – 39 ат.% Pd от высоких температур при СФП $A1 \rightarrow (B2+A1) \rightarrow B2$. Видно, что перед началом перехода $A1 \rightarrow (B2+A1)$ происходит аномальный рост среднеквадратичных смещений атомов, предшествующий перестройки кристаллической решетки из разупорядоченной ГЦК решетки в упорядоченную ОЦК решетку. Такое изменение среднеквадратичных смещений атомов коррелирует с эволюцией потенциалов межатомного взаимодействия (рис. 2 (е, ж)). Видно, что в высокотемпературной области вдали от СФП в фазе A1 наблюдается типичный квазигармонический потенциал с параболическими ветвями (рис. 2ж), но в предпереходной области ангармонические вклады становятся соизмеримыми с гармоническими с изменением формы $U(r)$ (появляется потенциальный барьер (рис. 2е)), что приводит к нелинейному росту среднеквадратичных смещений) и как следствие происходит усиление локальной анизотропии межатомных взаимодействий, что и указывает на формирование зародышей новой фазы.

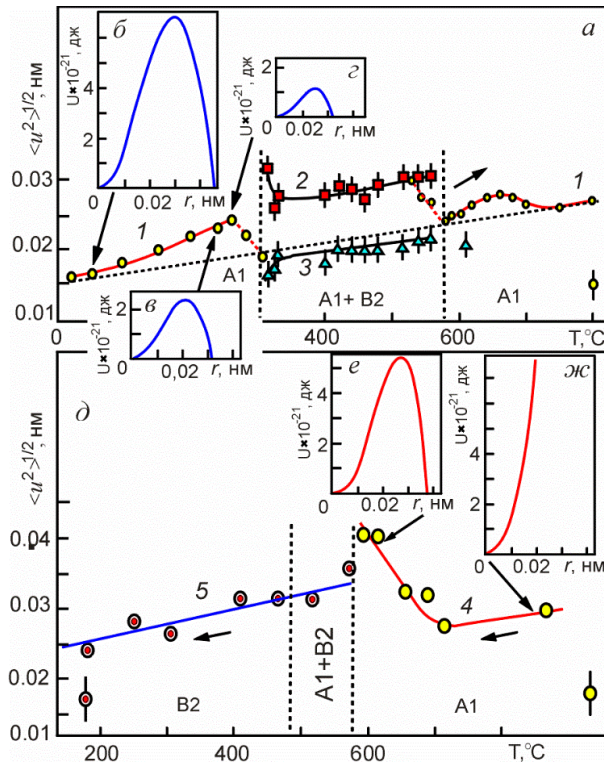


Рис. 2. Температурная зависимость среднеквадратичных смещений атомов при ФП $A1_{\text{зак}} \rightarrow (B2+A1) \rightarrow A1$ (а: 1 – в фазе A1; 2 и 3 – на подрешетках атомов Cu и Pd в фазе B2 соответственно) при ФП $A1 \rightarrow B2$ (д: 4 – в фазе A1; 5 – в фазе B2). На вставках (б, в, г, е, ж) вид потенциала парного межатомного взаимодействия.

Эти процессы коррелируют с перестройкой электронной структуры (изменение заполнения d-полосы [7]), что подтверждает взаимосвязь динамики решетки и электронных свойств при фазовых переходах.

Таким образом, в фазе В2 в температурной области, предшествующей СФП В2→А1, наблюдается конечный потенциальный барьер, преодоление которого атомами приводит к неустойчивости кристаллической решетки и формированию зародышей новой фазы. В А1 фазе вблизи СФП А1→В2 потенциал приобретает сложную форму, что отражает конкуренцию между упорядоченным и разупорядоченным состояниями.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FEMN-2023-0003).

-
1. Потекаев А.И., Клопотов А.А., М.М. Морозов и др. Структурные особенности бинарных систем со слабоустойчивыми состояниями. – Томск: НТЛ. – 2014. – 304 с.
 2. Клопотов А.А., Соловьева Ю.В., Старенченко В.А. Разрушение атомного дальнего порядка при деформации в упорядочивающихся сплавах Cu₃Pd и CuPd со сверхструктурами L1₂(M) и В2. Перспективные материалы и технологии. – Минск: ИВЦ Минфина. – 2024. – С. 333-348.
 3. Клопотов А.А., Тайлашев А.С., Потекаев А.И., Козлов Э.В. Среднеквадратичные смещения атомов в различных структурных состояниях в сплаве CuPd // Изв. Вузов. Физика. – 1999. – №7. – С.55-59.
 4. Клопотов А.А., Тайлашев А.С., Козлов Э.В. О механизме структурного фазового превращения в сплаве CuPd // Изв. Вузов. Физика. – 1988. – №6. – С.67-72.
 5. Лейбфрид Г. Микроскопическая теория механических и тепловых свойств кристаллов. – М.-Л.: Физматгиз. – 1963. – 312 с.
 6. Maradudin A.A. Theory of Lattice Dynamics. Academic Press. – 1963. – 648 p.
 7. Bruno E., Ginatempo B. and Giuliano E. S. Fermi surface origin of non-stoichiometric ordering in CuPd alloys // J. Phys. Condens. Matter. – 2001. V. 13. – P. L711–L716.

УДК 538.93

НАНОКОМПОЗИТЫ – ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИКОВ

В.А. Кульбачинский, А.С. Апрелева, В.Г. Кытин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (г. Москва)

kulb@mig.phys.msu.ru

Приводятся данные о термоэлектрической эффективности различных наноконкомпозитов: с проводящими наночастицами второй фазы; с фуллеренами C₆₀, с наночастицами второго термоэлектрика. Описываются свойства наноконкомпозитов теллурида висмута (Bi₂Te₃) и теллурида сурьмы (Sb₂Te₃) с графитом и влияние графита на термоэлектрические свойства этих материалов.

Термоэлектрические материалы в настоящее время используются для реализации твердотельных устройств генерации энергии без движущихся частей, что делает их идеальными как

для портативной электроники, так и крупномасштабных технологических установок [1]. Кроме того, элементы Пельтье, которые являются элементами охлаждения и нагрева, в ряде случаев заменяют системы охлаждения и системы отопления на основе ископаемого топлива. Термоэлектрическое преобразование энергии из отработанного тепла, например, двигателей автомашин, авиационных двигателей и т.д., является дополнительным источником получения зеленой энергии без образования побочных продуктов.

Сплавы на основе теллуридов висмута и сурьмы являются эффективными и широко используемыми термоэлектрическими материалами из-за их высокой эффективности преобразования энергии в электричество при комнатной температуре. Эффективность термоматериалов определяется величиной термоэлектрической эффективности, которую часто умножают на температуру для получения ее безразмерного выражения: $ZT = S^2 \sigma T / k$, здесь S – коэффициент Зеебека; σ – электрическая проводимость; k – коэффициент теплопроводности; T – абсолютная температура. Многие исследования сконцентрировались на получении пониженной теплопроводности и увеличении электропроводности для повышения значений ZT . Одним из методов понижения теплопроводности является наноструктурирование термоэлектриков и создание нанокompозитов. На данный момент существует достаточно много публикаций на эту тему [1, 2]. Часть из них посвящена нанокompозитам на основе известных термоэлектриков - теллуридов висмута и сурьмы.

В настоящей работе рассматривается создание нанокompозитов различных термоэлектриков, в частности, нанокompозитов теллуридов висмута (Bi_2Te_3) и сурьмы (Sb_2Te_3) с фуллеренами и графитом.

Можно выделить три стратегии для снижения теплопроводности решетки – это сплавление, наноструктурирование и создание нанокompозитов. Данная работа посвящена последнему вопросу.

Плотность, размер и объемная доля нановключений второй фазы влияют на фоновое рассеяние. Изменение размера зерен разных фаз изменяет рассеяние фононов на границах зерен. Получение зерен нужного размера может быть реализовано различными путями, например, в шаровой мельнице, путем закалки расплава и т.п. К сожалению, этот путь уменьшения теплопроводности решетки влияет одновременно на электрическую проводимость и на коэффициент Зеебека из-за рассеяния носителей на различных возникающих дефектах, таких как точечные, границы раздела между включениями и матрицей, и границами зерен. Кроме того, изменяется концентрация носителей, эффективная масса и плотность состояний, что также влияет на величину ZT . Поэтому для улучшения свойств термоэлектриков требуются подходы, учитывающие природу матрицы и второй фазы.

Возможно создание нанокompозита на основе теллурида висмута со второй проводящей фазой, например, наночастиц меди или серебра. Для p -типа $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ вторая фаза в виде наночастиц меди увеличивала ZT до 1,35 при 400 К для 0,1 вес.% Cu- $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ [3].

Перспективным является создание нанокompозитов, где вторая фаза является диэлектриком. В качестве примера можно привести нанокompозит $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ с фуллеренами C_{60} [4]. Теплопроводность уменьшается в зависимости от концентрации фуллерена из-за блокирования фононов в наноструктурных материалах. Добавление фуллерена C_{60} в нанокристаллический теллурид висмута-сурьмы приводит к увеличению теплового сопротивления на границах раздела фаз без сильного снижения электропроводности. Таким образом, выигрыш от снижения решеточной теплопроводности приводит к увеличению величины ZT до 1,16 для $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3 + 0,5\%$ C_{60} , что на 30 % выше максимальной ZT для исходного $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$.

Рассматривается также создание нанокompозитов теллуридов висмута и сурьмы с графитом. Такие материалы дешевы в производстве и нетоксичны. Теплопроводность нанокompозитов теллурида висмута с графитом уменьшается [5]. Резкое уменьшение теплопроводности связано с падением реше-

точной теплопроводности при наноструктурировании в связи с ростом рассеяния фононов и уменьшением длины их свободного пробега. В композитах с графитом из-за наличия двух фаз (двух компонент с различным фононным спектром) длина свободного пробега фононов еще уменьшается. В то же время термоэдс в нанокompозитах существенно больше по сравнению с монокристаллами тех же материалов. Сопротивление нанокompозитов с графитом сначала понижается при добавлении графита, затем растет, а при максимальном содержании графита до 2,5% опять понижается. Такое немонотонное поведение связано как с высокой проводимостью графита (при большом его содержании), так и с легированием композита графитом, как это наблюдалось в композитах с фуллереном [3]. Величина ZT существенно возрастает в нанокompозитах Sb_2Te_3 с графитом по сравнению с монокристаллом Sb_2Te_3 .

Результаты экспериментальных исследований показывают, что рассеяние носителей на границах разделов зерен в нанокompозитах могут играть очень важную роль в общем увеличении ZT. Зерна являются ловушками для носителей заряда, обладающих малым значением энергии, в то время как носители с более высокими энергиями диффундируют через образец. Улучшение термоэлектрических свойств нанокompозитов происходит благодаря механизму рассеяния носителей на потенциальном барьере, возникающем на границе раздела и играющем роль фильтра, задерживающего носители с низкой энергией. Поскольку средняя энергия, приходящаяся на один носитель заряда, растет, увеличивается также и S , в то время как σ незначительно уменьшается.

-
1. Кульбачинский В.А. Наноструктурирование и создание нанокompозитов – перспективное направление увеличения эффективности термоэлектриков // Российские нанотехнологии.–2019.–Т.14.–С.30-42.
 2. Кульбачинский В.А. Физика наносистем // Москва, физматлит.–2022.– 768 стр.
 3. Lee K.-H., Kim H.-S., Kim S.-I., Lee E.-S., et.al. Enhancement of Thermoelectric Figure of Merit for $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ by Metal Nanoparticle Decoration // J. of Electronic Materials. –2012.– V.41.– P.1169-1169.
 4. Kulbachinskii V.A., Kytin V.G., Popov M.Y., et.al. // J. Solid State Chem. - 2012. - V.193. -P. 64-70.
 5. Кульбачинский В.А., Кытин В.Г., Зиновьев Д.А., Маслов Н.В., Singha P., Das S., Banerjee A. Термоэлектрические свойства нанокompозитов Sb_2Te_3 с графитом // ФТП.–2019.–Т.53.–С.645-647.

УДК 544.723.2

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ РАСТВОРИТЕЛЯ НА СПЕКТР ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ФУЛЛЕРЕНА C_{60}

Т.А. Мередилина

Благовещенский государственный педагогический университет (г. Благовещенск)

biofirm@mail.ru

В данной работе показано, что взаимодействие молекул матрицы с молекулами внедренного вещества оказывает существенное влияние на спектральные характеристики. Рассмотрены условия способствующие получению спектров флуоресценции C_{60} , к которым можно отнести геометрию и π -электронные подсистемы взаимодействующих молекул, плотность и вязкость растворителя матрицы.

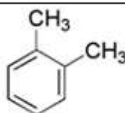
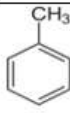
Инструментом изучения квантовых свойств и строения атома может являться линейчатый спектр. Для получения линейчатых спектров флуоресценции многоатомных молекул углеродных мо-

дификаций удобно использовать метод Шпольского. Применение данного метода предусматривает подбор удобной матрицы, в которую встраиваются молекулы исследуемого вещества при криогенных температурах. В работе приведены результаты получения спектров люминесценции фуллерена C_{60} в кристаллических матрицах четырех органических растворителей: гептане, гексане, толуоле, орто-ксилоле.

Фуллерен C_{60} является одной из аллотропных модификаций углерода, состоящей из 60 атомов углерода, образующих полую сферическую структуру, внешний диаметр полости составляет 0,7 нм, внутренний каркас имеет диаметр 5 Å. Между молекулами кристалла нет химической связи, каждая отдельная сфера-молекула сохраняет свою индивидуальность, целостности кристалла способствуют силы Ван-Дер-Ваальса [1]. При комнатной температуре были приготовлены растворы фуллерена C_{60} с концентрациями $10^{-2} - 10^{-7}$ моль/л в каждом растворителе. Все растворители химически нейтральны к углероду, легко кристаллизуются при температуре $T = 77,3$ К, оптически прозрачны (табл. 1).

Таблица 1)

Характеристики растворителей

Свойство	Гексан (C_6H_{14})	Гептан (C_7H_{16})	Орто-ксилол (C_8H_{10})	Толуол (C_7H_8)
Плотность, г/см ³	0,660	0,684	0,880	0,867
Диэлектрическая проницаемость	1,89	1,92	2,56	2,38
Полярность (индекс полярности)	0,0	0,0	2,5	2,4
Вязкость при 20°C, мПа·с	0,326	0,386	0,81	0,59
Растворимость фуллерена C_{60} , мг/мл	0,0028	0,0015	6,0	2,8
Структурная формула молекулы				

Образцы в замороженном состоянии облучались твердотельным лазером АВМ УФ 400К с длиной волны 365 нм. Спектры флуоресценции фиксировались на высокочувствительную ПЗС линейку TCD1304DG на спектрограф ИСП-51, обработка данных осуществлялась в программе №2017616306 «Модуль автоматизации спектрального анализа для спектрографа ИСП-51» [2].

Анализ результатов, представленных в табл. 2, показывает, что для сравнения спектров, полученных в разных матрицах, удобнее взять растворы с концентрацией 10^{-6} моль/л. При данной концентрации все растворители разрешают три линии 678,5 нм, 677 нм, 674,5 нм с полуширинами от 4,25 см⁻¹ до 10,20 см⁻¹, с уменьшением концентрации падает интенсивность спектров. Линия 678,5 нм разрешима во всех матрицах, имеет максимальную интенсивность и минимальную полуширину. По данной линии удобно сравнить спектры фуллерена в четырех растворителях.

Наибольшая интенсивность спектра в гексане говорит о том, что гексановая матрица оказывает наименьшее влияние на внедренные молекулы фуллерена. По табл. 1 видно, что гексан имеет минимальную плотность, вязкость и полярность по сравнению с другими растворителями. Самым плотным из представленных растворителей является орто-ксилол, в нем фуллерен C_{60} имеет самую большую растворимость, между молекулами C_{60} и матрицей возникает взаимодействие, приводящее к размыванию спектра.

Для объяснения полученных результатов, необходимо сравнить так же геометрию молекул матрицы и внедренного вещества. Молекула фуллерена фиксируется в матрице несколькими молекулами растворителя, видимо короткие молекулы гексана плотнее остальных упаковывают её в кристалле матрицы. Не последнюю роль при взаимодействии матрицы и молекулы фуллерена имеет наличие π -электронов взаимодействующих молекул. Молекулы гексана и гептана не имеют двойных и тройных связей, π -электронная подсистема у них отсутствует. Орто-ксилол и толуол обладают ароматической при-

родой и могут вступать во взаимодействие с π -электронной системой молекулы фуллерена, что приводит к уширению спектра и снижению интенсивности линий.

Таблица 2)

**Характеристики полос спектра флуоресценции фуллерена C_{60}
в матрицах гексана, гептана, толуола и орто-ксилола**

Концентрация C_{60}	Гексан			Гептан			Толуол			Орто-ксилол		
	Длина волны, нм	Интенсивность, у.е.	Ширина, см ⁻¹	Длина волны, нм	Интенсивность, у.е.	Ширина, см ⁻¹	Длина волны, нм	Интенсивность, у.е.	Ширина, см ⁻¹	Длина волны, нм	Интенсивность, у.е.	Ширина, см ⁻¹
10 ⁻²	678,58	1448	4,79	678,34	1254	4,67	678,36	1262	6,5	678,33	1021	7,22
	676,86	1357	4,70	676,66	1151	4,19	676,86	1202	5,98			
	674,25	864	10,98									
10 ⁻³	678,61	1406	4,78	678,15	1179	4,69	678,4	1135	6,09	678,49	989	7,27
	677,17	1338	4,55	676,74	1144	4,9	676,95	1162	6,42			
	674,49	855	10,36	674,52	945	6,32	674,49	831	7,22			
10 ⁻⁴	678,43	1354	4,93	678,39	1104	5,99	678,51	1111	5,23	678,49	952	7,33
	678,84	1278	4,45	676,62	1136	4,86	676,98	1190	5,20	676,9	879	8,57
	674,42	850	10,20	674,03	886	6,32	674,22	885	7,12			
10 ⁻⁵	678,51	1336	4,81	678,39	1102	4,3	678,64	1047	4,57	678,57	933	6,07
	677,14	1258	4,28	676,74	1122	4,95	677,04	1103	4,10	676,48	847	8,35
	674,41	860	8,42	674,07	853	5,98	674,58	916	7,02	674,49	757	10,48
10 ⁻⁶	678,4	1378	4,80	678,42	1066	4,1	678,54	1024	4,74	678,49	930	6,64
	676,86	1219	4,28	676,9	1062	3,79	677,14	1041	4,99	676,71	846	8,45
	674,42	809	7,91	674,12	821	6,87	674,58	917	5,73	674,31	725	10,37
10 ⁻⁷	678,34	1243	4,81	678,15	1005	3,82	678,54	1003	5,03	678,49	929	7,13
	676,75	1179	4,25	676,65	1034	4,15	677,06	1037	5,47	676,51	843	8,57
	674,31	888	7,69	673,91	813	4,09	674,39	907	12,39	674,31	716	11,87

Таким образом, растворители матрицы существенно влияют на характеристики спектра флуоресценции, при подборе более удобной матрицы для объемных многоатомных молекул важно учитывать геометрию взаимодействующих молекул, наличие π -электронов в системе, такие свойства растворителей, как плотность и вязкость.

1. Никитина Ю. Н., Зотова А. В., Ягафарова З. А. Структура и физические свойства фуллерена - C_{60} // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2017. – Т. 2. – С. 37–39. – URL: <http://e-koncept.ru/2017/570009.htm>.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017616306 «Модуль автоматизации спектрального анализа для спектрографа ИСП-51». Автор: Антонов А.А. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 07 мая 2019 г.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА ПОРИСТОГО ТЕФЛОНА, ЗАПОЛНЕННОГО ТИОМОЧЕВИНОЙ

А.Ю. Милинский

Благовещенский государственный педагогический университет (г. Благовещенск)

a.milinskiy@mail.ru

Исследованы зависимости $\varepsilon'(T)$ для тефлоновых матриц с размером пор 220 нм, заполненных сегнетоэлектриком $SC(NH_2)_2$. Измерения проводились в режиме нагрева и охлаждения в интервале от 100 К до комнатной температуры. Обнаружено понижение сегнетоэлектрического фазового перехода I→II тиомочевин в пористом тефлоне, по сравнению с объемной тиомочевинной.

Исследования малых сегнетоэлектрических частиц показали значительные изменения их свойств по сравнению с объемными кристаллами, особенно вблизи фазовых переходов. Установлено, что температуры фазовых переходов смещаются по сравнению таковыми для объемных образцов, сами переходы становятся менее четкими, а при определенных размерах частиц сегнетоэлектрические свойства полностью утрачиваются [1 – 2].

Одним из подходов к созданию малых сегнетоэлектрических частиц является инкапсуляция сегнетоактивных материалов в нанопористые матрицы. В этом случае размеры частиц определяются размерами пор, и сегнетоэлектрические частицы формируют сетевую структуру, геометрия которой соответствует топологии пор. Такие наночастицы в порах представляют собой модельные системы, позволяющие исследовать размерные эффекты в полярных диэлектриках. Исследованию свойств сегнетоэлектриков в нанопористых матрицах посвящен ряд работ: KNO_3 [3], NH_4HSO_4 [4], $C_6H_{16}NBr$ [5, 6], $(NH_4)_2SO_4$ [7] и т.д.

В данной работе в качестве матрицы использовались тефлоновые пластины с размером пор ~220 нм. Тиомочевина растворялась в воде, после чего в раствор погружались тефлоновые образцы. После испарения растворителя и удаления избытка вещества проводилась термообработка при 400 К. Диэлектрические измерения проводились с использованием иммитансметра Е7-25 в диапазоне температур 100 – 225 К и частот 25 Гц – 1 МГц. Для выявления фазовых переходов использовался также метод нелинейной диэлектрической спектроскопии (анализ коэффициента третьей гармоники $\gamma_{3\omega}$).

Согласно результатам исследований (рис. 1 и 2) для объемной тиомочевин наблюдаются три характерные аномалии диэлектрической проницаемости при фазовых переходах (169 К, 176 К и 202 К). В нанопористом композите наиболее выраженными остаются переходы I→II и IV→V, но температура фазового перехода I→II снижается до ~165 К. Аномалия, соответствующая переходу III→IV, в композите не проявляется.

Инкапсуляция молекулярного сегнетоэлектрика $SC(NH_2)_2$ в нанопористый тефлон приводит к понижению температуры фазового перехода I→II на 4 К, при этом сохраняются ключевые особенности диэлектрического поведения. Для обоснования понижения температуры сегнетоэлектрического фазового перехода тиомочевин, внедренной в нанопористый тефлон, можно использовать теорию Ландау-Гинзбурга с учетом поверхностных и размерных эффектов. Температура фазового перехода T_c может быть описана с использованием свободной энергии Гиббса G , зависящей от спонтанной поляризации P [8]:

$$G = G_0 + \alpha(T - T_0)P^2 + \frac{\beta}{2}P^4 + \frac{\gamma}{3}P^6, \quad (1)$$

где T_0 – температура фазового перехода в объемном материале; α , β , γ – коэффициенты, зависящие от материала; P – поляризация.

Расчетные значения коэффициентов α , β и γ для тиомочевина составляют $4,1 \cdot 10^8$ Кл²·м²·Н, $12,5 \cdot 10^{12}$ Кл⁴·м⁶·Н и $2,1 \cdot 10^{16}$ Кл⁶·м¹⁰·Н соответственно [9].

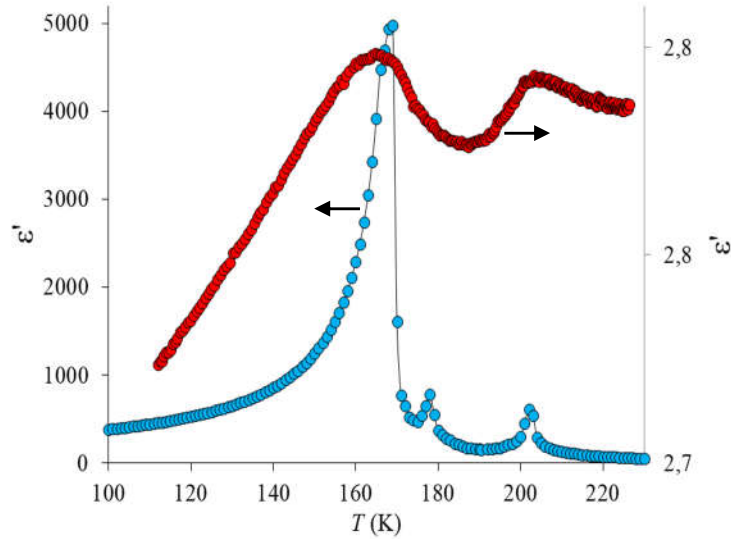


Рис. 1. Температурная зависимость ϵ' монокристаллической тиомочевина (левая ось), и тиомочевина в нанопористой матрице тефлона (правая ось).

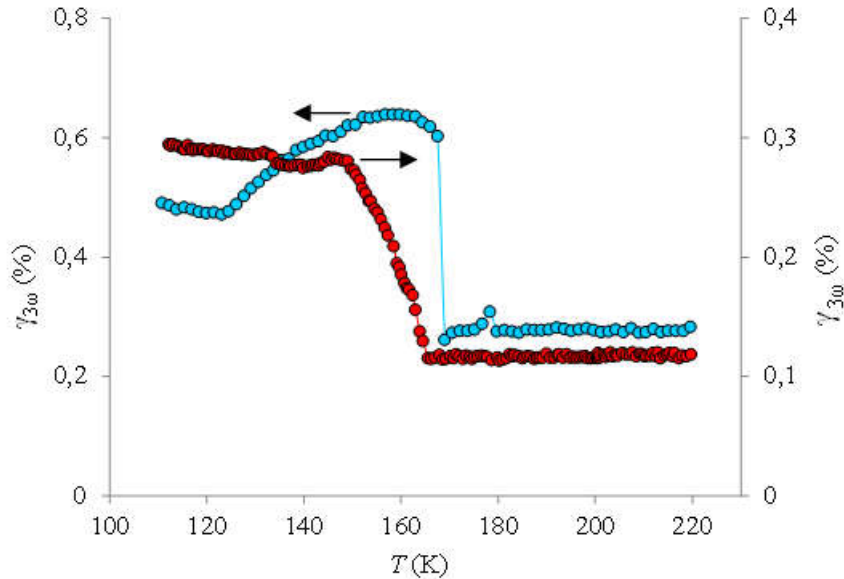


Рис. 2. Температурная зависимость $\gamma_{3\omega}$ монокристалла тиомочевина (левая ось), и тиомочевина в нанопористой матрице тефлона (правая ось).

Температура фазового перехода наночастиц сегнетоэлектрика может быть записана в приближенном виде как функция от радиуса частицы в следующем виде [10]:

$$T_c(r) = T_0 \left(1 - \frac{\delta}{r} \right), \quad (2)$$

где $T_c(r)$ – температура фазового перехода для частиц радиуса r ; T_0 – температура фазового перехода для объёмного материала; δ – параметр, связанный с поверхностной энергией и материалом, включающий механические напряжения и дефекты.

Для того, чтобы оценить значение параметра δ для наночастиц тиомочевинны размером 220 нм, используем следующее уравнение:

$$\Delta T = T_0 - T_c(r) = T_0 \frac{\delta}{r}. \quad (3)$$

Подставляя экспериментальные значения для частиц тиомочевинны ($\Delta T = 4$ К, $T_0 = 169$ К, $T_c(r) = 165$ К и $r = 220$ нм) в выражение для температурного смещения фазового перехода, получаем величину коэффициента $\delta \approx 5$ нм. Данное значение δ согласуется с типичными оценками для сегнетоэлектрических наночастиц, где оно характеризует степень влияния размерных эффектов на температуру фазового перехода. В частности, согласуется с δ для титаната бария [11].

-
1. Wang J.J., Ma X.Q., Li Q., Britson J., Chen L.-Q. Phase transitions and domain structures of ferroelectric nanoparticles: Phase field model incorporating strong elastic and dielectric inhomogeneity // *Acta Materialia*. – 2013. – V. 61. – P. 7591.
 2. Chen S., Mo Y. and Wu Y. Ferroelectric phase transitions of nanoislands based on transverse ising model // *Physica Scripta*. – 2023. – V. 98. – P. 115937.
 3. А. Ю. Милинский, С. В. Барышников, Е. В. Стукова, Е.В. Чарная, И.А. Чернечкин, Н.И. Ускова. Диэлектрические и тепловые свойства KNO_3 , внедренного в углеродные нанотрубки // *Физика твердого тела*. – 2021. – Т. 63. – № 6. – С. 767-771.
 4. S. V. Baryshnikov, A. Y. Milinskiy, E. V. Charnaya, A.S. Bugaev, M.I. Samoylovich. Dielectric studies of ferroelectric NH_4HSO_4 nanoparticles embedded into porous matrices // *Ferroelectrics*. – 2016. – V. 493. – Iss. 1. – P. 85-92.
 5. A. Y. Milinskiy, S. V. Baryshnikov, I. V. Egorova, E. V. Charnaya, H.T. Nguyen. Dielectric properties of an organic ferroelectric of bromide diisopropylammonium embedded into the pores of nanosized Al_2O_3 films // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2019. – V. 31. – Iss. 48. – P. 485704.
 6. С. В. Барышников, А. Ю. Милинский, Е. В. Чарная, И. В. Егорова. Размерный эффект в нанокompозитах на основе молекулярного сегнетоэлектрика бромид диизопропиламмония // *Физика твердого тела*. – 2019. – Т. 61. – № 2. – С. 273-277.
 7. С. В. Барышников, Е. В. Чарная, А. Ю. Милинский, А. Ю. Гойхман. Диэлектрические свойства нанопористой матрицы МСМ-41, заполненной сегнетоэлектриком $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ // *Физика твердого тела*. – 2013. – Т. 55. – № 5. – С. 987-990.
 8. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. / Пер. с англ. под ред. В.В. Леманова, Г.А. Смоленского. Мир, М. 1981, – 736 с.
 9. Goldsmith G. J. and White J. G. Ferroelectric Behavior of Thiourea // *J. Chem. Phys.* – 1959. – V. 31. – P. 1175.
 10. Li S., Eastman J.A., Li Z., Foster C.M., Newnham R.E., Cross L.E. Size effects in nanostructured ferroelectrics // *Physics Letters A*. – 1996. – V. 212. – P. 341.
 11. Wang Y.G., Zhong W.L., Zhang P.L. Size effects on the Curie temperature of ferroelectric particles // *Solid State Communications*. – 1994. – V. 92. – P. 519.

ФРАКТАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В НАНОКОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ МЕЗОПОРИСТЫХ МАТРИЦ

А.А. Набережнов

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

alex.nabereznov@mail.ioffe.ru

В работе рассмотрены вопросы, связанные с изменением пространственной организации внутреннего порового пространства в мезопористых щелочно-боросиликатных стеклах со средними диаметрами пор (каналов) 7 (PG7) и ~45 нм (WPG), в процессе создания нового интерфейса на границе «матрица-поровое пространство» и последующего заполнения оставшегося порового пространства диэлектрическими материалами. Для создания интерфейса использовались углерод, TiO_2 и Al_2O_3 . Диэлектрики $NaNO_2$, KNO_3 и $NaNO_3$ вводились в матрицы из насыщенных водных растворов. Кристаллическая структура модификаторов интерфейса и внедренных диэлектриков исследовалась методами дифракции рентгеновского излучения и нейтронов, а эволюция их пространственной организации в поровом пространстве – методами малоуглового рассеяния нейтронов (SANS) и рентгеновского излучения (SAXS). Определены фрактальные характеристики пористых стекол. Построена модель эволюции пространственной организации нанокompозитного материала на основе PG7 с интерфейсом из диоксида титана, содержащим внедренный сегнетоэлектрик $NaNO_2$.

Тот факт, что переход от микроскопического к наноскопическому масштабу размера частиц материалов, обладающих различным типом дальнего порядка, приводит к существенному изменению наблюдаемых макроскопических физических свойств, в настоящее время имеет многочисленные экспериментальные и теоретические подтверждения. В качестве причин, приводящих к резкой модификации свойств наноструктурированных материалов по сравнению с их массивными аналогами, можно указать несколько основных: это собственно сам размерный эффект (когда размер частицы становится порядка или меньше корреляционной длины соответствующего взаимодействия) и отношение числа атомов в поверхностном слое (слоях), в котором существует нарушение локальной симметрии, к общему числу атомов в наночастице. Для наноструктур, созданных на основе мезопористых матриц, следует добавить и наличие интерфейса между матрицей и внедренным в нее материалом. При этом следует отметить, что именно наноструктуры на основе мезопористых матриц (далее НКМ – нанокompозитные материалы) находят в настоящее время все более широкое практическое применение [1]. Для создания НКМ используют разного типа природные и искусственные мезопористые матрицы с различной топологией порового пространства и широкий спектр методик внедрения материалов внутрь этих матриц. В данной работе мы использовали мезопористые боросиликатные стекла двух типов со средним диаметром пор 7(2) нм (PG7 - porous glasses) и 45(5) (WPG – wide porous glasses) нм. Средний диаметр канала для стекол PG7 определялся из данных ртутной порометрии. Матрицы WPG были получены из стекол PG7 после щелочного травления. На рис. 1а показан вид поверхности матрицы PG7 (данные сканирующей электронной микроскопии – SEM), а на рис. 1б – данные просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ), полученные на тонком поперечном срезе этой же матрицы. Ранее было показано, что модификация интерфейса приводит к значительному изменению диэлектрических свойств НКМ, содержащих внедренные в поровое пространство KNO_3 и $NaNO_2$ [2, 3], в то же время вопрос о пространственной организации введенных материалов и о роли интерфейса на нее оставался

открытым. Целью работы было шаг за шагом проследить изменение пространственных характеристик НКМ с модифицированным интерфейсом по цепочке «пустое стекло → матрица с модифицированным интерфейсом → НКМ с внедренным материалом» и сравнить полученные характеристики с ранее исследованными НКМ без модификации интерфейса. Такая информация позволит в дальнейшем выяснить роль модификации интерфейса и пространственной организации НКМ в изменении их макроскопических физических свойств.

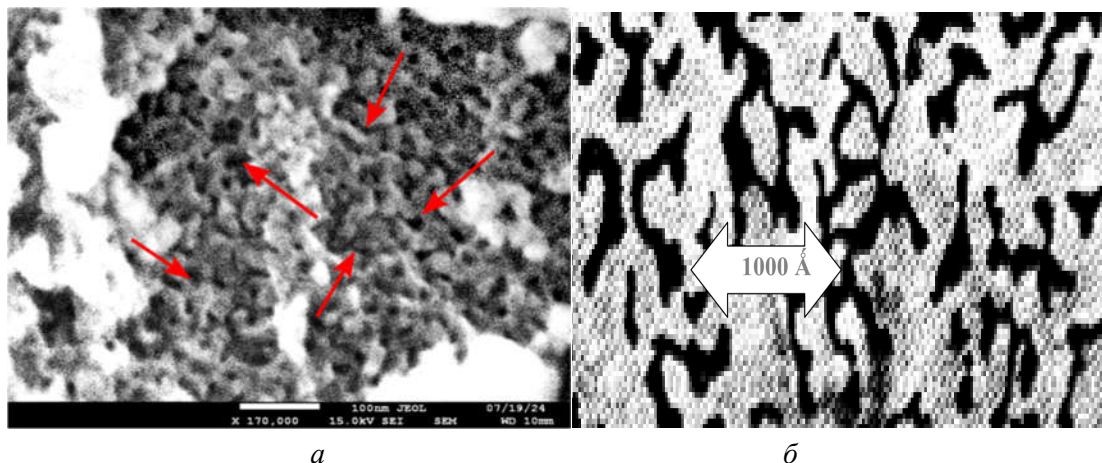


Рис. 1. Изображения поверхности (а) (SEM) и поперечного сечения (б) (TEM) матрицы PG7. Черные точки на рисунке (а) и черные области на рисунке (б) – поры, светлые области – аморфный SiO₂.

Красные стрелки указывают на некоторые поры, выходящие на поверхность.

На первом этапе на основе этих стекол были изготовлены матрицы, в которых интерфейс «матрица-поровое пространство» был модифицирован углеродом, TiO₂ и Al₂O₃. Для получения интерфейса из Al₂O₃ в качестве прекурсора использовался хорошо растворимый нонагидрат нитрата алюминия Al(NO₃)₃×9H₂O (х.ч.), который разлагается при нагреве с образованием аморфного оксида алюминия. Для изготовления интерфейса из оксида титана как прекурсор использовался тетраизопропилат титана (ТИП) C₁₂H₂₈O₄Ti (i-C₃H₇O)₄Ti, хорошо соединяющийся с органическими растворителями (например, абсолютный этанол или изопропанол) и быстро гидролизующийся водой. Для получения интерфейса из углерода образец мезопористого стекла помещали в 10 % раствор сахарозы (х.ч.) и нагревали при 100 °С на воздухе до полного высыхания раствора. Исходная концентрация раствора выбиралась из соображения получения раствора невысокой вязкости для легкого пропитывания образца пористого стекла. Затем температуру повышали до 230 °С (до начала обугливания) и выдерживали 2 часа, а на последней стадии отжига температуру поднимали до 400 °С и выдерживали до 0,5 часа. Количество образовавшегося интерфейса контролировалось гравиметрически. Эта процедура была выполнена только для стекол PG7 с интерфейсами. В табл. 1 параметр V_{if} указывает объемную долю материала интерфейса, которую он занимает в соответствующих мезопористых матрицах с модифицированным интерфейсом в процентах от общего (исходного) объема порового пространства данного пустого стекла, параметр V_p – объем порового пространства от общего объема исходного пустого мезопористого стекла.

Таблица 1)

Объем порового пространства и доля интерфейса для стекол PG7 и WPG

образец	PG7	PG7+C	PG7+Al ₂ O ₃	PG7+TiO ₂	WPG	WPG+C	WPG+Al ₂ O ₃	WPG+TiO ₂
V _p , об. %	26(1)	26(1)	25(1)	25(1)	27(1)	27(1)	27(1)	27(1)
V _{if} , об. %		9,8(2)	4,7(3)	6,7(3)		18,8(2)	7,3(2)	6,6(2)

Изменение среднего диаметра каналов определялось из анализа данных по сорбции-десорбции азота (метод BET – [4]). Эта процедура была выполнена только для стекол PG7 с интерфейсами. Анализ данных BET процедуры показал, что модификаторы в основном образуют 1-2 слоя аморфного материала на внутренней поверхности пор (каналов). Далее полученные стекла PG7 с модифицированными интерфейсами использовались для приготовления НКМ с внедренными в оставшееся свободное поровое пространство NaNO_2 , KNO_3 и NaNO_3 , которые вводились в матрицы из насыщенных водных растворов. Структура (кристаллическое состояние) интерфейсов и внедренных материалов контролировалось с помощью рентгеновской дифракции на всех этапах изготовления НКМ. На рис. 2а приведены дифрактограммы рассеяния (Cu K_α линия) на мезопористых стеклах PG7, PG7+TiO₂ и PG7+Al₂O₃. Использовались дифрактометры ДРОН-8Н (Cu K_α) и SuperNova Oxford Diffraction (Mo K_α), измерения проводились при комнатной температуре. Хорошо видно, что никаких пиков от материала интерфейса не наблюдается, но общий фон при введении интерфейса изменяется и по интенсивности, и по форме. Это свидетельствует об аморфном состоянии материалов интерфейса. Широкий пик в области $2\theta \sim 21^\circ$ связан с рассеянием на аморфном SiO₂, образующем «скелет» самой матрицы [1]. На следующем этапе были проведены исследования особенностей внутренней пространственной организации изготовленных матриц с модифицированным интерфейсом и НКМ на их основе, содержащих внедренные диэлектрики с помощью методов малоуглового рассеяния нейтронов (SANS – установка YuMO, Дубна, ЛНФ, ОИЯИ) и рентгеновского излучения (SAXS – установка Xeuss 3.0, $\lambda = 0,70926 \text{ \AA}$, Дубна, ЛНФ, ОИЯИ).

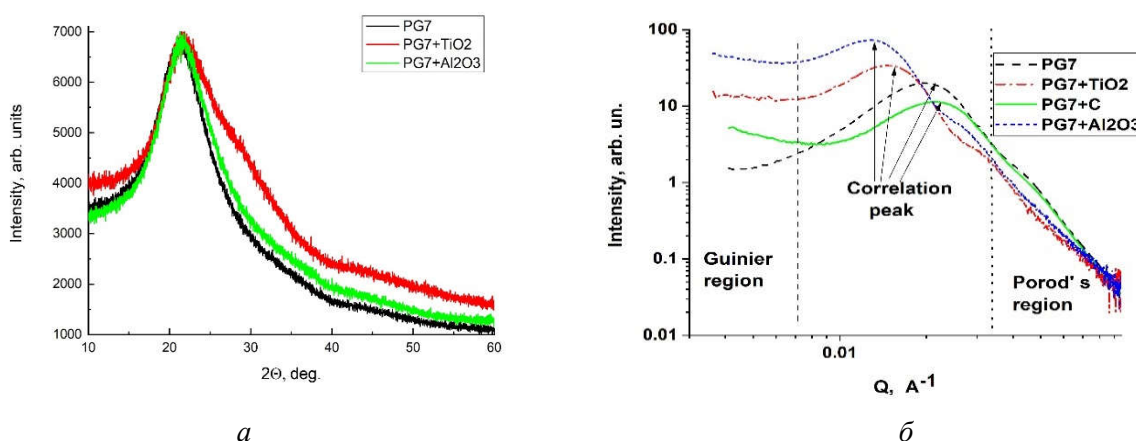


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы для мезопористых стекол PG7, PG7+TiO₂ и PG7+Al₂O₃ (а), данные SAXS для PG7, PG7+TiO₂, PG7+Al₂O₃ и PG7+C (б).

В общем случае (для пористых структур) для зависимости интенсивности малоуглового рассеяния I от переданного импульса Q можно написать следующее выражение:

$$I(Q) = V_p^2 \times n_p^2 \times (\rho_p - \rho_s)^2 \times P(Q) \times S(Q), \quad (1)$$

где V_p – объем пор; n_p – плотность заполнения порового пространства; ρ_p и ρ_s – плотности длин рассеяния для пор и матрицы; $P(Q)$ – форм-фактор для пор (или частиц в матрице); $S(Q)$ – структурный фактор, который определяется пространственным упорядочением пор и описывает интерференционные эффекты от рассеяния на контрасте (т.е. на разнице длин рассеяния $\Delta\rho = (\rho_p - \rho_s)$) «канал (пора) – матрица».

В пределе $Q \times R_g \leq 1$ (т.е. при малых Q (область Гинье) величина $S(Q) \approx 1$, и все рассеяние определяется множителем $P(Q)$. Величина $P(Q)$ может быть рассчитана для частиц (пор) различной формы, но в области малых Q выполняется следующее общее условие (закон Гинье):

$$P(Q) \sim \exp\left(-\frac{Q^2 \times R_g^2}{3}\right). \quad (2)$$

Здесь R_g – радиус гирации (среднеквадратичный радиус инерции) рассеивающей частицы. При больших Q , где выполняется условие $Q \times R_g \geq 1$ (область Порода), интенсивность рассеяния имеет вид:

$$I(Q) \sim S(Q) \sim S \times Q^{-(6-D)} = S \times Q^{-\alpha}. \quad (3)$$

Здесь D – фрактальная размерность; S – полная площадь интерфейса между двумя фазами. В частном случае гладкой поверхности $D = 2$, тогда $I(Q) \sim Q^{-4}$. Это асимптотическое поведение носит название закона Порода, т.е. в этой области (если данные представить в дважды логарифмическом масштабе) наклон зависимости на графике $I(Q)$ будет равен 4. Для удобства чаще используют параметр $\alpha = (6-D)$. Для перехода в масштаб прямого пространства следует использовать соотношение d (в $\text{\AA}$) = $2\pi/Q$. Отклонение параметра α от 4 позволяет сделать выводы о пространственной организации материала в каналах порового пространства на масштабах по d , на которых сохраняется постоянство параметра α . На рис. 2б представлены зависимости $I(Q)$ для PG7, PG7+TiO₂, PG7+Al₂O₃ и PG7+C. Для пустого PG7 зависимость $I(Q)$ типична для этого сорта мезопористых стекол [5, 6]. Из обработки данных в области Гинье для последних трех матриц были определены соответствующие R_g , представленные в табл. 2. Появление корреляционного пика связано с наличием областей локального упорядочения и будет обсуждено позже. При больших Q можно выделить две области с различными наклонами (α_1 или α_2 в формуле (3)) для матриц с разными интерфейсами, причем точка кроссовера этих наклонов зависит от модификатора. Пример разбиения зависимости $I(Q)$ для пары PG7 и PG7+C на области с принципиально различным поведением рассеяния представлен на рис. 3. Параметры подгонки α_1 и α_2 приведены в табл. 2, D^I – пространственный масштаб (в прямом пространстве), на котором для данной матрицы наблюдается кроссовер в поведении зависимости $I(Q)$, подчиняющейся закону $Q^{-\alpha}$ с разными α . Положение D^I зависит от модификатора (C, Al₂O₃, TiO₂).

Таблица 2)

Радиусы гирации R_g , параметры $\alpha_{1,2}$ и масштаб D^I , на котором наблюдается кроссовер в рассеянии

образец	PG7	PG7+C	PG7+Al ₂ O ₃	PG7+TiO ₂	WPG	WPG+C	WPG+Al ₂ O ₃	WPG+TiO ₂
R_g , nm		54(4)	23(3)	29(5)				
α_1 (III)	4,31(6)	4,43(5)	3,92(6)	3,21(4)	3,62(2)	3,41(2)	3,55(4)	3,38(3)
α_2 (IV)	3,76(2)	3,77(4)	4,28(32)		3,74(2)	4,04(2)	4,12(3)	3,71(2)
D^I , nm	~ 7	~6,5	~ 12		~ 20	~17	~8,6	~10

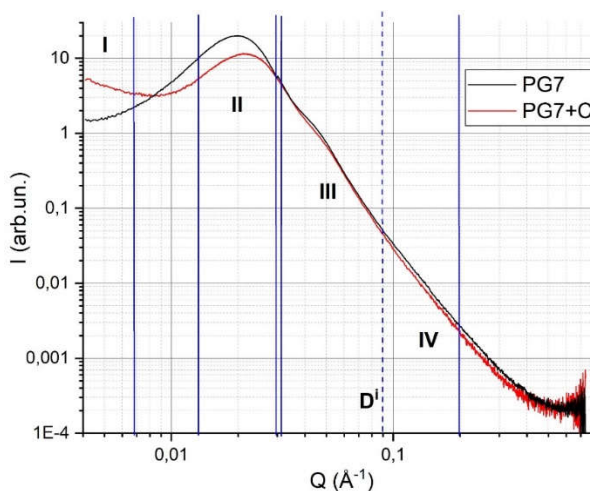


Рис. 3. Различные области поведения $I(Q)$ на примере PG7 и PG7+C. I – область Гинье, II – корреляционный пик, III и IV – области Порода с разными параметрами наклона α_1 (область III) и α_2 (область IV).

Значение параметра $\alpha > 4$ характерно для рассеяния на диффузной поверхности. Подобный вариант рассмотрен в работах [7, 8]. Рассеивающий объект рассматривался как пористое твердое тело с достаточно гладкими границами пор и непрерывным степенным переходом плотности амплитуды рассеяния на интерфейсе. В этом случае $\alpha = 4 + 2\beta$, причем параметр $0 < \beta < 1$, и он ответственен за изменение рассеивающей плотности на интерфейсе от 0 вне частицы до ρ_0 внутри по закону $\rho(x) = \rho_0(x/b)^\beta$, здесь b – толщина интерфейса, x – текущая координата от поверхности частицы к ее центру.

Таким образом из табл. 2 видно, что создание интерфейса в матрице PG7 приводит к формированию в поровом пространстве либо поверхностного фрактала ($3 < \alpha < 4$), либо диффузной поверхности. Наиболее адекватно описать полученные результаты SAXS можно, предположив, что модификаторы образуют систему связанных полых цилиндров с толщиной стенок в 1-2 молекулы, занимающих пространственную область, характеризуемую соответствующим радиусом гирации, причем форма этой области близка к сферической. Здесь следует также отметить, что R_g для всех типов модификаторов значительно превосходит средний диаметр каналов в PG7, т.е. эта область реализуется в границах нескольких связанных соседних пор (каналов). Кроме того, положение кроссовера (смены режима) в рассеянии хорошо совпадает со средним диаметром канала в матрице PG7.

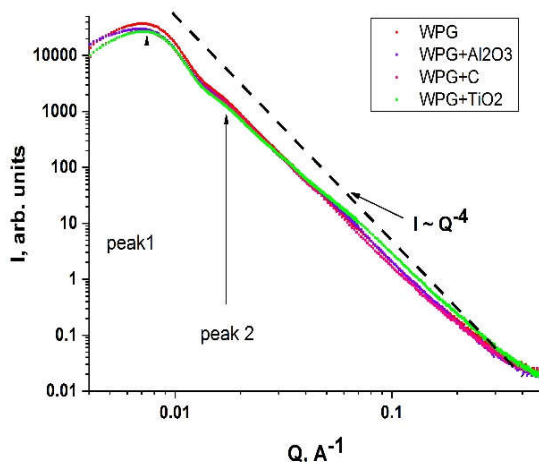


Рис. 4. Зависимости $I(Q)$ для матриц WPG, WPG+TiO₂, WPG+Al₂O₃ и WPG+C. Черная штриховая линия – закон Порода $I \sim Q^{-4}$. Стрелками обозначены положения корреляционных пиков.

В случае матриц WPG добраться до области Гинье оказалось экспериментально невозможным на данной установке. Наблюдаемые при больших переданных импульсах зависимости интенсивности рассеяния в целом аналогичны полученным для PG7, только кроссовер перехода к другому режиму рассеяния реализуется на несколько большем пространственном масштабе, чем для матриц PG7 с модификаторами. На рис. 4 представлены зависимости $I(Q)$ для матриц WPG, WPG+TiO₂, WPG+Al₂O₃ и WPG+C. Появление аномалии (перегиба), соответствующей *peak 2*, связано с остаточным вкладом от матрицы PG7 (см. выше технологию приготовления WPG), а корреляционный пик *peak 1* связан с локальным упорядочением как материала интерфейса, так и каналов самого WPG.

Как уже указано ранее, заполнение матриц PG7 с интерфейсом диэлектриком приводит к резкому изменению диэлектрических свойств НКМ [2, 3]. В то же время происходит и изменение пространственной организации введенного в поровое пространство диэлектрика. Рассмотрим это подробнее на примере НКМ PG6+TiO₂+NaNO₂ (PG6 полностью однотипно матрице PG7). Было проведено поэтапное исследование эволюции пространственной организации НКМ с NaNO₂ по цепочке: пустое PG6 → PG6+TiO₂ → PG6+NaNO₂ → PG6+TiO₂+NaNO₂. NaNO₂ в пустоты матриц PG6 и PG6+TiO₂ вводился из насыщенного водного раствора, при этом заполнение NaNO₂ в обоих образцах составило 59 % от исходного объема пор PG6. Объем

введенного нитрита натрия и степень заполнения порового пространства определялись гравиметрически. Кристаллическая структура НКМ PG6+NaNO₂ и PG6+TiO₂+NaNO₂ изучалась на рентгеновском дифрактометре SuperNova Oxford Diffraction ($\lambda = 0,70926 \text{ \AA}$, Mo K $_{\alpha 1}$). Измерения проводили в геометрии «на прохождение», площадь «засветки» образцов и их толщина была одинаковой для обоих НКМ. Фон от аморфного каркаса PG6 измерялся отдельно и в дальнейшем вычитался. Пространственные характеристики пустого PG6 и всех НКМ определялись из анализа интенсивностей SAXS, полученных на установке Xeuss 3.0 на линии Mo K $_{\alpha}$ (0,71 Å) при трех расстояниях образец-детектор: 550, 1825 и 4605 mm. На рис. 5 представлены дифрактограммы для образцов НКМ PG6+NaNO₂ и PG6+TiO₂+NaNO₂ (фон от пустого PG6 вычтен). Структура полностью соответствует структуре NaNO₂, но упругие пики существенно уширены из-за размерного эффекта. Из уширения пиков определены размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) $\langle L \rangle$, характеризующие размер наночастиц NaNO₂ для обоих НКМ: $\langle L_1 \rangle = 9(1) \text{ nm}$ для PG6+NaNO₂, $\langle L_2 \rangle = 12(3) \text{ nm}$ для PG6+TiO₂+NaNO₂ (вставка на рис. 5).

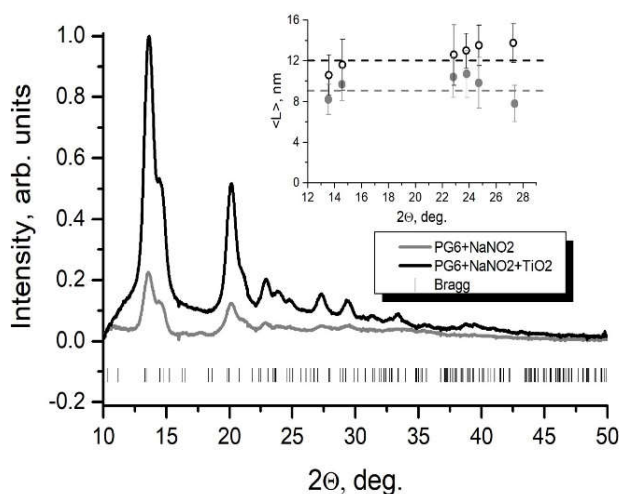


Рис. 5. Дифрактограммы для НКМ PG6+NaNO₂ (серая линия) и PG6+TiO₂+NaNO₂ (черная линия) при комнатной температуре. Штрихи внизу – положения упругих пиков. На вставке размеры области когерентного рассеяния $\langle d \rangle$ для NaNO₂ в НКМ PG6+NaNO₂ (заполненные символы) и PG6+TiO₂+NaNO₂ (пустые символы).

Из данных, приведенных на рис. 5, было установлено, что интегральная интенсивность упругих пиков резко увеличивается для НКМ PG6+TiO₂+NaNO₂ (примерно в 4,5 раза) по сравнению с PG6+NaNO₂. Так как степень заполнения порового пространства, геометрические размеры образцов и геометрия измерений для обоих НКМ были идентичны, поэтому можно было ожидать роста интенсивности из-за увеличения размера ОКР примерно в $(L_2/L_1)^3 \approx 2,35$ раз, а не в 4,5 раза. Этот факт свидетельствует в пользу предположения о том, что наличие диоксида титана способствует увеличению доли кристаллической фазы нитрата натрия в НКМ PG6+TiO₂+NaNO₂. Это также означает, что в обоих образцах присутствует и аморфная фаза нитрита натрия, как и было предположено в работе [3].

Для сравнения на рис. 6 представлены зависимости интенсивности SAXS $I(Q)$ для пустого PG6 и НКМ PG6+TiO₂+NaNO₂. В случае НКМ $I(Q)$ резко отличается от наблюдаемой PG6 и PG6+TiO₂. В области от $Q_1 = 0,023 \text{ \AA}^{-1}$ ($d = 2\pi/Q_1 = 273 \text{ \AA}$) до $Q_2 = 0,26 \text{ \AA}^{-1}$ ($d = 24 \text{ \AA}$) $I(Q)$ хорошо описывается законом $Q^{-\alpha}$ с $\alpha = 3,57(2)$, т.е. на этом масштабе в прямом пространстве в PG6+TiO₂+NaNO₂ реализуется пространственная структура, подобная поверхностному фракталу. Используя выражение (2), мы определили $R_g = 68(2) \text{ nm}$ для наноагломератов NaNO₂ в PG6+TiO₂+NaNO₂. Наличие корреляционного пика в $I(Q)$ для незаполненного PG6 с максимумом при $Q_{\max} \sim 0,02 \text{ \AA}^{-1}$ является типичным для пористых стекол [5, 6] и связано с процессом спиноподобного распада [9] двухфазной системы исходного боросили-

катного стекла, что приводит к формированию структурных единиц в матрице с характерным размером $D \sim 2\pi/Q_{\max}$, где $Q_{\max}$ – положение максимума этого пика.

Для НКМ PG6+TiO₂+NaNO₂ положение корреляционного пика резко сдвигается в сторону меньших Q , что связано с появлением дополнительных интерфейсов. Сам пик хорошо описывается квадратированным лоренцианом:

$$I(Q) = A_1 / ((Q_{\max 0} - Q)^2 + \kappa^2) + B_1, \quad (4)$$

где A_1 – константа; B_1 – фон; $Q_{\max 0} = 0,01264(2) \text{ \AA}^{-1}$ – положение максимума, а $\kappa = 0,0078(2) \text{ \AA}^{-1}$ – обратный корреляционный радиус (радиус корреляции $r_c = 2\pi/\kappa$).

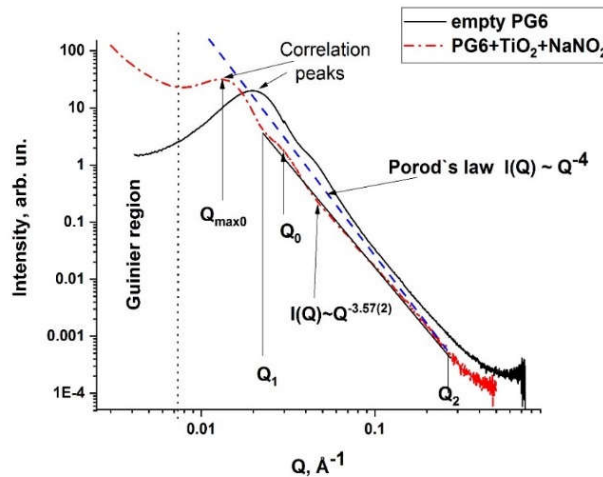


Рис. 6 Зависимости $I(Q)$ для пустого PG6 (черная сплошная линия) и НКМ PG6+TiO₂+NaNO₂ (красная штрих-пунктирная линия). Синяя пунктирная линия – закон Порода $I(Q) \sim Q^{-4}$. Черная прямая линия между Q_1 и Q_2 – область, в которой для рассеяния на НКМ PG6+TiO₂+NaNO₂ выполняется закон $I(Q) \sim Q^{-3.57}$.

В прямом пространстве квадратированному лоренциану соответствует корреляционная функция вида $F(r) = \exp(-\kappa r)$. Наличие этого пика указывает на то, что на масштабе $M = 2\pi/Q_{\max 0} \approx 50 \text{ nm}$ существует локальное упорядочение NaNO₂ с $r_c \approx 80 \text{ nm}$. «Плечо» на зависимости $I(Q)$ для НКМ при Q_0 связано с остаточным вкладом корреляционного пика от PG6.

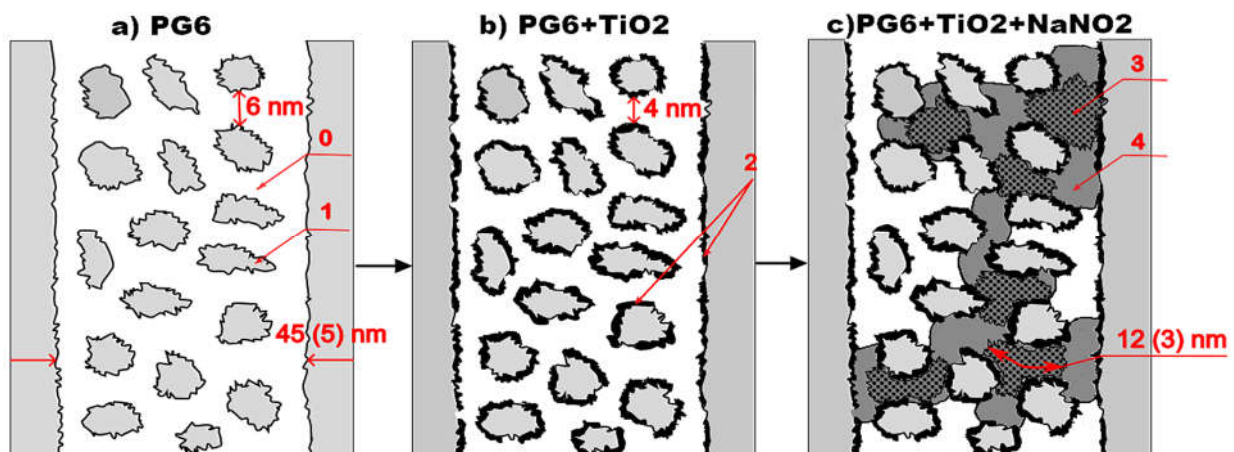


Рис. 7 Схема формирования внутренней пространственной организации НКМ PG6+TiO₂+NaNO₂ (поперечное сечение канала с $D=45(5) \text{ nm}$). Серые области слева и справа – каркас матрицы. На рис. 7с указан размер области когерентного рассеяния $L_2 = 12(3) \text{ nm}$ для НКМ PG6+TiO₂+NaNO₂. Остальные обозначения приведены в тексте.

Основываясь на анализе полученных результатов можно построить схему процесса формирования пространственной организации агломератов NaNO_2 в НКМ $\text{PG6}+\text{TiO}_2+\text{NaNO}_2$, которая изображена на рис. 7 (a, b, c).

1. После травления кислотой исходного боросиликатного стекла в каналах каркаса матрицы с $\langle D \rangle \sim 45$ nm реализуется многосвязная 3D структура из продуктов реакции (вторичного кремнезема) – «островков» (цифра 1 на рис. 7a). Оставшееся пустое пространство (цифра 0) формирует 3D сеть полостей (пор) со средним диаметром 6 nm.

2. При создании интерфейса на поверхностях канала и вторичного кремнезема формируется слой TiO_2 (черный жирный цвет, цифра 2 на рис. 7, b), а средний диаметр каналов уменьшается ~ 4 nm [2]. При этом для $\text{PG6}+\text{TiO}_2$ происходит резкое уменьшение α (до 3,21(4)) в области Порода по сравнению с пустым PG6 (α в среднем около 4). Для наноагломератов TiO_2 $R_{g1} = 29(5)$ nm, т.е. диоксид титана в порах стекла PG6 образует поверхностный фрактал, реализующийся в нескольких соседних порах со средним диаметром ~ 4 nm и состоящий из взаимосвязанных полых цилиндров, пустое пространство внутри которых на следующем этапе в основном заполняется NaNO_2 .

3. В НКМ $\text{PG6}+\text{TiO}_2+\text{NaNO}_2$ α в области Порода увеличивается от 3,21(4) до 3,57(2) (поверхностный фрактал становится как бы более «гладким»), а $R_g \sim 68$ nm существенно превосходит размер ОКР для наночастиц NaNO_2 из дифракционных данных. $I(Q)$ определяется в основном контрастом $(\Delta\rho)^2$, а не агрегатным состоянием рассеивателя, т.е. $(\Delta\rho)^2$ одинаков и для кристаллической фазы NaNO_2 , и для аморфной. В таком случае наиболее вероятен следующий сценарий: в поровом пространстве при заполнении образуются крупные агломераты нитрита натрия, состоящие из наночастиц кристаллической фазы (цифра 3 на рис. 3c), находящихся внутри более протяженных 3D областей аморфной фазы (цифра 4 там же). Здесь следует отметить еще раз, что наличие диоксида титана увеличивает долю кристаллической фазы NaNO_2 в порах по сравнению с НКМ $\text{PG6}+\text{NaNO}_2$. Если предположить, что область локального упорядочения с $r_c \sim 80$ nm и с дендритной 3D структурой, реализующейся в нескольких соседних взаимосвязанных каналах с $\langle D \rangle \sim 45$ nm, может быть вписана в сферу с некоторым характерным R_{g0} , то, используя формулу для радиуса гирации для сферы, можно оценить величину R_{g0} . Примем r_c за эффективный размер области, тогда из соотношения $(R_{g0})^2 = 3/5 (r_c)^2$ [10] получаем $R_{g0} \approx 62$ nm. Эта величина хорошо соответствует $R_g = 68(2)$ nm, полученному из анализа данных SAXS в области Гинье. Предлагаемая модель пространственной организации нитрита натрия в образце $\text{PG6}+\text{TiO}_2+\text{NaNO}_2$ хорошо объясняет особенности диэлектрического отклика данного НКМ, наблюдаемые в работе [2].

1. Enke, D., Janowski, F., Schwieger, W. Porous glasses in the 21st century — A short review // Micropor. Mesopor. Mater. – 2003. – V. 60. – P. 19-30.

2. Molokov, A., Sysoeva, A., Naberezhnov, A., Kumar, R., Koroleva, E., Vakhrushev, S. Effect of interface carbonization on dielectric properties of potassium nitrate nanocomposite based on porous glasses // Journal of Advanced Dielectrics. – 2022. – V. 12 – No. 4 – art. No. 2250013 (7 pages).

3. Молоков А. Ю., Сысоева А. А., Набережнов А. А., Королева Е. Ю. Влияние модификации интерфейса диоксидом титана на диэлектрические свойства нанокомпозита на основе пористого стекла с нитритом натрия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2022. – Т. 15. - № 3. – С. 17-27.

4. Lowell, S., Skields, J., Thomas, M.A., Thommes, M. Characterization of porous solids and powders: surface area, porosity, and density. // Particle Technology Series. - 2004. – V. 16. – (Amsterdam, Berlin: Springer Netherland, 350 p.)

5. Wiltzius, P., Bates, F.S., Dierker, S.B., Wignall, G.D. Structure of porous Vycor glass // Phys. Rev. A – 1987. – V. 36. – No. 6. – P. 2991(R)

6. Höhr, A., Neumann, H.-B., Schmidt, P.W., Pfeifer, P., D. Avnir, D. Fractal surface and cluster structure of controlled-pore glasses and Vycor porous glass as revealed by small-angle x-ray and neutron scattering. // Phys. Rev. B - 1988. – V.38. – No. 2, P. 1462-1467 (1988).
7. P.W. Schmidt in Modern Aspects of Small Angle Scattering, Eds. H. Blumberger, Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1995), P. 1 – 56
8. Schmidt, P.W., Avnir, D., Levy, D., Höhr, M. Steiner, M., Röhl. A. Small-angle x-ray scattering from the surfaces of reversed-phase silicas: Power-law scattering exponents of magnitudes greater than four. // J. Chem. Phys. – 1991. – V. 94. – P. 1474-1479
9. Cahn J.W. On spinodal decomposition // Acta Met. – 1961. – V.9. – No.9. – P. 795-801
10. Сверхгун Д.И., Фейгин Л.А. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние // Наука, М. 1986. 280 с.

УДК 537.226

ВЛИЯНИЕ РОДА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА РАСШИРЕНИЕ СЕГНЕТО- ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФАЗЫ KNO_3 В КОМПОЗИТАХ НА ЕГО ОСНОВЕ

А.В. Павлов, Е.В. Стукова

*Амурский государственный университет (г. Благовещенск)
katal75@yandex.ru*

Приводятся результаты диэлектрических исследований композитов $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{ZrO}_2)_x$, $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{TiO}_2)_x$, $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{SiO}_2)_x$ при $x = 0,05$. Показано, что во всех исследуемых композитах происходит расширение температурной области существования полярной фазы за счет снижения температуры выхода из сегнетоэлектрической фазы, при чем для композита $(\text{KNO}_3)_{0,95}/(\text{ZrO}_2)_{0,05}$ это расширение самое существенное, температурный интервал по сравнению с чистым нитратом калия увеличивается на 31 градус. Самые высокие значения емкости и коэффициента третьей гармоники наблюдаются для композита $(\text{KNO}_3)_{0,95}/(\text{SiO}_2)_{0,05}$.

В настоящее время сегнетоэлектрические материалы находят все более широкое практическое применение в различных областях электроники. Высокая восприимчивость к электрическим полям приводит к применениям, в которых необходимо концентрировать энергию. Высокая диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков используется в нелинейных конденсаторах большой емкости, высокоэффективных приемниках и преобразователях электромагнитного излучения в видимой и инфракрасной части спектра, энергонезависимых элементах памяти, сенсорах, аудиодатчиках.

Нитрат калия KNO_3 является сегнетоэлектриком с прямоугольной петлей гистерезиса, но при этом спонтанная поляризация наблюдается только при охлаждении в интервале от 124 °С до 100 °С. Для использования на практике необходимо найти такие условия, при которых сегнетофаза в нитрате калия останется стабильной при комнатных температурах. О расширении температурной области существования сегнетофазы в нитрате калия показано в ряде работ [1 – 3] при создании композитных материалов на основе нитрата калия. Например, при использовании в составе композита частиц титаната бария [1] описано расширение температурной области существования сегнетоэлектрического состояния. В работе [2] описывается, что при добавлении $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ расширение сегнетофазы происходит вплоть до комнатной температуры. В работах [2, 3] при добавлении к нитрату калия частиц $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и CeO_2 возникновение сегнетоэлектрической фазы происходит не только при охлаждении, но и при нагревании.

Целью данной было определение влияния рода диэлектрических включений ZrO_2 , TiO_2 и SiO_2 на стабильность и расширение полярного состояния в нитрате калия.

Нитрат калия при комнатной температуре и атмосферном давлении имеет ромбическую структуру (пространственная группа $Pmcn$) [4]. Эту фазу часто обозначают как фазу II. При нагреве около $128\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит переход в фазу I, имеющую разупорядоченную тригональную кальцитоподобную структуру $R\bar{3}m$. При охлаждении в зависимости от тепловой предыстории нитрат калия может перейти из высокотемпературной фазы I в промежуточную фазу III с симметрией $R3m$ и только при дальнейшем охлаждении – в фазу II. Промежуточная фаза III является сегнетоэлектрической с $P_r \approx 12\text{ мКл/см}^2$ при температуре от $124\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ К и наступает только при прогреве выше 443 К [5, 6].

Оксид титана TiO_2 существует в виде нескольких модификаций. В природе встречаются кристаллы с тетрагональной сингонией (анатаз, рутил) и ромбической сингонией (брукит). Искусственно получены ещё две модификации высокого давления – ромбическая IV и гексагональная V. При нагревании и анатаз, и брукит необратимо превращаются в рутил (температуры перехода соответственно $400 - 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и около $750\text{ }^{\circ}\text{C}$). Основой структур этих модификаций являются октаэдры TiO_6 .

Кристалл диоксида циркония ZrO_2 претерпевает фазовые превращения из моноклинного (стабильного при комнатной температуре) в тетрагональный (примерно при $1173\text{ }^{\circ}\text{C}$), а затем в кубический (около $2370\text{ }^{\circ}\text{C}$). В промышленности диоксид циркония используется в производстве огнеупоров на основе циркония, керамик, эмалей, стёкол.

Диоксид кремния SiO_2 – бесцветные кристаллы, практически нерастворимые в воде, обладающие высокой твёрдостью и прочностью, главный компонент почти всех земных горных пород. Диоксид кремния имеет несколько полиморфных модификаций. Самая распространённая из них на поверхности земли – α -кварц – кристаллизуется в тригональной сингонии. При нормальных условиях SiO_2 чаще всего находится в полиморфной модификации α -кварца, которая при температуре выше $+573\text{ }^{\circ}\text{C}$ обратимо переходит в β -кварц. При дальнейшем повышении температуры кварц переходит в тридимит и кристобалит. Эти полиморфные модификации устойчивы при высоких температурах и низких давлениях.

В исследовании использовались образцы композитов на основе нитрата калия KNO_3 с добавлением частиц ZrO_2 , TiO_2 и SiO_2 . Композиты $(KNO_3)_{1-x}/(ZrO_2)_x$, $(KNO_3)_{1-x}/(TiO_2)_x$, $(KNO_3)_{1-x}/(SiO_2)_x$ ($x = 0,05$) получались механическим перемешиванием порошков нитрата калия с частицами диэлектриков в соответствующих пропорциях. Далее полученная смесь прессовалась под давлением 7500 кг/см^2 в образцы в форме таблеток диаметром 10 мм и толщиной 1 мм .

Для измерения емкости образцов использовался цифровой измеритель импеданса E7-25 с частотным диапазоном $25\text{ Гц} - 10^6\text{ Гц}$. В качестве электродов использовалась In-Ga паста. Измерения проводились со скоростью нагрева-охлаждения ~ 1 градуса в минуту в температурном интервале от $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $190\text{ }^{\circ}\text{C}$, охватывающем фазовый переход в KNO_3 . Температура фиксировалась электронным термометром Center 340 с хромель-алюмелевой термопарой. Для определения температурной области существования сегнетоэлектрической фазы методом нелинейной диэлектрической спектроскопии регистрировался коэффициент третьей гармоники ($\gamma_{3\omega} = U_{3\omega} / U_{\omega}$).

В качестве образцов были исследованы композиты $(KNO_3)_{1-x}/(TiO_2)_x$, $(KNO_3)_{1-x}/(ZrO_2)_x$, $(KNO_3)_{1-x}/(SiO_2)_x$ при $x = 0,05$. На рис. 1 и 2 приведены графики зависимостей емкости $C(T)$ и коэффициента третьей гармоники $\gamma_{3\omega}(T)$ соответственно.

Как следует из графиков зависимостей, представленных на рис. 1 и 2, в композитах на основе нитрата калия для всех составов происходит расширение температурной области существования полярной фазы за счет снижения температуры выхода из сегнетоэлектрической фазы, то есть температуры исчезновения существования полярной фазы.

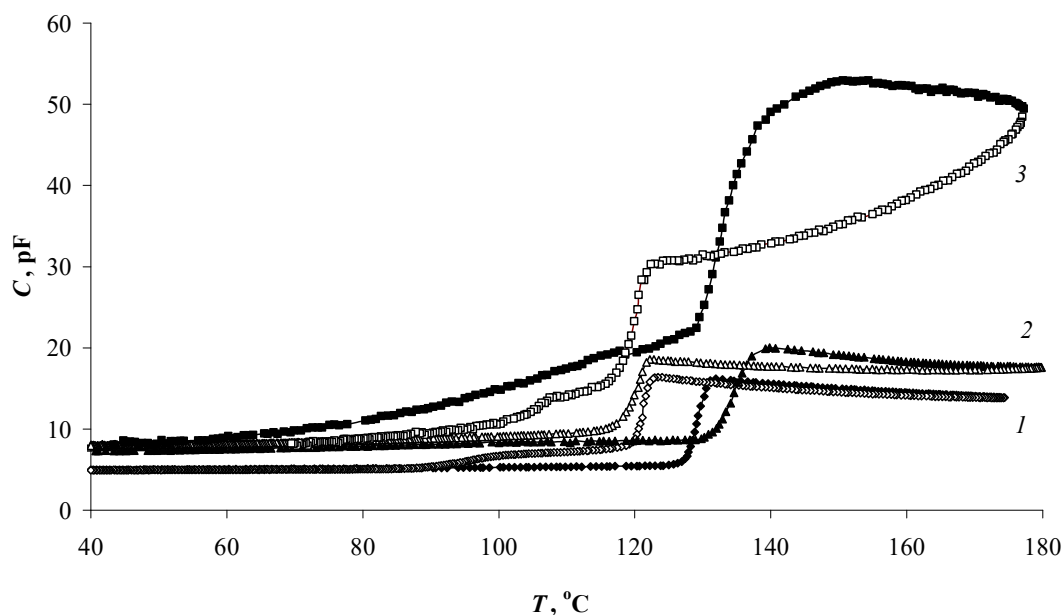


Рис. 1. Зависимости $C(T)$: $(\text{KNO}_3)_{0,95}/(\text{TiO}_2)_{0,05}$, $(\text{KNO}_3)_{0,95}/(\text{ZrO}_2)_{0,05}$, $(\text{KNO}_3)_{0,95}/(\text{SiO}_2)_{0,05}$ (сплошные маркеры – нагрев, пустые – охлаждение).

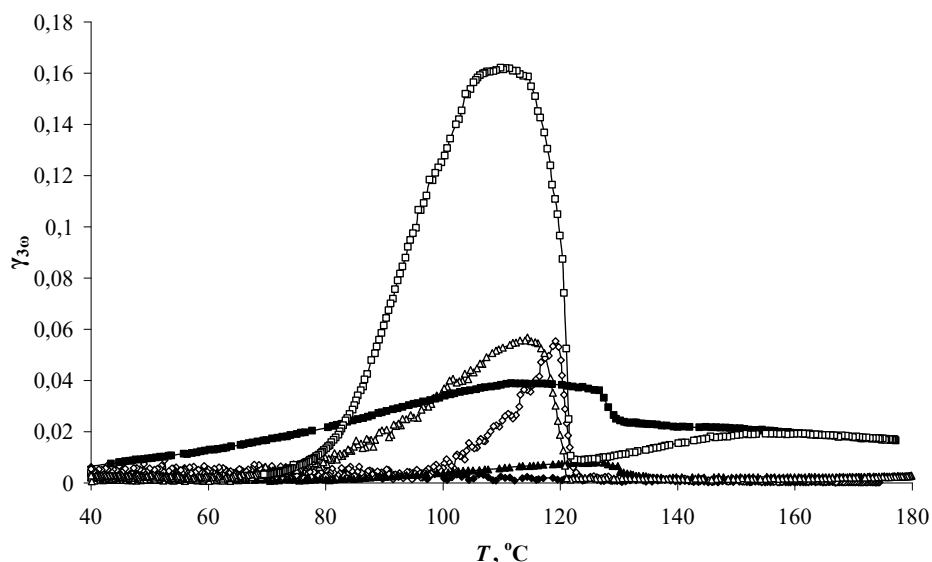


Рис. 2. Зависимости $\gamma_{30}(T)$: $(\text{KNO}_3)_{0,95}/(\text{TiO}_2)_{0,05}$ – ромбы, $(\text{KNO}_3)_{0,95}/(\text{ZrO}_2)_{0,05}$ – треугольники, $(\text{KNO}_3)_{0,95}/(\text{SiO}_2)_{0,05}$ – квадраты (сплошные маркеры – нагрев, пустые – охлаждение).

Для всех образцов сегнетоэлектрических композитов обнаружены температуры T_1 и T_2 , соответствующие возникновению и исчезновению полярной фазы в нитрате калия в композитах (таблица).

Температурные интервалы существования сегнетофазы композитов на основе нитрата калия

Состав композита	Температурный интервал существования сегнетофазы в градусах $T_1 - T_2$
KNO_3	24
$(\text{KNO}_3)_{0,95}/(\text{TiO}_2)_{0,05}$	27
$(\text{KNO}_3)_{0,95}/(\text{ZrO}_2)_{0,05}$	55
$(\text{KNO}_3)_{0,95}/(\text{SiO}_2)_{0,05}$	43

Из данных, представленных в таблице, следует, самое существенное расширение температурной области существования в нитрате калия наблюдается для композита $(\text{KNO}_3)_{0,95}/(\text{ZrO}_2)_{0,05}$. При этом

графики температурных зависимостей емкости и коэффициента третьей гармоники наибольшие значения максимумов этих величин наблюдаются для композита $(\text{KNO}_3)_{0,95}/(\text{SiO}_2)_{0,05}$.

1. Стукова, Е.В., Барышников, С.В. Стабилизация сегнетоэлектрической фазы в композитах $(\text{KNO}_3)_{1-x}-(\text{BaTiO}_3)_x$ // Перспективные материалы. – 2011. – № 2. – С. 28–33.
2. Барышников, С.В., Милинский, А.Ю., Стукова, Е.В., Зеева, А.А. Стабилизация сегнетоэлектрической фазы нитрата калия в композите $[\text{KNO}_3]_{1-x}/[\text{Ba}(\text{NO}_3)_2]_x$ // Изв. Вузов. Физика. – 2023. – Т. 66, № 12. – С. 22-29. DOI: 10.17223/00213411/66/12/3
3. Павлов, А.В., Стукова, Е.В., Барышников, С.В. Стабилизация полярного состояния KNO_3 в композитах $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{CeO}_2)_x$ / А.В. Павлов, Е.В. Стукова, С.В. Барышников // Неорганические материалы. – 2024. – Т. 60, № 7. – С. 610 – 615. – DOI: 10.31857/S0002337X24070118
4. Bridgman, P.W. Polymorphic changes under pressure of the univalent Nitrates // Proc. Am. Acad. Arts Sci. – 1916. – V. 51. – P. 579 – 625.
5. Aydinoll, M.K., Mantese, J.V., Alpay, S.P. A comparative ab initio study of the ferroelectric behaviour in KNO_3 and CaCO_3 // J. Phys.: Condens. Matter. – 2007. – V. 19. – Iss. 49. – P. 496210 – 496232.
6. Chen, A., Chernow, F. Nature of feroelectricity in KNO_3 // Phys. Rev. – 1967. – V. 154. – Iss. 2. – P. 493 – 505.

УДК 538.975 + 535-92 + 537.322

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИЙ И КРЕМНИЙ СОДЕРЖАЩИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЁНОК

А.В. Поляков¹, И.А. Рябов¹, Д.В. Фомин¹, К.Н. Галкин², Н.Г. Галкин², Д.А. Шеметов¹

¹Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

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

polyakov_a_1999@mail.ru

Полупроводниковые плёнки силицида магния – перспективный материал для микро- и нанoeлектроники. В работе приведены результаты сравнения термоэлектрических свойств плёнок Mg_2Si (112 нм) и Si (84 нм). Их формирование выполнялось с использованием метода послойной твердофазной эпитаксии. Образцы были получены в результате семикратного осаждения порций: Mg (4 нм) + Si (12 нм) – образец 1 и только Si (12 нм) – образец 2, при комнатной температуре. После каждого этапа роста этих слоёв выполнялся их двухступенчатый отжиг: низкотемпературный (250 °С) и высокотемпературный (650 °С). Из анализа спектров термо-ЭДС установлено, что в диапазоне температур от 175 до 440 К значение коэффициента Зеебека для первого и второго образцов монотонно возрастает от 664 до 777 мкВ/К и от 497 до 692 мкВ/К, соответственно. Это свидетельствует о p-типе проводимости сформированных образцов. Удельная проводимость обоих образцов экспоненциально уменьшается с увеличением температуры: от 51 до 8 (Ом·м)⁻¹ – образец 1 и от 64 до 9 (Ом·м)⁻¹ – образец 2. В результате расчёта фактора мощности, определено, что значение данного параметра для образца с плёнкой силицида магния составило от 22,4 до 4,9 мВт/(м·К²), кремния – от 15,8 до 4,3 мВт/(м·К²).

В настоящее время, одной из проблем развития микропроцессорной техники является большое тепловыделение вычислительных интегральных микросхем. С точки зрения меньшего тепловыделения кристаллов микропроцессов одним из перспективных материалов для их изготовления является силицид магния в тонкоплёночном виде [1 – 4], поскольку Mg_2Si имеет высокую термоэлектродвижущую

силу (термо-ЭДС) и термоэлектрическую мощность. Значения коэффициента Зеебека для силицида магния, по данным [4], при температурах 290 и 470 К составляют 478 и -605 мкВ/К соответственно. Фактор мощности, согласно [4] при этих же значениях температур составляет 25 и 270 мкВт/(м·К²) соответственно. Помимо этого, Mg₂Si является узкозонным полупроводником, ширина запрещённой зоны которого, по данным [5, 6], составляет 0,77 эВ. Целью работы является определение термоэлектрических свойств полупроводниковых плёнок, содержащих силицид магния и кремний.

Формирование образцов с плёнками, содержащими силицид магния и кремний, происходило с использованием метода твердофазной эпитаксии в камере Varian с базовым давлением 10⁻⁷ Па. Подложки и источник кремния были изготовлены из полупроводниковых пластин, обладающих дырочной проводимостью, легированных бором: КДБ Si (100) с удельным сопротивлением 4,5 Ом·см и КДБ Si (001) с удельным сопротивлением от 0,001 до 0,005 Ом·см соответственно. Источник магния брался чистотой 99,999 %. Перед проведением экспериментов, по росту полупроводниковых плёнок, выполняли стандартную процедуру очистки всех подложек и источников [7].

Плёнки на подложках Si (100) были получены при семикратном осаждении слоёв: Mg+Si (образец 1) и Si (образец 2), при комнатной температуре. Формирование образца, содержащего только кремний, осуществлялось для сравнения результатов исследований термоэлектрических свойств. Толщина каждого слоя Mg составляла 4 нм, Si – 12 нм. После каждого этапа роста слоёв осуществлялся их двухступенчатый отжиг: низкотемпературный (250 °С) и высокотемпературный (650 °С). Длительность первой ступени отжига составляла 5 минут, второй – 1 минуту. В результате были сформированы два образца с плёнками толщинами: h₁ = 112 нм и h₂ = 84 нм.

Для измерения термоэлектрических свойств (коэффициента Зеебека, удельной электропроводности и фактора термоэлектрической мощности) магний и кремний содержащих плёнок на их поверхность было проведено напыление алюминиевых контактов при комнатной температуре, после чего выполнялся отжиг при 450 градусов в течение 20 минут. Графики зависимости коэффициента Зеебека от температуры рассматриваемых образцов приведены на рис. 1.

Проанализировав графики (рис. 1), было установлено, что во всём температурном диапазоне коэффициент Зеебека образцов (подложка + плёнка (семь слоёв Si) и подложка + плёнка (семь слоёв Mg+Si)) положительный. Согласно [4], можно заключить, что сформированные образцы обладают дырочной проводимостью.

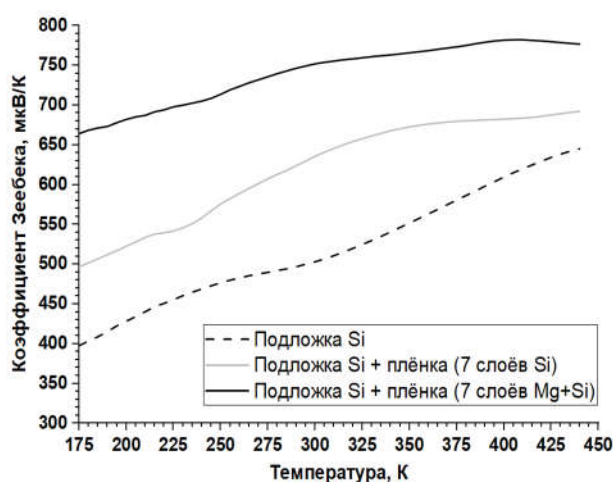


Рис.1. Графики зависимости коэффициента Зеебека от температуры образцов.

Анализ спектров термо-ЭДС показал, что в диапазоне температур от 175 до 440 К значение коэффициента Зеебека как у подложки, так и у образцов монотонно увеличивается. У подложки величина этого параметра изменяется от 398 до 645 мкВ/К. У образца с плёнкой из семи слоёв Si коэффициент термо-ЭДС возрастает от 497 до 692 мкВ/К. У образца с плёнкой из семи слоёв Mg+Si значение

коэффициента Зеебека увеличивается от 664 до 777 мкВ/К. Это свидетельствует о том, что по сравнению с подложкой, образцы имеют большее количество примесных элементов. У образца, включающего в себя подложку и плёнку (семь слоёв Si), примесью является бор. Наличие бора, как указывалось выше, обусловлено тем, что источник кремния содержал В. У образца с плёнкой из семи слоёв Mg+Si примесью, помимо бора, являются несвязанные атомы магния.

Графики зависимости удельной проводимости и фактора термоэлектрической мощности от температуры рассматриваемых образцов приведены на рис. 2.

Расчёт фактора мощности (PF) проводился по формуле (1):

$$PF = S^2 \cdot \sigma, \quad (1)$$

где S – коэффициент Зеебека; σ – удельная проводимость [8].

В результате расчёта фактора мощности, определено, что значение данного параметра для подложки составляет от 6,6 до 2,4 мкВт/(м·К²), для образца с плёнкой кремния – от 15,8 до 4,3 мкВт/(м·К²), для образца с плёнкой силицида магния – от 22,4 до 4,9 мкВт/(м·К²). Рост фактора термоэлектрической мощности с увеличением количества слоёв и температурах 175–350 °С обусловлен, как ростом суммарного количества примесных уровней (бора и непрореагировавшего магния), так и увеличение коэффициента Зеебека на границах зерен в плёнке между кремнием и силицидом магния.

Таким образом, по результатам исследования зависимости термоэлектрических свойств магний и кремний содержащих плёнок определено, что в интервале температур от 175 до 440 К значение коэффициента Зеебека у образца с Mg₂Si изменяется от 664 до 777 мкВ/К, а у образца с Si – от 497 до 692 мкВ/К. Это указывает на то, что образцы имеют проводимость р-типа. Удельная проводимость и фактор мощности в данном диапазоне температур составляют от 51 до 8 (Ом·м)⁻¹ и от 22,4 до 4,9 мкВт/(м·К²) – для первого образца, от 64 до 9 (Ом·м)⁻¹ и от 15,8 до 4,3 мкВт/(м·К²) – для второго образца. Постепенное снижение данных параметров с ростом температуры связано с тем, что приведённый температурный интервал соответствует области истощения примесных уровней. При этом первый образец имеет акцепторные (бор), а второй – как акцепторные (бор), так и донорные примеси (магний). Этим и объясняются большие значения фактора мощности для образца 1 и его снижение для образца 2.

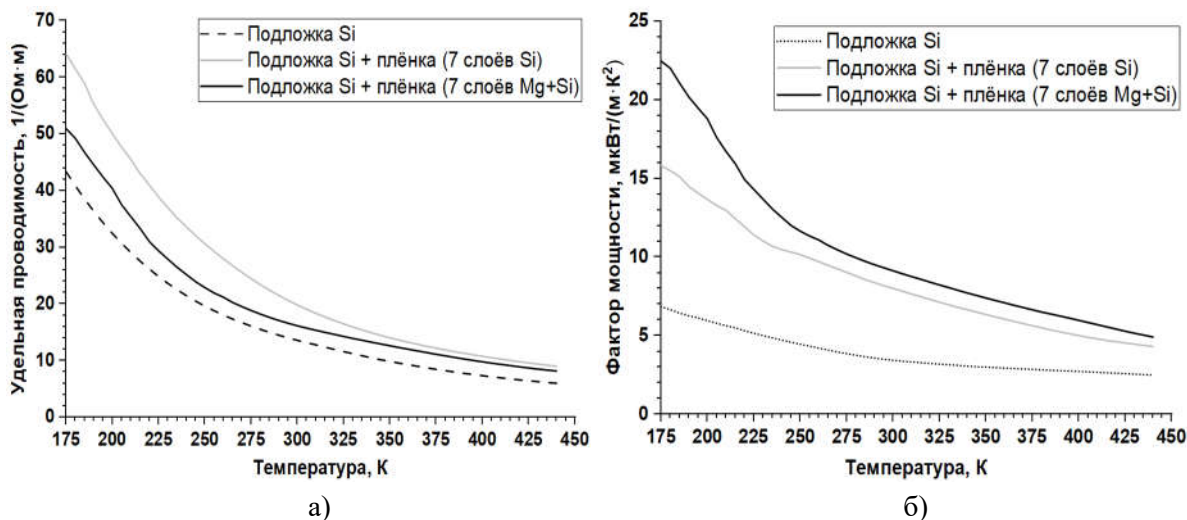


Рис. 2. Графики зависимости удельной проводимости (а) и фактора мощности (б) от температуры.

Следует отметить, что термоэлектрическая мощность сформированных образцов на один порядок ниже, по сравнению с данными, представленными в работе [4] (от 25 до 270 мкВт/(м·К²)). Это обусловлено тем, что удельное сопротивление кремниевой подложки значительно меньше (4,5 Ом·см) по отношению к подложке, указанной в [4] (1000 Ом·см). В связи с этим, требуется корректировка методики формирования плёнок силицида магния, а именно их рост осуществлять на высокоомных подложках.

1. Термоэлектрические свойства твердого раствора $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,3}\text{Sn}_{0,7}$ p-типа, полученного методом горячего прессования / Г.Н. Исаченко [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 3 (91). – С. 57-63.
2. Influence of sintering temperature on the structural of $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,3}\text{Sn}_{0,7}$ alloy prepared by powder metallurgy / S. D. Yudanto [et al.] // Acta Metallurgica Slovaca. – 2023. – Vol. 29. – № 4. – P. 210-213.
3. Large Scale Solid State Synthetic Technique for High Performance Thermoelectric Materials: Magnesium-Silicide-Stannide / D. C. Ramirez [et al.] // ACS Applied Energy Materials. – 2020. – V. 3. – № 3. – pp. 2130-2136.
4. Плёнка Mg_2Si на Si (111), полученная методом сверхбыстрого реактивного осаждения Mg: структура и термоэлектрические свойства / И.М. Чернев [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2023. – Т. 16. – № 3.1. – С.106-111.
5. Simulation Study on the Effect of Doping Concentrations on the Photodetection Properties of $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}$ Heterojunction Photodetector / Hong Yu [et al.] // Photonics. – 2021. – V.8. – № 11. – P. 509.
6. Technology CAD (TCAD) Simulations of $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}$ Heterojunction Photodetector Based on the Thickness Effect / Hong Yu [et al.] // Sensors. – 2021. – V.26. – № 16. – P. 5559.
7. Экспериментальные методы физики твердого тела / Д. В. Фомин. – М.: Берлин: Директ-Медиа, 2014. – 186 с.
8. Субботин, Е. Ю. Формирование и термоэлектрические свойства кремниевых гетероструктур со встроенными нанокристаллами антимонода галлия: специальность 01.04.10 "Физика полупроводников": диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Субботин Евгений Юрьевич, 2022. – 134 с.

УДК 539

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ МИКРОЧАСТИЦ СТРУКТУРЫ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$

М.В. Резник, В.В. Нешименко

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

В данной работе представлены результаты моделирования процесса теплового расширения микросферы структуры $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ в области температур от 93 до 453 К в программном пакете «COMSOL Multiphysics». Диаметр внутренней сферы Al_2O_3 составляет 1 мкм. Внешний слой сфер состоит из SiO_2 толщиной 0,05, 0,1 и 0,2 мкм. В результате моделирования было установлено, что основной вклад в тепловое расширение микросферы вносит внешний слой Al_2O_3 .

В настоящее время продолжается активное исследование космоса при помощи различных космических аппаратов. Это делает актуальной задачу по улучшению защиты космических аппаратов от вредных факторов космического излучения. Одним из основных способов решения данной задачи является разработка и применение новых защитных материалов и покрытий. Перспективных направлений космического материаловедения является разработка и применение покрытий класса солнечные отражатели на основании микро- и наночастиц. Перспективным материалом для таких микросфер является силикат алюминия [1 – 3].

В данной работе представлены результаты моделирования процесса теплового расширения

микросферы структуры $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ в области температур от 93 до 453 К в программном пакете «COMSOL Multiphysics».

Для моделирования использовался программный пакет «COMSOL Multiphysics». С помощью данной платформы можно анализировать как отдельные, так и взаимосвязанные физические процессы. Среда для разработки моделей позволяет пройти все этапы от построения геометрической модели, задания свойств материалов и описание физики задачи до решения и визуализации результатов моделирования [4].

Условия моделирование процесса теплового расширения микросферы структуры $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ в программном пакете «COMSOL Multiphysics»: размер внутренней сферы Al_2O_3 – 1 мкм, толщина внешнего слоя SiO_2 – 0,05, 0,1, 0,2 мкм, температурный интервал от 93 до 453 К, температурный шаг при моделировании 40 К.

На рис. 1 представлено изменение линейных размеров микросферы $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ с толщиной внешнего слоя 0,05 мкм по мере изменения температуры. Анализ теплового расширения показал, что по мере теплового расширения происходит медленное изменение линейных размеров микросферы. При низких температурах наблюдается постепенное сжатие сферы, тогда как при повышенных температурах происходит расширение размеров. создаёт затруднения в расчёте коэффициента линейного расширения для микросферы, а потому расчёты проводились между тремя основными точками: 93 К, 273 К и 453 К. Расчёты проводились по формуле 1:

$$\alpha_L = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T}, \quad (1)$$

где ΔL – изменение линейных размеров тела; ΔT – изменение температуры; L_0 – начальные линейные размеры тела.

При помощи данной формулы были рассчитаны следующие значения коэффициента α :

$$\alpha_{93-273} = (1050-1000)/(1050 \cdot \{273-93\}) = 2,646 \cdot 10^{-4} \text{ (K}^{-1}\text{)},$$

$$\alpha_{273-453} = (1060-1050)/(1050 \cdot \{453-273\}) = 0,529 \cdot 10^{-4} \text{ (K}^{-1}\text{)}.$$

Так же было определено, что давление в моделируемых микросферах увеличивается с возрастанием температуры. При 93 К давление составляет 0,8 МПа, тогда как при 453 К давление достигает уже порядка 8 МПа. Давление на поверхности внутренней сферы во всех случаях на два порядка ниже. И согласно исследованию, пять эти значения давления меньше необходимого для разрушения микросферы. Так же было установлено что микросферы с внешним слоем большей толщины аналогично ведут себя в процессе расширения.

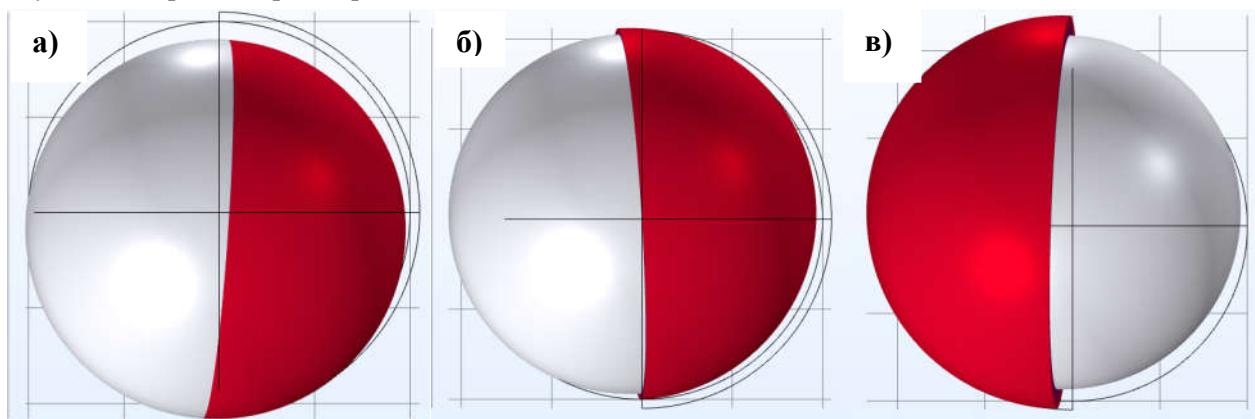


Рис. 1. Тепловое расширение микросферы $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ с толщиной внешнего слоя 0,05 мкм при 93 К (а), 273 К (б) и 453 К (в).

Для определения вклада элементов в расширение было проведено сравнение между тепловым расширением сфер с разной толщиной внешнего слоя. На рис. 2 представлены микросферы $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ с толщиной внешнего слоя 0,1 мкм (рис. 2а) и 0,2 мкм (рис. 2б) при температуре 453 К.

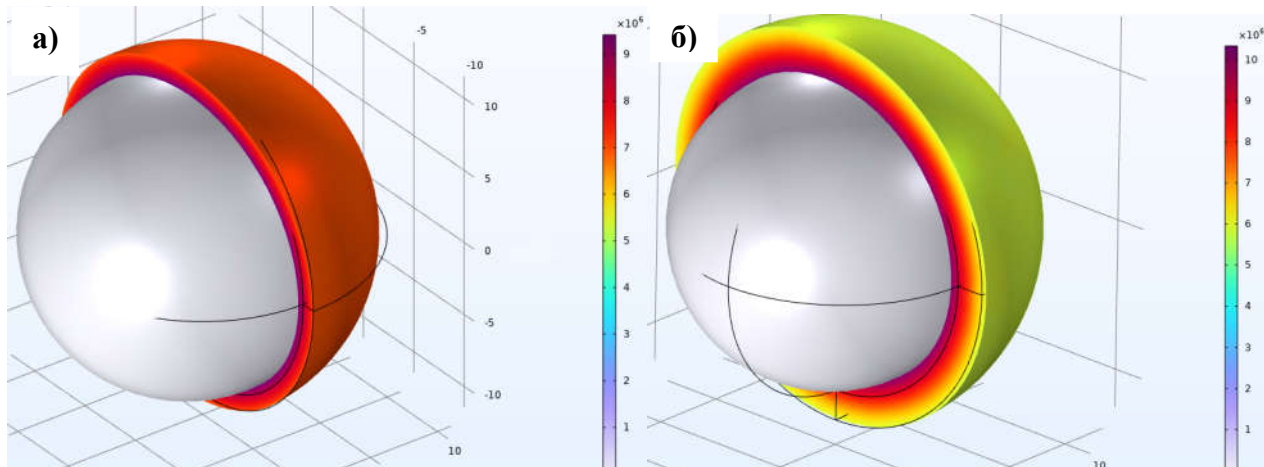


Рис. 2. Тепловое расширение микросферы $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ с толщиной внешнего слоя 0,1 мкм (а) и 0,2 мкм (б) при температуре 453 К.

Анализ результатов показал, что с увеличением размеров микросфер давление на поверхности уменьшается. При этом давление на границе с оксидом алюминия в слое оксида кремния с увеличением размеров увеличивается. В то же время давления на поверхности внутренней сферы остаётся на два порядка меньше давления во внешней сфере. На основании полученных результатов можно говорить о преобладающей роли оксида кремния в процессе теплового расширения.

Моделирование теплового расширения микросферы $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ позволило установить, что с увеличением температуры происходит тепловое расширения, основной вклад в которое вносит внешний слой оксида кремния. С увеличением толщины этого слоя увеличивается давление на границе оксида кремния с оксидом алюминия, а давление на поверхности сферы уменьшается. Давление на поверхности внутренней сферы во всех случаях оказывалось на два порядка меньше давления во внешнем слое.

-
1. Aryal S. Density functional calculations of the electronic structure and optical properties of aluminosilicate polymorphs (Al_2SiO_5) / S. Aryal, P. Rulis W. Y., Ching /American Mineralogist. – 2008. – Т. 93. – №. 1. – С. 114-123..
 2. Ohuchi F. S. Chemical bonding and electronic structures of the Al_2SiO_5 polymorphs, andalusite, sillimanite, and kyanite: X-ray photoelectron- and electron energy loss spectroscopy / F. S. Ohuchi [и др.] /American Mineralogist. – 2006. – Т. 91. – №. 5-6. – С. 740-746..
 3. Cano N. F. Ab initio study of the electronic and optical properties of sillimanite (Al_2SiO_5) crystal / N. F. Cano, S. Watanabe /Optical Materials. – 2011. – Т. 33. – №. 11. – С. 1813-1816..
 4. COMSOL Multiphysics Programming Reference Manual
 5. Prisco L, The Effect of Microstructure on Thermal Expansion Coefficients in Powder-Processed $\text{Al}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}/\text{L}$. Prisco [и др.] // Journal of Materials Science – 2013 – №48 – С. 2986-2996.

ПОЛУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, ВНЕДРЕННЫХ В КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ МАТРИЦУ

А.К. Стародубцева, Т.А. Мередилина

Благовещенский государственный педагогический университет (г. Благовещенск)

starodubtseva_an@mail.ru

В данной работе получены спектры флуоресценции углеродных нанотрубок, внедренных в кристаллические матрицы гексана, толуола и орто-ксилола. Показано, что свойства матрицы существенно влияют на спектральные характеристики. Выявлен наиболее приоритетный растворитель для получения линейчатых спектров углеродных нанотрубок.

Углеродные нанотрубки (УНТ) обладают уникальными физическими свойствами и имеют большой потенциал применения: производство и использование сверхпрочных волокон, изготовление полевых логических схем и чипов памяти, адсорбентов, нанокатализаторов, материалов оптоэлектроники, сенсорных систем и многое другое [1]. Существует множество методов измерения и исследования наноструктур. Информацию о морфологии кристалла могут дать рентгеновский структурный анализ, масс-спектрометрия, электронная спектроскопия, расстояние между колебательными уровнями энергии молекул и атомов можно определить применяя инфракрасную и рамановскую спектроскопию. Однако ни один из приведенных методов не позволяет оценить квантовые переходы электронов внутри атома. Информацию о колебательной структуре излучающих молекул можно получить по узким линиям спектра люминесценции замороженных растворов. В данной работе получены спектры люминесценции многослойных углеродных нанотрубок, внедренных в кристаллическую матрицу нескольких растворителей.

Углеродные многослойные нанотрубки представляют собой цилиндрические структуры, вложенные друг в друга, диаметры которых могут составлять от 3 до 40 нм, а длины достигать нескольких микрон, заканчиваются трубки как правило фуллеренными полусферами C_{240} . Каждый цилиндр это гигантская молекула, в которой атомы углерода sp^2 – гибридизированы, три электрона образуют прочные σ -связи, четвертый электрон входит в π -электронную подсистему молекулы. Исследуемые растворы нанотрубок имели концентрации 10^{-7} , 10^{-8} , 10^{-9} моль/л в н-гексане $CH_3(CH_2)_4CH_3$ и двух ароматических растворителях орто-ксилоле $C_6H_4(CH_3)_2$ и толуоле $C_6H_5(CH_3)$. Молекула н-гексана представляет собой линейную цепь шести атомов углерода, соединенных одинарными связями, орто-ксилол и толуол состоят из бензольного кольца, соединенного с двумя и одной метильными группами соответственно. Готовые растворы запаивались в трубки и замораживались в жидком азоте при температуре 77,3 К, возбуждение осуществлялось твердотельным лазером с длиной излучения 337 нм. Регистрация спектров флуоресценции производилась на спектрографе ИСП-51 с применением ПЗС линейки TCD1304DG. Для расшифровки спектров написана и использовалась программа №2017616306 «Модуль автоматизации спектрального анализа для спектрографа ИСП-51» [2].

Характеристики спектров флуоресценции УНТ в гексане, орто-ксилоле и толуоле представлены в табл. 1. Видно, что спектр представляет собой одну линию полушириной от $1,71\text{ см}^{-1}$ до $2,04\text{ см}^{-1}$ с максимумом в районе 480 нм. Интенсивность линии в каждом растворителе увеличивается с ростом концентрации растворенного вещества. В свою очередь ширина линии определяются множеством степеней свободы многоатомных молекул нанотрубок. К сужению линий приводит ограничение степеней свободы, для этого

желательно свести взаимодействие молекул исследуемого вещества с матрицей к минимуму. Этому способствует то, что, в условиях низкой концентрации, молекулы нанотрубок изолированы друг от друга, а растворители матрицы не способны образовывать водородных связей. При температуре жидкого азота матрица кристаллизуется, «вымораживая» многочисленные колебательные и вращательные состояния, переходы между электронными состояниями дают ультрафиолетовый или видимый спектры.

Таблица 1)

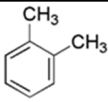
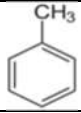
Характеристики спектра флуоресценции углеродных нанотрубок

Концентрация, моль/л	Длина волны, нм	Интенсивность, относ. ед.	Полуширина, см ⁻¹
Гексан			
10 ⁻⁷	479,72	1421	1,9
10 ⁻⁸	479,75	1092	1,88
10 ⁻⁹	479,71	1003	1,9
Орто-ксилол			
10 ⁻⁷	479,55	1082	1,71
10 ⁻⁸	479,57	1043	1,93
10 ⁻⁹	479,55	949	1,86
Толуол			
10 ⁻⁷	479,60	984	1,86
10 ⁻⁸	479,57	948	1,96
10 ⁻⁹	479,55	864	2,04

Эксперимент показал, что при концентрации 10⁻⁷ моль/л спектры во всех матрицах имеют максимальную интенсивность. При сравнении спектра УНТ в разных растворителях при концентрации 10⁻⁷ моль/л, заметно, что наиболее удобной матрицей для УНТ является гексан. Спектр в матрице гексана самый интенсивный, это можно объяснить геометрией молекулы гексана, молекула вытянута и способна принимать различные формы, поворачиваясь около простых σ-связей (таб. 2). В отличие от гексана орто-ксилол и толуол, обладая ароматической природой, могут взаимодействовать с π-электронной системой нанотрубок.

Таблица 2)

Характеристики растворителей

Свойство	Гексан (C ₆ H ₁₄)	Орто-ксилол (C ₈ H ₁₀)	Толуол (C ₇ H ₈)
Молекулярная масса, г/моль	86,18	106,17	92,14
Плотность, г/см ³	0,660	0,880	0,867
Температура кристаллизации, °C	-95	-25	-95
Диэлектрическая проницаемость	1,89	2,56	2,38
Полярность (индекс полярности)	0,0	2,5	2,4
Вязкость при 20°C, мПа·с	0,326	0,81	0,59
Растворимость фуллерена C ₆₀ , мг/мл	0,0028	6,0	2,8
Длина молекулы, нм	0,72-0,73	0,9	0,9
Структурная формула молекулы			

При изучении объемных молекул УНТ важно учитывать свойства растворителей, которые могут оказывать влияние на спектральные характеристики. Растворители с низкой полярностью, такие как гексан, минимально взаимодействуют с молекулами нанотрубок, что приводит к сужению спектральных линий.

1. Кирчанов В. С. Наноматериалы и нанотехнологии: учебное пособие / В. С. Кирчанов. – Пермь. Изд-во Перм.НИПУ. – 2016. – 193 с.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017616306 «Модуль автоматизации спектрального анализа для спектрографа ИСП-51». Автор: Антонов А.А. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 07 мая 2019 г.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИОДИДА ДИИЗОПРОПИЛАММОНΙΑ, ВНЕДРЕННОГО В КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТРИЦЫ ТИТАНАТА БАРИЯ

Е.В. Стукова

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

lenast@bk.ru

Приводятся результаты диэлектрических исследований композитных образцов из керамики титаната бария с внедренным иодидом диизопропиламмония. Показано, что в керамических матрицах титаната бария с внедренным DIPAI появление сегнетоэлектрического состояния зависит от пористости матрицы, причем в случае ее появления сегнетоэлектрическая фаза регистрируется как при нагреве, так и при охлаждении. Температурный интервал сегнетофазы расширяется почти на 20 °С.

Исследование сегнетоэлектриков, способных изменять собственную спонтанную поляризацию под действием внешнего электрического поля, ведется на протяжении более ста лет. За это время открыто множество материалов, обладающих данными свойствами, при этом органические соединения занимают среди них особое положение ввиду перспективности их практического применения.

При комнатной температуре иодид диизопропиламмония DIPAI принадлежит к орторомбической неполярной хиральной пространственной группе $P2_12_12_1$. Однако при нагревании в зависимости от растворителя, в котором происходила перекристаллизация DIPAI, возможны два сценария. Увеличение температуры до 96 °С приводит к возникновению полярной моноклинной фазы с симметрией $P2_1$, стабильной до 142 °С. Выше последней сегнетоэлектрик переходит в неполярную моноклинную фазу $P2_1/m$. В процессе охлаждения при 134 °С наблюдается фазовый переход, при котором DIPAI превращается из $P2_1/m$ в полярную моноклинную фазу с симметрией $P2_1$ и остается в этом состоянии вплоть до комнатной температуры [1]. В исследовании [1] были выращены кристаллы DIPAI, спонтанная поляризация которых равна ~ 33 мКл·см⁻². Однако, авторы [2] при исследовании синтезированных ими кристаллов DIPAI не выявили в нем полярного состояния. В работе [3] было показано, что для перевода DIPAI в сегнетоэлектрическое состояние его необходимо нагреть выше температуры 150 °С.

Для проведения диэлектрических исследований были получены композиты на основе DIPAI и BaTiO₃. Из поликристаллов BaTiO₃ формировались керамические матрицы, спеченные с использованием разных связующих: углеродных нанотрубок (УНТ), поливинилового спирта и полистирола. Разные связующие использовались для получения керамик с разной степенью пористости. В сформированные матрицы из насыщенного раствора внедрялся DIPAI.

Исследование диэлектрических свойств композитов на основе иодида диизопропиламмония и керамики титаната бария методами линейной и нелинейной диэлектрической спектроскопии проводилось на частоте 100 кГц в интервале температур от 50 °С до 130 °С..

На рис. 1 представлены температурные зависимости диэлектрических свойств для двух образцов (BaTiO₃)/DIPAI. На представленных зависимостях выше 120 °С наблюдаются размытые максимумы, связанные с фазовым переходом в титанате бария. Максимумы, соответствующие фазовым переходам в DIPAI не регистрируются. Значения диэлектрической проницаемости при этом в исследуемых образцах составляют порядка нескольких тысяч. Исследования данных образцов методом нелинейной

диэлектрической спектроскопии также показали отсутствие сегнетоэлектрического состояния в DIPAI, внедренный в эти керамики.

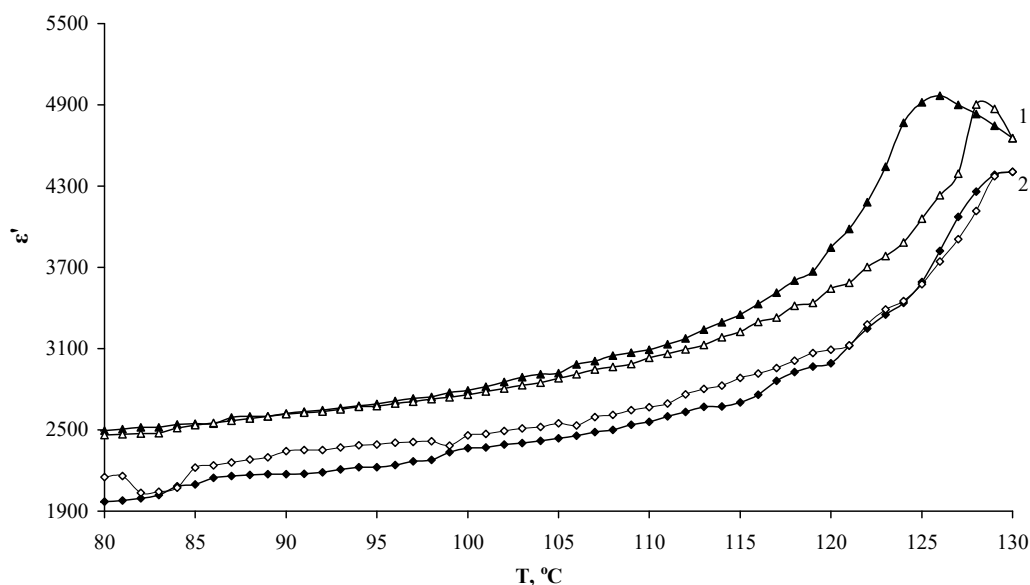
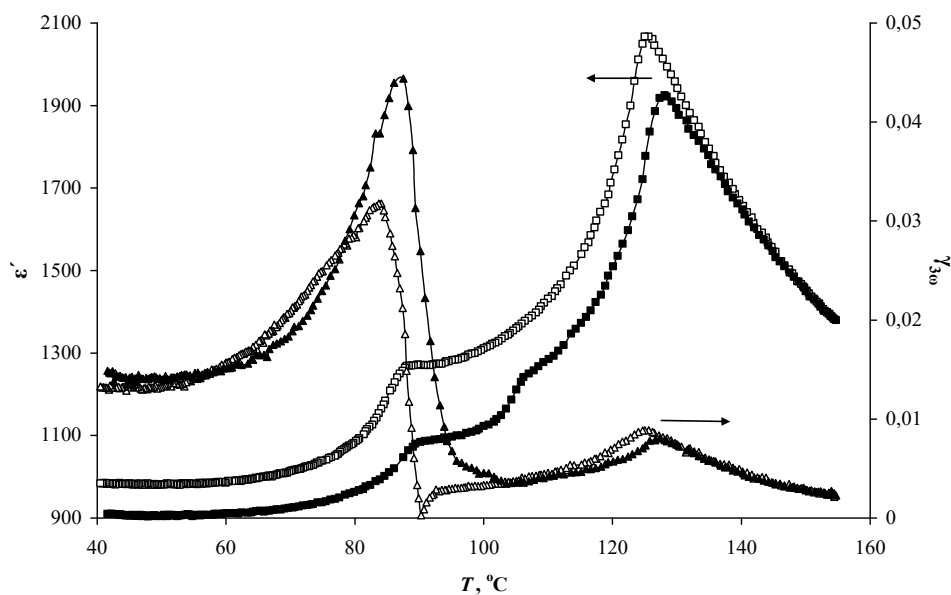


Рис. 1. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости для образцов DIPAI, внедренного в керамические матрицы BaTiO_3 , полученные с использованием связующих: 1 – полистирол; 2 – поливинил.

На следующем этапе исследовался композит $(\text{BaTiO}_3)/(\text{DIPAI})$, в котором для получения керамической матрицы при спекании в качестве связующего использовались углеродные нанотрубки.

Для данных образцов были проведены измерения комплексной диэлектрической проницаемости при помощи цифрового измерителя иммитанса E7-25, работающего в частотном диапазоне от 20 до 106 Гц с рабочим напряжением 0,7 В. Измерение температуры проводилось с точностью 0,1 К при помощи электронного термометра ТС-6621, оснащенного хромель-алюмелевой термопарой. Результаты ещё одного измерения последнего образца на более чувствительном устройстве и на частоте 10 кГц, представлены в виде графиков на рис. 2.



светлые маркеры – нагрев; темные – охлаждение

Рис. 2. Зависимость значений диэлектрической проницаемости от температуры для образца $\text{DIPAI}/\text{BaTiO}_3$ (УНТ), измеренный при 10 кГц.

Действительно, в данном случае при температуре около 90 ° как при нагреве, так и при охлаждении наблюдаются максимумы диэлектрической проницаемости и минимумы коэффициента третьей гармоники, соответствующий сегнетоэлектрическому фазовому переходу DIPAI. Отсюда следует, что сегнетоэлектрическое состояние наблюдается в данных образцах и при нагреве, и при охлаждении, причем температурный интервал этой фазы расширяется почти на 20 градусов. В других керамических образцах сегнетоэлектрическое состояние в DIPAI не формируется. Это может быть связано с более высокой пористостью образцов керамики, спеченной с использованием углеродных нанотрубок.

1. Ravi K.S., Diptikanta S., Siva P., Hariharan N., Handady L.B., Tayur N.G.R., Suja E. Observation of ferroelectric phase and large spontaneous electric polarization in organic salt of diisopropylammonium iodide // Jour. of App. Phys. 2017. V. 121. Iss. 11. P. 114101–114105.

2. Piecha-Bisiorek A., Gaḡor A., Isakov D., Zieliński P., Gaḡazka M., Jakuba R. Phase sequence in diisopropylammonium iodide: avoided ferroelectricity by the appearance of a reconstructed phase // Inorg. Chem. Front. 2017. – V. 4. – Iss. 3. – P. 553–558.

3 Milinskiy A.Yu, Baryshnikov S.V., Egorova I.V, Nguyen H.T. Dielectric properties of ferroelectric diisopropylammonium iodide // Phase Transitions. – 2019. – V. 92. – Iss. 4. – P. 406-410.

УДК 538.915

ДИНАМИКА И КИНЕТИКА РЕЛАКСОРА МАГНОНИОБАТА СВИНЦА

А.В. Филимонов¹, С.Б. Вахрушев², Е.Ю. Королева²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург)

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург)

filimonov@rphf.spbstu.ru

Релаксоры представляют собой одну из наиболее интересных групп неупорядоченных соединений. В рамках настоящего исследования проведен анализ структурной релаксации в релаксоре магнониобата свинца $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ (PMN). Рентгеновская фотонная корреляционная спектроскопия (XPCS) применена в качестве основного метода для изучения медленных динамических процессов. На основании экспериментальных данных была прослежена температурная эволюция как одновременных, так и двухвременных корреляционных функций. Серии двумерных паттернов рассеяния были проанализированы для извлечения корреляционной функции интенсивность-время, которая описывается экспоненциально затухающим выражением Кольрауша-Вильямса-Ваттса. Также с помощью метода ультраширокополосной диэлектрической спектроскопии прослежена кинетика диэлектрического отклика магнониобата свинца в процессе старения в области размытого фазового перехода. Обнаружено, что в процессе старения наблюдается ужесточение и сужение спектров диэлектрических потерь и уменьшение диэлектрической силы со временем. Предложено объяснение, основанное на концепции создания вырожденных полярных нано-областей, охватывающих несколько химически упорядоченных областей.

Релаксоры – это, как правило, перовскитоподобные соединения, отличительной особенностью которых является тот факт, что вместо четкого пика на температурной зависимости диэлектрической проницаемости, связанного с возникновением фазы с новой симметрией, например, переход из кубической в тетрагональную, наблюдается широкий максимум, положение которого зависит от измерительной частоты (рис. 1).

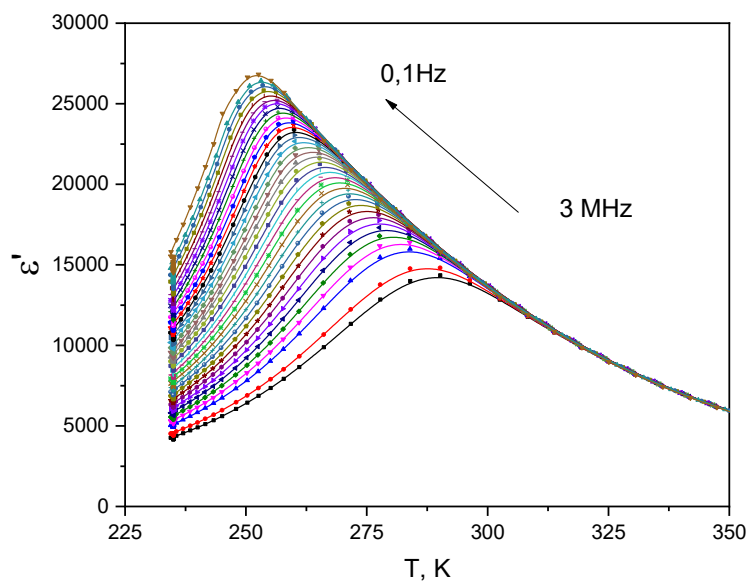


Рис.1. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости монокристалла PMN для различных измерительных частот.

Старение материала определяется как необратимое изменение отклика (диэлектрического, упругого) под воздействием временного фактора. Старение в релаксорах отличается от старения в обычных сегнетоэлектриках. Наиболее важным отличием является зависимость старения диэлектрических потерь от частоты. Скорость старения зависит от многих переменных, включая микроструктуру, содержание легирующих примесей, точечные дефекты и т. д. Мы будем рассматривать эти причины как внешние. С другой стороны, в стеклоподобном состоянии должно существовать внутреннее старение, связанное с иерархической структурой энергетического ландшафта. Ранее старение релаксоров исследовалось по большей части при фиксированных частотах или в узком диапазоне частот, не охватывающем весь спектр времен релаксации. Мы исследовали временную эволюцию диэлектрических спектров классического релаксора магнониобата свинца (PMN) как ниже, так и выше температуры фризинга. Вместо измерения диэлектрического старения на фиксированных частотах по одной, мы непосредственно следили за временной эволюцией диэлектрических спектров при каждой температуре. Чтобы исследовать старение спектров, необходимо было предварительно проанализировать сами спектры, выделить релаксационные вклады и определить их физическую природу.

Мы охлаждаем кристалл до определённой температуры и выдерживаем его (рис. 2). Как видно, при выдержке кристалла происходит спад величины мнимой части диэлектрической проницаемости. После этого кристалл снова охлаждают, происходит реювенация (возвращение к исходной кривой), выдерживают, и таким образом шаг за шагом отслеживается явление, которое называется старением.

Ниже температуры фризинга подтверждается существование ранее описанного масштабирования времени ожидания–частоты. Выше T_f старение наблюдается только в ограниченном интервале частот ниже максимума спектра диэлектрических потерь. В интервале от 250 до 280 K при анализе на разностной кривой (если мы вычитаем диэлектрические потери до и диэлектрические потери с выдержкой более 10000 с), видно, что образуется прогиб, минимум (рис. 3). Мы проанализировали изменение спектров со временем. Для описания релаксационного вклада использовалась функция Гавриляка-Негами, которая позволяет описывать спектры, несимметрично уширенные по сравнению с Дебаевским (1):

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \Delta\varepsilon / (1 + (i\omega\tau)^\alpha)^\beta, \quad (1)$$

где α – характеризует ширину распределения времен релаксации; β – параметр формы.

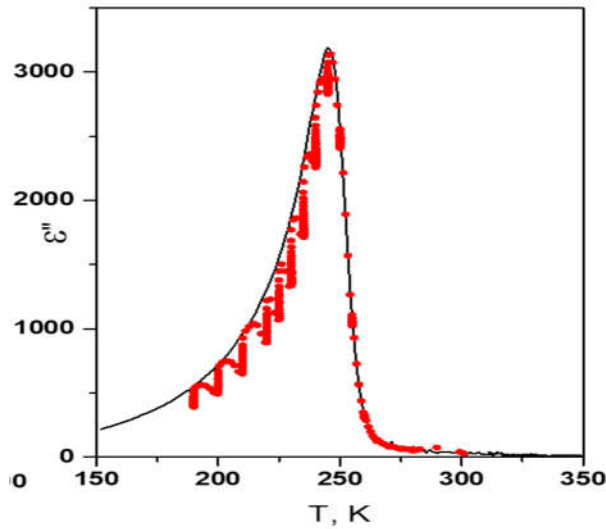


Рис. 2. Температурная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости PMN (черная кривая – охлаждение с постоянной скоростью, красные символы – охлаждение до заданной температуры, выдержка на этой температуре, охлаждение до следующей температуры).

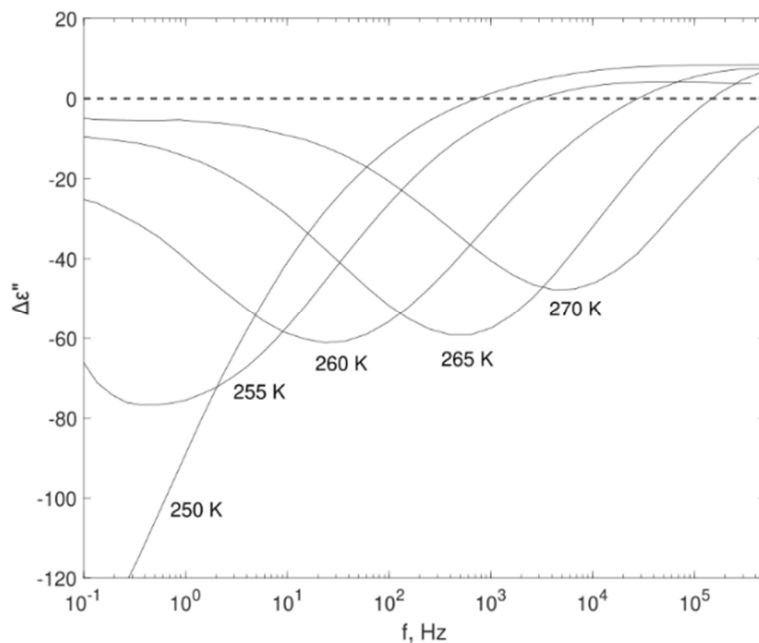


Рис. 3. Частотная зависимость $\varepsilon''(t_{\max}) - \varepsilon''(t=0)$ для различных температур.

В результате обработки были получены временные зависимости параметров релаксационного процесса. Обнаружено, что в процессе старения наблюдается ужесточение и сужение спектров диэлектрических потерь и уменьшение диэлектрической силы со временем. Нами предложено объяснение, основанное на концепции создания вырожденных полярных нанобластей, охватывающих несколько химически упорядоченных областей (COR) (мульти PNR – MPNR). Эти MPNR большие по сравнению с PNR, расположенными в одиночных COR, и некоторые из них могут замораживаться, что приводит к описанным изменениям спектров [1].

Теперь рассмотрим вариант, когда используем когерентное рентгеновское излучение. Эксперимент был поставлен на синхротроне SPring-8. При таких экспериментах можем посчитать простран-

ственную корреляционную функцию (рис. 4) для случая зеркального (Береговского) рассеяния, проходящего точно через Брегговскую точку, и для случая несколько в стороне от Брегговской точки (диффузное рассеяние).

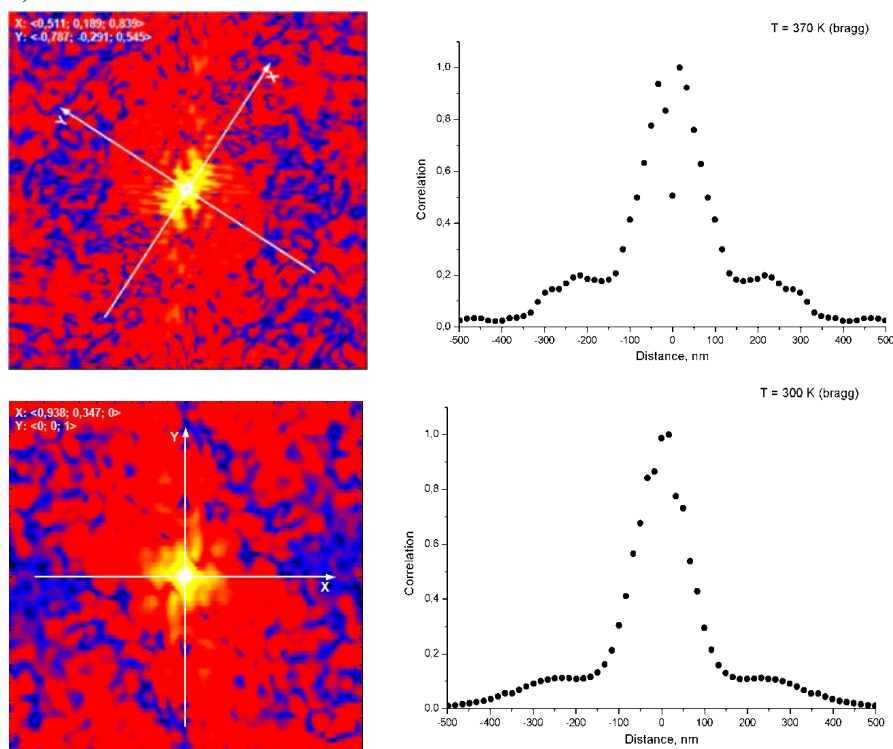


Рис.4. Картины рассеяния СИ и пространственная корреляционная функция для различных температур, полученные для образцов PMN ($T=370$ К (а) и $N=300$ К (б)).

Проведенное моделирование этого процесса показало следующее [2]. В первый момент имеются некие зародыши полярных нанодоменов, их форма связана с распределением случайных полей в системе. Дальше эти зародыши растут, и возникает подсистема с уже более далеким порядком, но неоднородная. Формируется какое-то фрактальное состояние, и возникают уже не нано-, а микродомены.

Для детального изучения этого процесса было проведено исследование корреляционной динамики с использованием метода XPCS. Эксперимент проводился на линии ESRF, использовалось 8,1 кэВ излучение. При анализе экспериментальных данных вместо одновременной функции использовалось фиксированное $\Delta\theta$ ($0,25^\circ$) и контролировалось, как картина рассеяния изменится во времени (рис.5).

Если имеется нормальная корреляция, т.е. корреляционная функция не зависит от того, с какой точки мы производим усреднение, то получается одна сплошная линия определённой ширины, которая идет из одного угла в другой. В нашем случае получается широкий «павлиний хвост», который постепенно сужается. В зависимости от того, какое T_0 мы возьмем, получаются разные корреляционные функции. При дальнейшем охлаждении до 200 К, происходит переход от нанодоменного состояния к микродоменному. Возникающий крест характеризует наличие фазового перехода и структура становится совершенно другой. При дальнейшем охлаждении возникает новая структура, она сужается все больше. Это уже практически дебаевская корреляционная функция.

Диэлектрическая релаксация в классическом релаксоре PMN связана с релаксационной структурной динамикой.

При охлаждении происходит последовательный переход от набора слабо взаимодействующих полярных нанодоменов к стеклоподобному, а затем к нанодоменному состоянию.

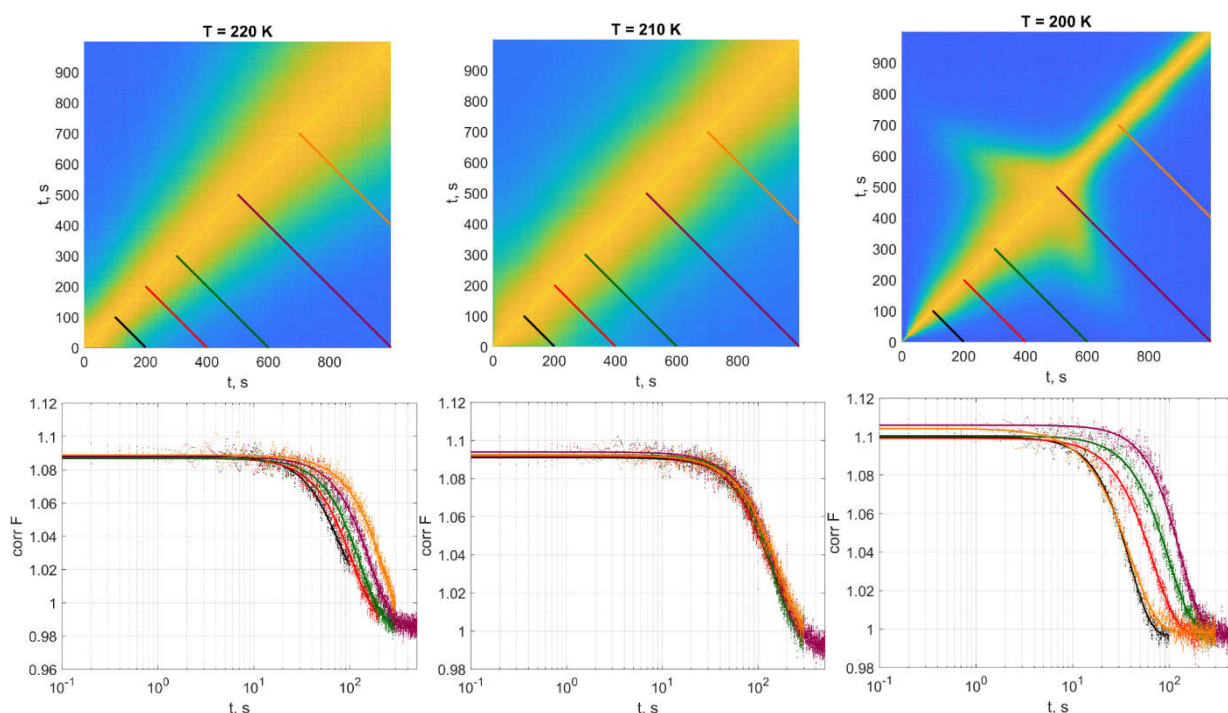


Рис.5. Двухвременная пространственная корреляционная функция и ее температурная динамика.

При приближении к температуре максимума диэлектрической проницаемости явно проявляются процессы усталости. XPCS - картина при этом перестает описываться одновременной корреляционной функцией.

Метод XPCS подтверждает наличие перехода в нанодоменное состояние.

1. Vakhrushev, S.; Koroleva, E.; Molokov, A.; Vakulenko, A.; Filimonov, A.; Rudskoy, A. $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ dielectric aging in the freezing temperature region // J. Phys.: Condens. Matter, v.36, 10, 2023, Art No: 105401 doi: 10.1088/1361-648X/ad0f42

2. Filimonov A.V., Vakhrushev S.B., Vakulenko A.F. XPCS study of relaxors aging // III International Conference «Synchrotron Radiation Techniques for Catalysts and Functional Materials», Abstracts (November 11-14, 2024, Novosibirsk, Russia) Novosibirsk: Boreskov institute of Catalysis SB RAS, 2024, P.28

УДК 537.226.4

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В НАНОКОМПОЗИТАХ RbNO_3/PG

И.А. Чернечкин^{1,2}, А.Ю. Милинский¹, С.В. Барышников¹

¹ Благовещенский государственный педагогический университет (г. Благовещенск)

² Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

cer_nyb@mail.ru

Цель исследования – выяснение структуры, тепловых и диэлектрических свойств нанокompозита нитрат рубидия-пористое стекло (RbNO_3/PG). Размер пор PG составлял 15,3 нм. Исследования проводились следующими методами: рентгеновская дифракция, дифференциальный термический анализ и диэлектрические измерения. Обнаружено снижение температуры фазового перехода из тригональной фазы в кубическую для внедрённого нитрата рубидия с 439 К до 422 К.

Одним из приоритетных направлений в физике конденсированных сред, имеющим высокую практическую значимость, является физика гетерогенных материалов и систем [1, 2]. Особый интерес представляют композитные материалы, например, сегнетоэлектрические композиты, состоящие обычно из сегнетоэлектрической матрицы с металлическими, полимерными или углеродными включениями. Такая структура позволяет задавать некоторые параметры: диэлектрическую проницаемость, коэрцитивное поле, температуру фазового перехода и пьезоэлектрическую активность.

Некоторые представители семейства нитратов, такие как нитрат калия и нитрат цезия, в определённых температурных интервалах проявляют сегнетоэлектрические свойства. Исследованию свойств этих веществ в составе композитов посвящено немалое количество работ [3 – 5]. Нитрат рубидия (RbNO_3) известен проявлением пьезоэлектрических свойств [6]. RbNO_3 от комнатной температуры до точки плавления (587 К) имеет четыре кристаллические фазы. При комнатной температуре RbNO_3 пребывает в тригональной симметрии (фаза IV), которая обладает пьезоэлектрической поляризацией с образованием 180-градусных доменов [6]. Эта фаза стабильна до 437 К, а затем переходит в кубическую структуру (фаза III) [7]. Между 492 К и 558 К нитрат рубидия существует в ромбоэдрической модификации (фаза II) [8]. Последующее нагревание выше 558 К сопровождается ещё одним фазовым переходом, при котором RbNO_3 вновь представляет кубическую структуру (фаза I). Эта фаза стабильна вплоть до температуры плавления.

Использование боросиликатных пористых стекол (PG) в качестве нанопористой матрицы для создания функциональных нанокомпозитов представляет особый интерес [9, 10]. Этому есть несколько причин. Во-первых, структурные, диэлектрические и магнитные свойства нанокомпозитов на основе стекла тесно связаны с характеристиками исходных стёкол. Во-вторых, заполнить поры боросиликатного стекла можно как простыми соединениями, так и химически сложными материалами. В-третьих, размер пор стёкол варьируется в широком диапазоне и зависит от метода их изготовления.

В данной статье представлены исследования нанокомпозитов на основе RbNO_3 и пористых боросиликатных стёкол со средним диаметром пор 15,3 нм. Внедрение RbNO_3 в пористое стекло осуществлялось из расплава под давлением $2 \cdot 10^5$ Па. Степень заполнения определялась гравиметрическим методом по изменению массы образца с использованием высокоточных аналитических весов BM-252 и составила 72 %. Результаты исследований нанокомпозита сравнивались с результатами аналогичных исследований RbNO_3 . Для этого из порошка нитрата рубидия под давлением 8000 кг/см² были получены таблетки диаметром 10 мм и толщиной 1,5 мм.

Для фиксации зависимости сигнала дифференциального термического анализа (ДТА) нанокомпозита CsNO_3/UNT от температуры использовался дериватограф Linseis STA PT 1600. Наблюдения проводились в режиме «нагрев – охлаждение» со скоростью 2 К/мин от комнатной температуры до 450 К. Рентгенофазовый анализ композитных образцов при нагревании и последующем охлаждении проводили на приборе Rigaku Ultima IV при 300, 373, 413, 433 и 438 К. Диэлектрические свойства образцов исследовались от 300 до 450 К с помощью цифрового измерителя импеданса E7-25 со скоростью нагрева 1 К/мин. Электрический контакт устанавливали с помощью индиево-галлиевой пасты, нанесённой на поверхность образцов. Контроль температуры осуществляли с помощью электронного термометра TC-6621.

На рис. 1 представлены температурные зависимости диэлектрической проницаемости $\epsilon'(T)$ для RbNO_3 и RbNO_3/PG . Фазовый переход в объёмном RbNO_3 наблюдался при 439 К в ходе нагрева и при 436 К в ходе охлаждения. Для RbNO_3/PG выраженных аномалий на $\epsilon'(T)$ не обнаружено. Однако, слабые аномалии при нагревании фиксировались при 422 К и при охлаждении – около 393 К, что, вероятно, связано с фазовыми переходами. Отсутствие резких пиков на графике, полученном для наноком-

позита, указывает на плавное изменение диэлектрических свойств. Вероятно, этот факт связан с неоднородностью наноструктурированной среды.

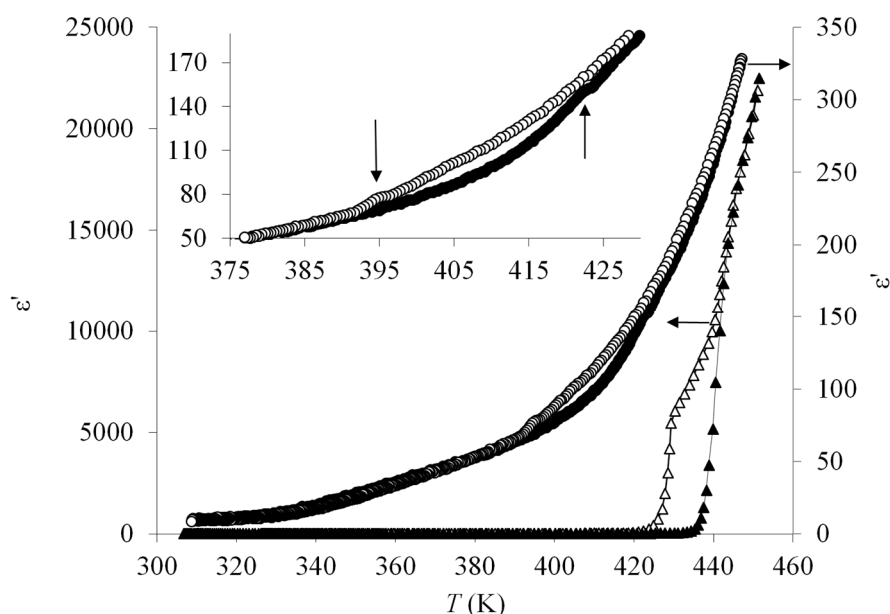


Рис. 1. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ' для RbNO_3 (левая ось) и RbNO_3 в пористом стекле (правая ось). На вставке показана зависимость $\epsilon'(T)$ в диапазоне температур 375 – 430 К для пористого стекла, заполненного RbNO_3 .

На рис. 2 представлены результаты дифференциального термического анализа для объёмного и нанокомпозитного нитрата рубидия. Фазовый переход RbNO_3 надёжно зарегистрирован данным методом при 437 К в ходе нагрева и при 423 К в ходе охлаждения. Для нанокомпозита выявлено снижение температуры фазового перехода. Так, в ходе нагрева RbNO_3/PG фазовый переход произошёл при 422 К, а в ходе охлаждения – при 391 К.

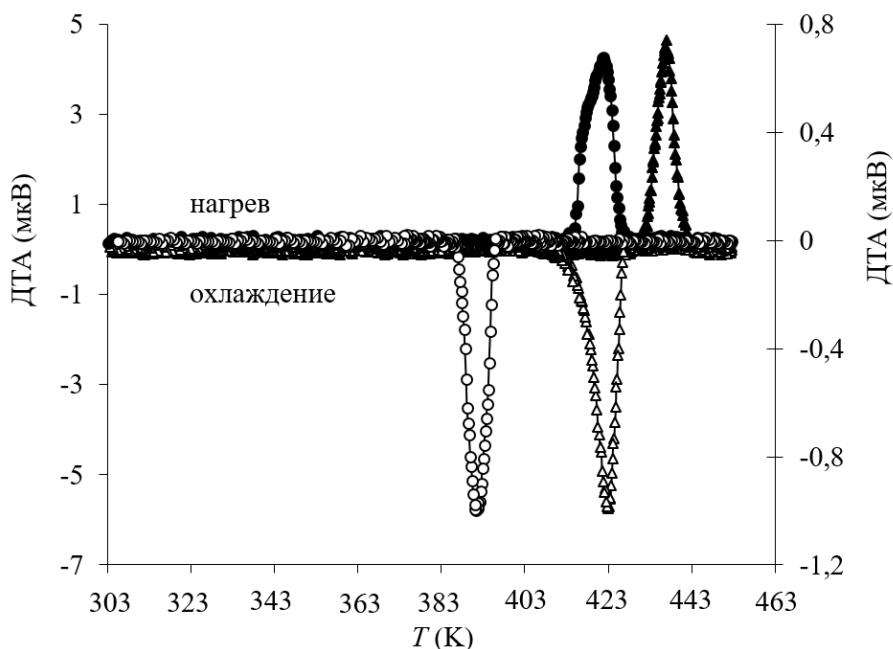


Рис. 2. Температурные зависимости сигнала ДТА, полученные для объёмного нитрата рубидия (треугольники, левая ось) и нанокомпозита нитрат рубидия-пористое стекло (круги, правая ось).

Аналогичные результаты были получены при исследовании нанокомпозита методом рентгеновской дифракции (рис. 3). Так, в диапазоне температур 413–433 К обнаружен сдвиг в расположении

пиков с изменением их формы (рис. 4), что свидетельствует о наличии фазового перехода RbNO_3 в этой области температур.

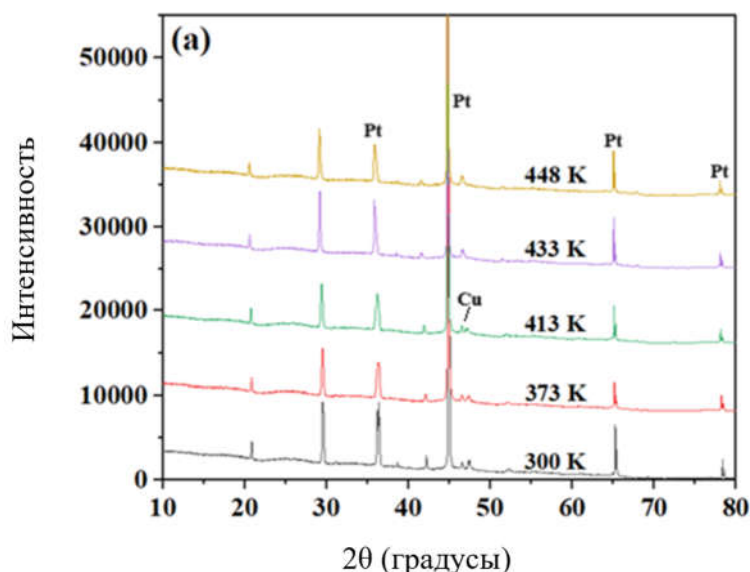


Рис. 3. Дифрактограмма, полученная для RbNO_3/PG при разных температурах.

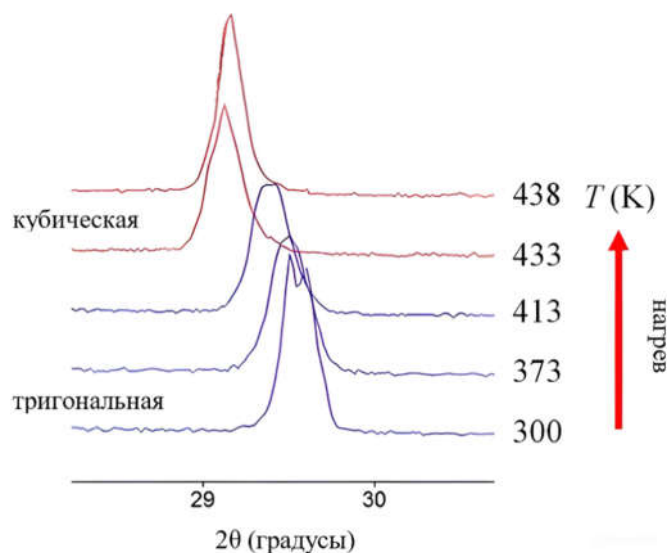


Рис. 4. Фрагмент дифрактограммы, полученной для RbNO_3/PG в температурном интервале 413-433 К.

Таким образом, для нитрата рубидия, внедрённого в пористое стекло, в сравнении с объёмным RbNO_3 выявлено значительное понижение температуры фазового перехода, а именно с 439 К до 422 К.

1. Nechaev V. N. On Inhomogeneous Polarized States near the Phase Transition Point in a Thin Ferroelectric Film / V.N. Nechaev, A.V. Shuba // *Physics of the Solid State*. – 2018. – V. 60. – № 7. – P. 1332-1337.

2. Chen, W. Polar-Toroidal Phase Transformation in Inhomogeneous Nanoscale Ferroelectric Systems: A Novel Strategy for the Design of Energy Conversion Nanodevices / W. Chen, S. Yuan, Y. Ji, G. Jiang, J. Shao, Y. Zheng // *MRS Advances*. – 2017. – V. 2. – № 56. – P. 3427-3432.

3. Стукова, Е. В. Изменение температурного интервала существования сегнетоэлектрической фазы в композитах на основе нитрата калия / Е. В. Стукова, А. Д. Лукьянченко // *Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки*. – 2014. – № 65. – С. 37-44.

4. Атаев, М. Б. Исследование фазового состава и структуры нанокомпозитов $(1-x)\text{KNO}_3+x\text{Al}_2\text{O}_3$ методом рентгеновской дифракции / М. Б. Атаев, М. М. Гафуров, Р. М. Эмиров, К.Ш. Рабаданов, А.М. Амиров // *Физика твердого тела*. – 2016. – Т. 58, № 12. – С. 2336-2339.

5. Павлов, А. В. Диэлектрические свойства сегнетоэлектрического композита на основе бромид диизопропиламмония и нитрата цезия / А. В. Павлов, Е. В. Стукова // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование : Материалы XX региональной научной конференции, Хабаровск, 03–07 октября 2022 года / Под редакцией А.И. Мазура. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2022. – С. 61-63.
6. Bury, P. C. Pyroelectric Properties of Rubidium, Cesium, and Thallium Nitrates / P.C. Bury, A.C. McLaren // Phys. Status Solidi (b). – 1969. – V. 31. – Iss. 2. – P. 799-806
7. Salhotra, P.P. Polymorphism of Rubidium Nitrate / P.P. Salhotra, E.C. Subbarao, P. Venkateswarlu // Physica Status Solidi (b). – 1968. – V. 29. – Iss. 2. – P. 859–864.
8. Fujimoto, S. Dielectric Properties of Rubidium Nitrate under Hydrostatic Pressure / S. Fujimoto, N. Yasuda, H. Shimizu, S. Tsuboi, K. Kawabe, Y. Takagi, M. Midorikawa // Journal of the Physical Society of Japan. – 1977. – V. 42. – Iss. 3. – P. 911–915.
9. Милинский, А. Ю. Диэлектрические и тепловые свойства нанокompозита нитрат цезия - пористое стекло / А. Ю. Милинский, С. В. Барышников, И. А. Чернечкин // Известия вузов. Физика. – 2022. – Т. 65, № 9(778). – С. 15-19.
10. Милинский, А. Ю. Диэлектрические свойства хлорида диизопропиламмония, внедренного в пористое стекло / А. Ю. Милинский, С. В. Барышников, И. В. Егорова // Известия вузов. Физика. – 2021. – Т. 64, № 6(763). – С. 35-39.

УДК 538.975

ТОНКИЕ ПЛЁНКИ КРЕМНИЯ И СИЛИЦИДА МАГНИЯ, СФОРМИРОВАННЫЕ МЕТОДОМ ТВЕРДОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

Д.А. Шеметов¹, А.В. Поляков¹, Д.В. Фомин¹, К.Н. Галкин², Н.Г. Галкин², И.О. Шолыгин¹

¹Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

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

daniil.shemet.2002@mail.ru

В работе представлены результаты исследования тонких плёнок Si и Mg₂Si, полученных методом твердофазной эпитаксии на подложках Si (100). Формирование образцов с плёнками проводилось путём многократного (семь циклов) последовательного осаждения слоёв: только Si (12 нм) – первый образец, Mg (4 нм) + Si (12 нм) – второй образец, с их отжигом после каждого цикла (250 °С в течение 5 минут и 650 °С в течение 1 минуты). Анализ ИК-УФ спектров отражения показал наличие кремния (образец 1) и силицида магния (образец 2) в плёнках. Об этом свидетельствует характерный пик при 3,4 эВ в образце с плёнкой из 7 слоёв Si и максимум при 2,3 эВ в образце с плёнкой из семи слоёв Mg+Si. Исследование спектров пропускания выявило существенное различие оптических свойств сформированных плёнок. При энергии фотонов от 0,2 до 1,3 эВ коэффициент пропускания плёнки второго образца ниже по сравнению с первым. Особый интерес вызывает участок от 0,2 до 1,1 эВ, где коэффициент пропускания плёнок линейно уменьшается с ростом энергии фотонов. Более быстро пропускание убывает у плёнки Mg₂Si. Определение ширины непрямой запрещённой зоны сформированных плёнок по спектрам их поглощения дало значения: 1 эВ для первого образца и 0,92 эВ – для второго.

Современная электроника требует материалов, сочетающих высокую функциональность, экологическую безопасность и технологическую совместимость с существующими производственными линиями. Особый интерес представляют узкозонные полупроводники, способные эффективно преобразовывать тепловую и световую энергию в электричество. В этой группе материалов силициды щелочноземельных металлов, такие как Mg₂Si, демонстрируют особый потенциал, поскольку их практическое использование стало возможным после перехода к тонкоплёночным структурам (10-500 нм),

сочетающим достоинства объёмных аналогов с уникальными характеристиками благодаря своей малой ширине запрещённой зоны ($\sim 0,6-0,8$ эВ) [1] для ИК-применений, высокому коэффициенту поглощения 95 % [1, 2].

Формирование образцов происходило методом твердофазной эпитаксии в камере Varian с базовым давлением 10^{-7} Па. Подложки и источник были изготовлены из кремниевых пластин, легированных бором: подложка – КДБ Si (100) с удельным сопротивлением 4,5 Ом·см, источник – КДБ Si (001) с удельным сопротивлением от 0,001 до 0,005 Ом·см. Источник Mg брался чистотой 99,999 %. Перед ростовым экспериментом подложки и источники проходили химическую и термическую очистку [3].

Тонкие плёнки на подложках Si (100) были получены при семикратном осаждении слоёв: только Si (12 нм) – образец 1 и Mg (4 нм) + Si (12 нм) – образец 2. Их рост осуществлялся при комнатной температуре. После каждого цикла осаждения осуществлялся двухэтапный отжиг слоёв: при 250 °C – в течение 5 минут и 650 °C – в течение 1 минуты. В результате были сформированы два образца с расчётными толщинами плёнок: $h_1 = 84$ нм и $h_2 = 112$ нм. Контроль их роста осуществлялся методом спектроскопии характеристических потерь энергии электронами (СХПЭЭ).

Анализ спектров ХПЭЭ, соответствующих буферному слою Si 60 нм, показал, что на графиках наблюдаются два пика потерь с энергиями 10 и 17 эВ для каждого образца (рис. 1). Эти пики свидетельствуют о возбуждении поверхностного (10 эВ) и объёмного (17 эВ) плазмонов чистого Si, согласно [4].

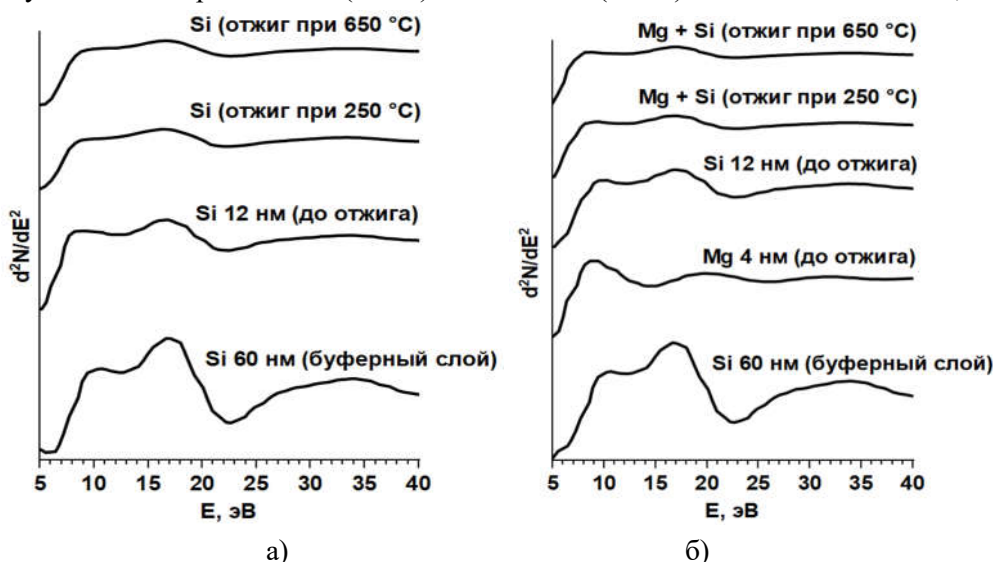


Рис. 1. Спектры ХПЭЭ сформированных плёнок: образца 1 (а), образца 2 (б).

На графиках слоёв Si 12 нм заметны максимумы при этих же значениях энергии, но они менее интенсивные, по сравнению со слоем Si 60 нм. На спектре Mg 4 нм наблюдается пик с энергией 8 эВ, а также широкий рефлекс с максимумом при 20 эВ. Эти пики, по данным [4] указывают на возбуждение поверхностного (8 эВ) и двукратного объёмного (20 эВ) плазмонов Mg. На графиках Mg (4 нм) + Si (12 нм) наблюдается только объёмный уширенный плазмон с энергетическими потерями 17 эВ. Это может быть связано с выходом на поверхность незначительного количества атомов кремния.

Оптические свойства образцов были исследованы методом ИК-УФ спектроскопии. Спектры отражения и пропускания образцов приведены на рис. 2. Согласно данным ИК-УФ спектроскопии (рис. 2а), на подложке Si (100) наблюдаются максимумы коэффициента отражения в УФ диапазоне излучения с энергиями 3,4, 4,5 и 5,6 эВ, по данным [5, 6] характерные для кремния.

В случае образца 1 (7 слоёв Si) интенсивность пика 3,4 эВ снижается при одновременном увеличении его полуширины, тогда как отсутствуют максимумы при 4,5 и 5,6 эВ. Указанные изменения могут быть обусловлены недостаточной кристаллизацией верхнего слоя кремния.

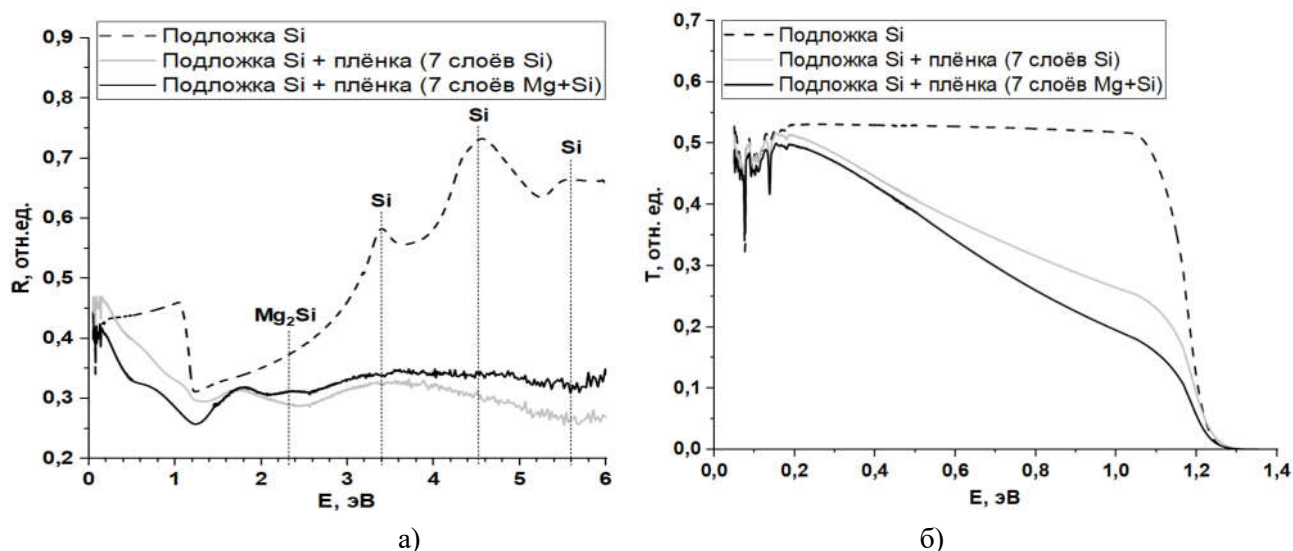


Рис. 2. ИК-УФ спектры отражения (а) и пропускания (б) образцов.

На спектре отражения образца 2 (7 слоёв Mg+Si) имеется пик в видимой области спектра при энергии фотонов 2,3 эВ, который, согласно [6, 7] принадлежит Mg_2Si . Малая амплитуда данного пика и наличие уширенного максимума слабой интенсивности при 3,4 эВ свидетельствует о том, что плёнка Mg_2Si не является сплошной. Это связано с тем, что отжиг при 650 °C привёл к разложению Mg_2Si на магний и кремний и диффузии атомов Mg по Si. В результате произошло произвольное распределение нанокристаллитов Mg_2Si по объёму кристаллической решётки кремния, как описано в [8].

Анализ графиков (рис. 2б) показал, что по отношению к подложке Si коэффициент пропускания сформированных плёнок ниже при энергии фотонов от 0,2 до 1,3 эВ. В области спектра от 0,2 до 1,1 эВ значение коэффициента пропускания подложки остаётся постоянным, тогда как для плёнок наблюдается линейное уменьшение данного параметра. Более быстрое падение коэффициента пропускания наблюдается у второго образца, по сравнению с первым. Это обусловлено дополнительным поглощением, связанным с развитым рельефом плёнки и потерями света на пропускание и отражение для плёнки в образце 1, а у образца 2 – возникают дополнительные потери при поглощении в нанокристаллах силицида магния. Атомы бора в процессе отжигов при 650 °C легируют обе пленки, но не влияют на отражение и пропускание образцов. Наличие бора приводит к появлению акцепторных уровней, а магния – донорных [9, 10].

В области энергий от 1,1 до 1,3 эВ наблюдается значительное уменьшение величины пропускания у обоих образцов. Более плавно убывает данный параметр у образца с плёнкой из семи слоёв Mg+Si. При энергиях выше 1,3 эВ коэффициент пропускания близок к нулю, что, согласно данным [6] свидетельствует о резком увеличении поглощения в плёнках вследствие межзонных переходов, что характерно для Si (образец 1) и Mg_2Si (образец 2), обладающих полупроводниковыми свойствами.

Для геометрического расчёта ширины запрещённой зоны полученных полупроводниковых плёнок Mg_2Si , были построены спектры корня квадратного из коэффициента поглощения (рис. 3), что позволяет рассчитать величину ширины непрямой запрещённой зоны [9] в образцах.

В результате вычисления ширины непрямой запрещённой зоны по спектрам поглощения, согласно методике, описанной в работах [9, 10], были получены значения данного параметра: 1 эВ – для первого образца; 0,92 эВ – для второго. Меньшее значение данного параметра у образца 1, по сравнению со значением ширины запрещённой зоны Si – 1,12 эВ (из данных [11]) может быть связано с тем, что сформированная плёнка кремния является структурно несовершенной и состоит из мелких кристаллов с повышенными потерями на их границах. Для образца 2 рассчитанная ширина запрещённой

зоны согласуется со значением этого параметра, определённого для кремния с нанокристаллитами Mg_2Si (0,90-0,95 эВ) в [12].

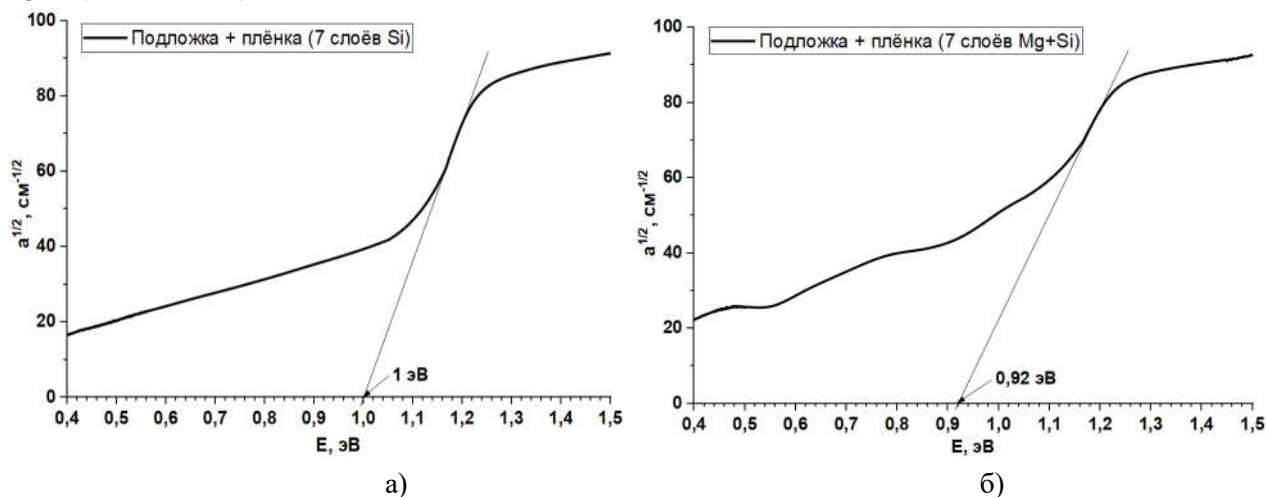


Рис. 3. Спектры корня квадратного из коэффициента поглощения для первого (а) и второго (б) образцов.

Таким образом, в данной работе методом твердофазной эпитаксии были сформированы два образца: с плёнкой из 7 слоёв Si (12 нм) и с плёнкой из 7 бислоёв Mg (4 нм) + Si (12 нм). Методом ИК-УФ спектроскопии установлено, что первый образец содержит кремний (по максимуму на спектре отражения при 3,4 эВ), а второй – Mg_2Si и Si (по пикам на графике зависимости коэффициента отражения от энергии фотонов при 2,3 и 3,4 эВ соответственно). На основе спектров коэффициента поглощения сформированных образцов определено, что ширина непрямой запрещённой зоны плёнки первого образца составляет 1 эВ, а плёнки второго образца – 0,95 эВ.

Данная работа была выполнена при поддержке внутреннего гранта АмГУ.

1. Shaposhnikov, V.L. The influence of pressure on the electronic and optical properties of magnesium silicide and germanide / V.L. Shaposhnikov, A.V. Krivosheeva, V.E. Borisenko // Journal of the White Russian State University. Physics. – №1, 2017. – С. 73-81.
2. Mg_2Si is the new black: introducing a black silicide with 95 % average absorption at 200–1800 nm wavelengths / A. Shevelagin, V. Yashchenko, A. Kuchmizhak, A. Sergeev, E. Mitsai // Applied surface science. 2022.
3. Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А. и др. Введение в физику поверхности / под ред. В. И. Сергиенко. – М.: Наука, 2006. – 490 с.
4. Лифшиц В.Г., Луняков Ю.В., Спектры ХПЭЭ поверхностных фаз на кремнии. Владивосток: Даль-наука, 2004. – 315 с.
5. Формирование и свойства фотодиодных структур Al/ Mg_2Si /Si/Au-Sb / И. О. Шолыгин, Д. В. Фомин, Н. Г. Галкин [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2025. – Т. 68. – № 3 (808). – С. 22-31.
6. Исследование морфологии поверхности, оптических и электронных свойств тонких плёнок Mg_2Si на Si (111) / Д.В. Фомин [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2024. – Т. 23. – №1. – С. 203-215.
7. Наносекундный импульсный отжиг кремния, имплантированного ионами магния / Н.Г. Галкин [и др.] // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – вып.1. – С. 99-104.
8. In situ ДОС и ХПЭЭ исследования десорбции и роста в системе Si (111)/2D Mg_2Si /Si / К.Н. Галкин [и др.] // Химическая физика и мезоскопия. – 2009. – Т. 11. – №3. – С. 334-344.
9. Шалимова, К. В. Физика полупроводников / К. В. Шалимова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 392 с.
10. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах / С. Зи, М.: Мир, 1984.

11. Simulation Study on the Effect of Doping Concentrations on the Photodetection Properties of Mg₂Si/Si Heterojunction Photodetector / Hong Yu [et al.] // Photonics. – 2021. – V.8. – № 11. – P. 509.
12. Ваванова С.В. Формирование, структура и свойства тонких плёнок силицида магния на Si (111): дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук 01.04.07. – Владивосток, 2007. – 152 с.

УКД 538.958

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ НА РЕНТГЕНОВСКИЕ ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ СПЕКТРЫ НАНО- И ПОЛЫХ ЧАСТИЦ ОКСИДА

В.Ю. Юрина

*Амурский государственный университет (г. Благовещенск)
viktoriay-09@mail.ru*

В данной работе исследовано влияние электронов на рентгеновские фотоэлектронные спектры полых и объемных наночастиц оксида алюминия. Облучение образцов осуществлялось на имитаторе факторов космического пространства электронами с энергией 100 кэВ с флюенсом $5 \cdot 10^{15}$ см⁻².

Наноструктурированные материалы на основе оксида алюминия (Al₂O₃) находят все более широкое применение в таких отраслях, как микроэлектроника, косметология и строительство. Особый интерес представляет возможность использования полых частиц Al₂O₃ в качестве пигментов для создания специализированных покрытий, в том числе терморегулирующих и устойчивых к радиации. В данной работе исследовано влияние электронов на рентгеновские фотоэлектронные спектры полых и объемных наночастиц оксида алюминия.

Объектом исследования являются наночастицы Al₂O₃ высокой чистоты 99,99 %, купленные в компании Aladdin Chemistry. Синтез полых частиц Al₂O₃ осуществляли с использованием шаблонного метода [1].

Регистрацию рентгеновских фотоэлектронных спектров осуществляли на приборе PHI5700 фирмы American Physical Electronics, источник излучения AlK α ($h\nu = 1486,6$ эВ). Облучение образцов осуществляли на комплексном имитаторе факторов космического пространства «КИФК» электронами с энергией 100 кэВ, флюенсом $5 \cdot 10^{15}$ см⁻² при плотности потока $4 \cdot 10^{12}$ см⁻²с⁻¹, первоначальный вакуум составлял $5 \cdot 10^{-5}$ Па, температура образцов при облучении составляла 25 °С [2].

Из рентгеновских фотоэлектронных спектров (рис.1), видно, что для полых частиц оксида алюминия линия углерода (C1s) отсутствует, следовательно, шаблон из полистирола полностью выгорел. Для анализа были выбраны линии отставных уровней – Al2р и O1s, которые представляют собой переходы валентной зоны.

На рис. 2 после облучения электронами нанопрошковых оксида алюминия интенсивность линия O1s (рис. 2б) и Al2р (рис. 2г) больше исходных. Для Al2р значение состояния Al₂O₃ составляет 74,15 эВ, уменьшилось по сравнению с исходным на 0,35 эВ (рис.2 (в, г)). Для O1s состояние О-Al имеет значение 530,9 эВ, значение состояния О-ОН составляет 532,5 эВ. По сравнению с исходными данными значения состояний уменьшились на 0,3 эВ и 0,25 эВ, соответственно (рис.2 (а, б)). Количество кислорода увеличилось из-за поверхностного заряда.

На рис.3 для полых частиц интенсивность линии Al2р аналогично исходному, для линии O1s

не уменьшилось. Значение состояния Al_2O_3 уменьшилось по сравнению с начальным на 0,1 эВ (рис.3.(в, г)). Для линии $\text{O}1s$ значение состояний O-Al и O-OH увеличилось на 0,05 эВ и 0,2 эВ (рис.3 (а, б)). Вакансии для кислорода больше в частица до облучения электронами, после облучения O занимает пустые места, и, следовательно, энергия увеличивается.

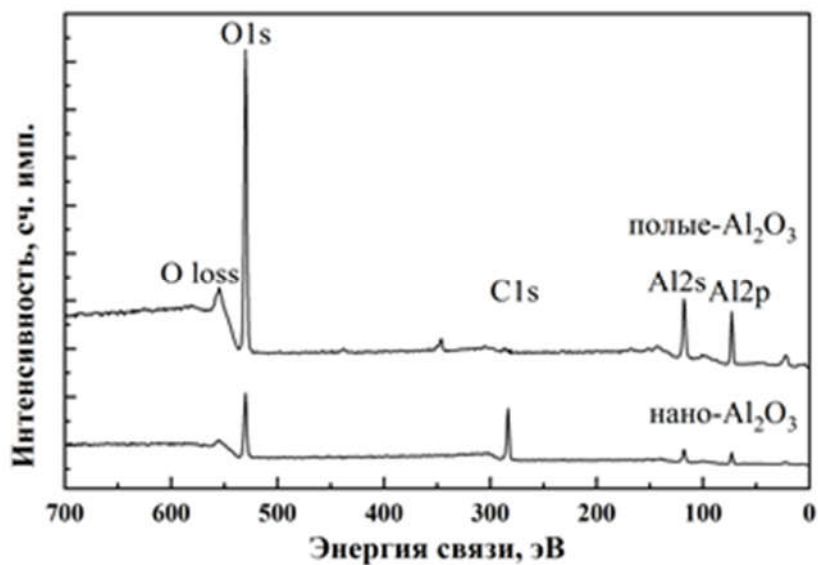


Рис. 1. Рентгеновские фотоэлектронные спектры полых и наночастиц Al_2O_3 до облучения.

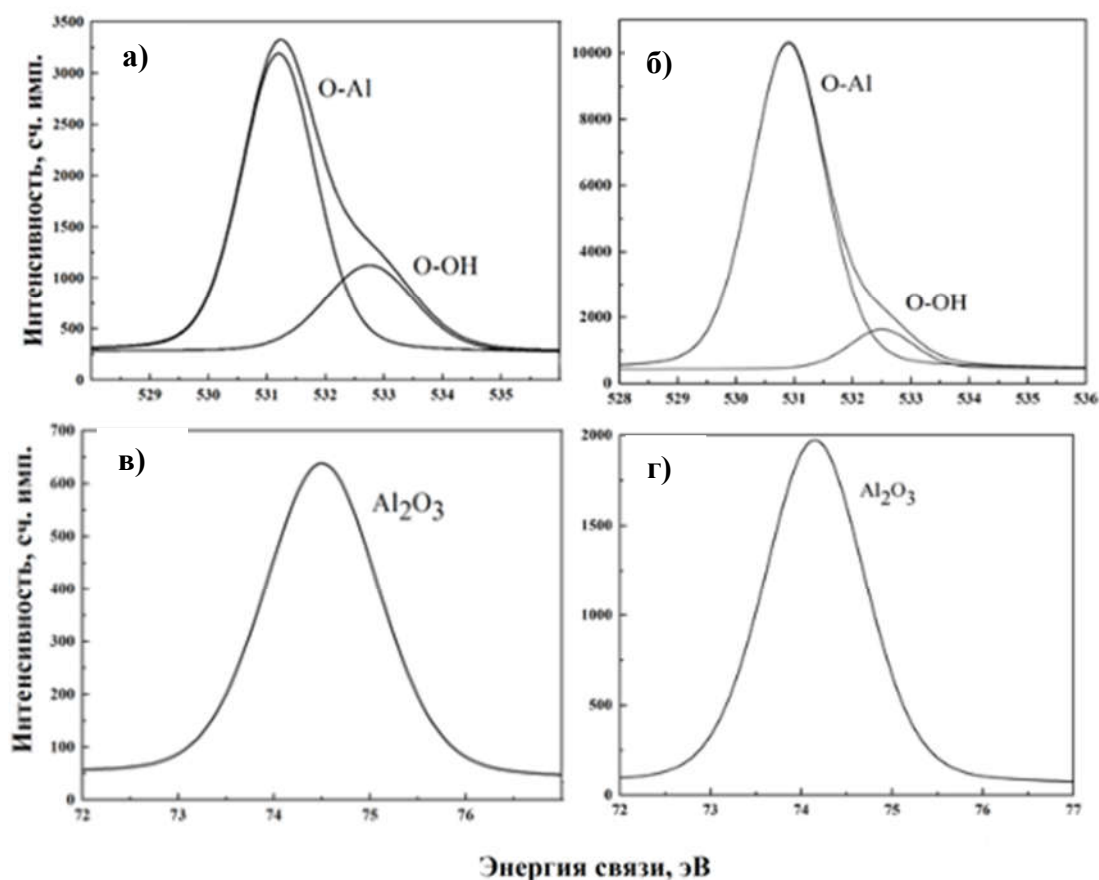


Рис. 2. Рентгеновские фотоэлектронные спектры $\text{O}1s$ (а, б) и $\text{Al}2p$ (в, г) нанопорошков Al_2O_3 до (а, в) и после облучения электронами с энергией 100 кэВ флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (б, г).

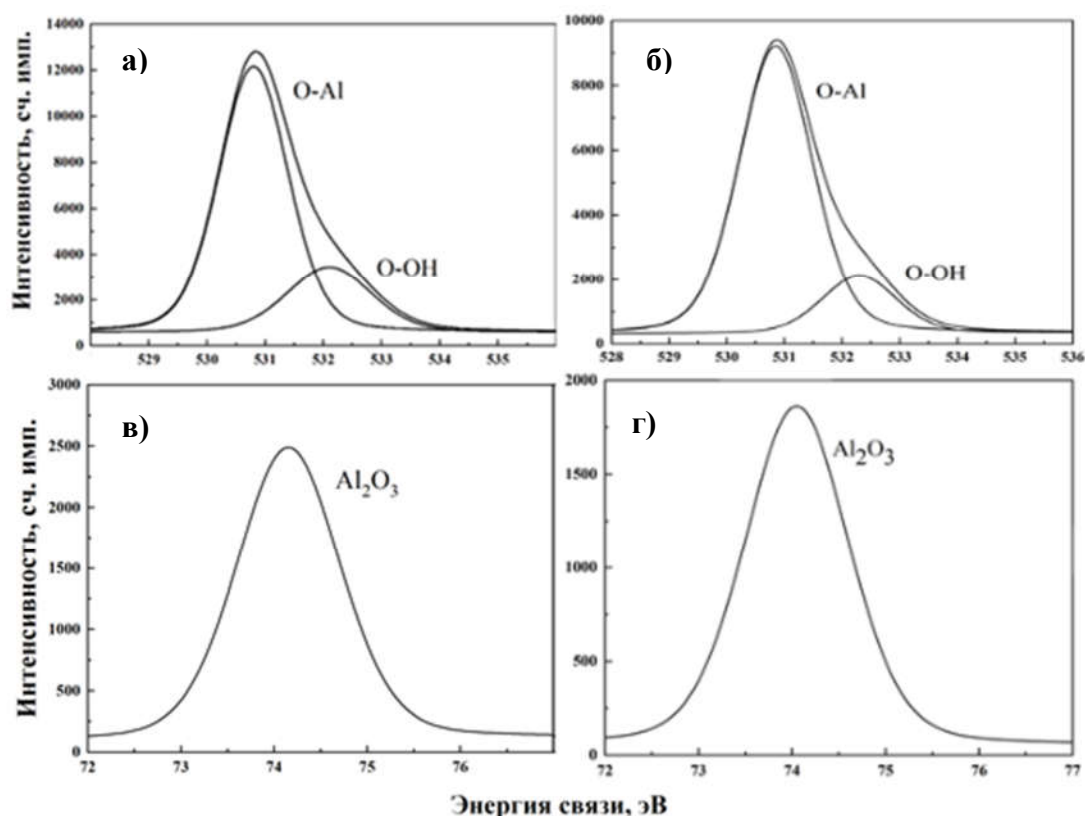


Рис. 3. Рентгеновские фотоэлектронные спектры O1s (а, б) и Al2p (в, г) полых частиц Al₂O₃ до (а, в) и после облучения электронами с энергией 100 кэВ флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (б, г).

Пик в области высоких энергий при 532 эВ характеризует адсорбированные молекулы кислорода и воды на поверхности частиц [3]. Это поглощение характеризуется для полых частиц с развитой удельной поверхностью. Эффект ионизирующего излучения не приводит к сдвигу пика в низких энергиях для полых частиц, тогда как для наночастиц это имеет место, что указывает на более высокую концентрацию радиационных дефектов в наночастицах.

1. Iurina V. Yu., Neshchimenko V.V., Li Chundong. Optical Properties and Radiation Stability of Al₂O₃ Micro-particles, Nanoparticles and Microspheres // Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques. March 2020. 14 (2). P. 253-259.

2. Абраимов В.В., Негода А.А., Завалишин А.П., Колыбаев Л.К. // Косм. наука технол. 1995. Т. 1 № 2. С. 76–80.

3. Paparazzo E. XPS analysis of iron aluminum oxide systems // Applied Surface Science. 1986. V. 25(1-2), P. 1–12.

Секция «Материаловедение»

УДК 67.017; 004.896

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

С.В. Должиков, А.М. Фролов

Дальневосточный федеральный университет (г. Владивосток)

dolzhihov.sv@dvfu.ru

В работе представлены результаты анализа характеристик топливных элементов с протонообменной мембраной при прогнозировании с помощью искусственных нейронных сетей. Созданные нейронные сети со своими задачами справляются довольно успешно, с минимальными отклонениями от оригинала.

В последние годы искусственные нейронные сети (ИНС) получили широкое распространение благодаря их способности решать сложные задачи анализа и обработки данных. Эти технологии оказывают значительное влияние на развитие техники и на различные области науки, в том числе и на материаловедение, которое нуждается в инновационных подходах для повышения точности и эффективности исследований. ИНС способны значительно ускорить процесс анализа, предсказания свойств новых материалов и удешевления этих процессов, а также обрабатывать большие объемы данных и выявлять скрытые закономерности, делать более точные прогнозы [1].

Целью работы является оценка качества работы ИНС в прогнозировании временных рядов, основанных на данных, собранных в области материаловедения в процессе тестов реально существующего объекта на примере твердотельного полимерного электролита в топливном элементе с протонообменной мембраной (РЕМFC).

В РЕМFC используется твердый полимерный электролит между двумя пористыми электродами, который облегчает ионный обмен и обладает превосходными двумя свойствами: проводник протонов и электронный изолятор. Рабочая температура этого типа терморегулятора обычно составляет около 100 °С [2].

Топливные элементы с протонообменной мембраной являются перспективными устройствами для различных технологий преобразования энергии. Однако их распространение на рынке ограничено из-за высокой стоимости, которая обусловлена необходимостью сбалансировать долговечность и производительность [3, 4].

Набор данных ИНС – это испытания динамической силы и поляризационных свойств. Эти данные собраны: автомобильным инженерным центром чистой энергетики и школы автомобильных исследований Шанхайского Университета Тунцзи из Китая в совместной работе с центром аэродвигательной техники, мехатроники и энергетики Университета штата Флорида и школой астронавтики, Северо-Западного политехнического Университета из Сианя в Китае.

Исходные данные формировались из циклов испытаний FC-DLC (Fuel Cell Dynamic Load Cycle).

Цель этих испытаний состояла в том, чтобы подвергнуть топливный элемент повторяющимся циклам нагрузки и измерить влияние различных периодов ускорения, торможения и постоянной скорости на изменение напряжения, плотность тока и температурные поля внутри топливного элемента. Цикл состоял из четырех повторений по 195 секунд каждое на низкой скорости, например, на городских дорогах (зона городского цикла вождения), за которыми следовал период в 400 секунд, имитирующий состояние шоссе и соответствующее ему ускорение (зона внегородского цикла вождения). Полный цикл будет соответствовать расстоянию примерно в 11 км, пройденному за 20 минут. Общее испытание на долговечность состоит из 3076 циклов FC-DLC, что составляет около 1008 часов [2, 4].

Подготовленные для ИНС данные сосредоточены в двадцати файлах Excel, которые были записаны в течение периода тестирования. Двадцать файлов с наборами данных были названы в соответствии с порядком времени эксперимента – от “50_h.csv” до “1000_h.csv”, то есть в одном файле хранятся 50 часов исследований. В каждом файле от “50_h.csv” до “950_h.csv” записаны 152 цикла FC-DLC. В последнем файле “1000_h.csv” записаны 188 циклов. Каждая таблица Excel состоит из 18 колонок. Ток, напряжение и мощность являются основными параметрами, характеризующими работу топливного элемента.

База данных распределена среди 20 .csv файлов, в каждом из которых около 180000 записей. Данные в этих датасетах являются медленно изменяющимися. Поэтому для обучения модели и оценки ее качества хватит 7000 записей. Чтобы собрать такой набор данных был написан код на языке Python, который поочередно открывает каждый .csv файл и записывает каждую 511-ю запись в новый файл с названием “training_sample7k.csv”.

Для исследования были выбраны рекуррентная нейронная сеть (CNN), рис.1а, сверточная нейронная сеть (RNN), рис.1б, и гибридная нейронная сеть (CNN+RNN), рис.2. Сети создавались в среде разработки Google Colab [5, 6].

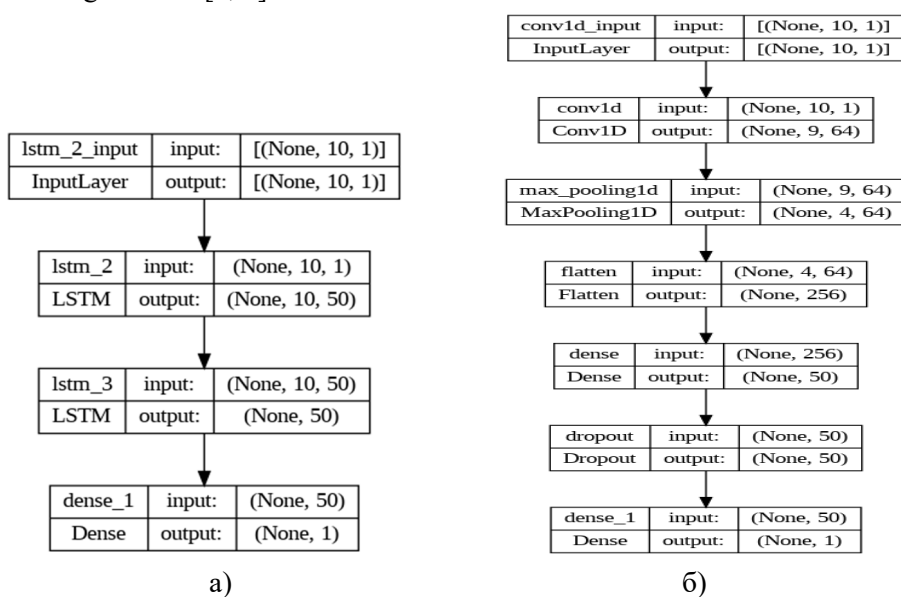


Рис. 1. Схемы ИНС: а) RNN; б) CNN.

Для оценки качества ИНС используются следующие методы.

Корень среднего квадратичного отклонения (RMSE). Это статистическая метрика, используемая для измерения разности между значениями, предсказанными ИНС и фактическими значениями:

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x}_i)^2}, \quad (1)$$

где x_i – фактические значения, $\tilde{x}_i$ – предсказанные значения, n – общее количество наблюдений.

Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE). Это метрика для оценки точности предсказанной модели ИНС, которая измеряет среднее значение абсолютных ошибок между предсказанными и фактическими значениями:

$$\frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - \tilde{x}_i}{x_i} \right|. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации R^2 . Статистическая метрика, которая измеряет, какую долю вариации в зависимой переменной можно объяснить независимыми переменными модели:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}. \quad (3)$$

Здесь $SS_{res} = \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x}_i)^2$ – это сумма квадратов ошибок, то есть сумма квадратов разностей

между фактическими значениями x_i и предсказанными значениями $\tilde{x}_i$, а $SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2$ – это общая сумма квадратов разностей, то есть сумма квадратов разностей между фактическими значениями x_i и их средним значением $\bar{x}_i$.

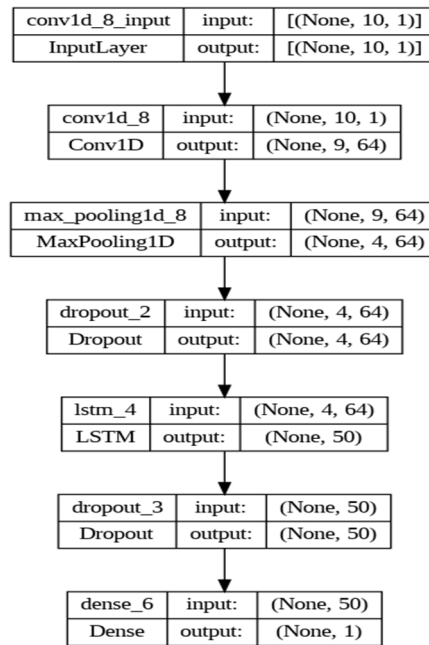


Рис. 2. Схема гибридной ИНС.

В итоге получаются следующие результаты для ИНС RNN: RMSE = 0,02; MAPE = 14,80; $R^2 = 0,9571$. Результаты оценки ИНС CNN: RMSE = 0,03; MAPE = 14,51; $R^2 = 0,9361$. Результаты оценки гибридной ИНС: RMSE = 0,03, MAPE = 14,93%, $R^2 = 0,9256$. Результаты для всех сетей можно считать перспективными для исследования таких сложных неравновесных структур, как аморфные металлические сплавы [7, 8].

Каждая из нейронных сетей обучалась на одинаковых данных в течение пятидесяти эпох. По данным истинных значений датасета и предсказанных искусственными нейронными сетями, видно, что со своими задачами они справляются и довольно успешно, с минимальными отклонениями от оригинала, результаты приведены в таблице.

Результаты оценки качества ИНС показали, что все три варианта пригодны для эксплуатации. Между ними есть отличия в результатах, какая-то сеть справилась лучше, какая-то хуже, но разница между итоговыми значениями минимальна и составляет сотые доли, рис.3.

Результаты оценки качества ИНС

Названия ИНС	Методы оценки качества ИНС		
	Корень средней квадратичной ошибки (RMSE)	Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE)	Коэффициент детерминации (R^2)
CNN	0,02	14,80 %	0,9571
RNN	0,03	14,51 %	0,9361
Гибридная	0,03	14,93 %	0,9256

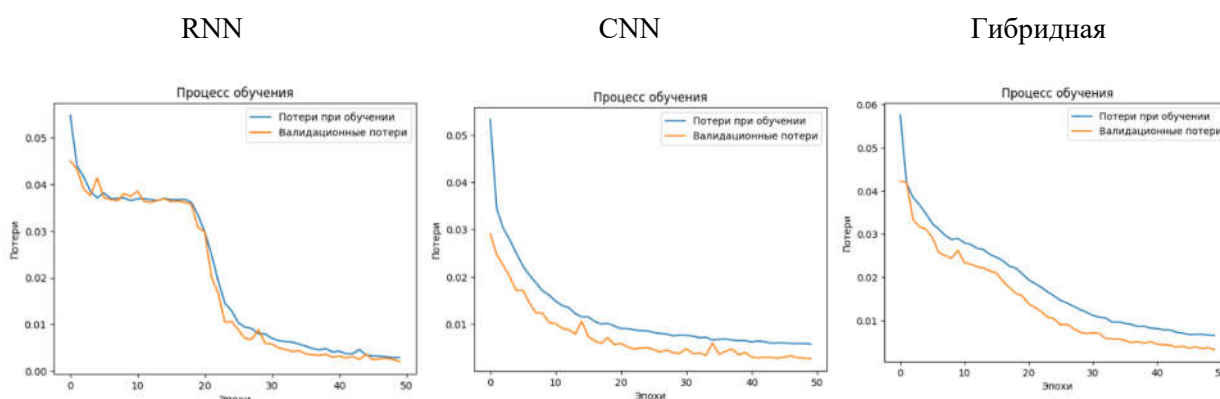


Рис.3. Процесс обучения ИНС.

По графикам видно, что ни одна из искусственных нейронных сетей не переобучилась, так как валидационные потери не возрастают.

Рекуррентная искусственная нейронная сеть имеет очень заметную ступеньку, этап после которого происходит резкое уменьшение потерь при обучении, это связано с тем, что эта ИНС с архитектурой LSTM умеет обращаться с данными из прошлого, и после накопления необходимых данных приобретает улучшенную обучаемость.

Сверточная нейронная сеть с самым плавным уменьшением ошибки. Происходит это из-за того, что CNN использует сверточные слои для выявления локальных паттернов в данных, а затем полносвязные слои обрабатывают извлеченные шаблоны для прогноза и с каждой эпохой веса в полносвязном слое приобретают значения, все больше подходящие для данной задачи.

В гибридной ИНС заметна сглаженная ступенька, которая была в RNN. То есть процесс обучения имеет паттерны средних результатов в процессе обучения RNN и CNN.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов развития ДВФУ по направлению «Искусственный интеллект и большие данные» (№ ДВФУ-ФЦК-25-02-1.02-0046).

1. Головки В. А., Краснопрошин В. В. Нейросетевые технологии обработки данных: учеб. пособие. Электронная библиотека БГУ. – 2017. // URL: <https://elbib.bsui.by/handle/123456789/193558> /

2. Folkson R., Pollet B.G., Staffell I., Shang J.L., Molkov V. Fuel-cell (hydrogen) electric hybrid vehicles. Woodhead Publishing ed. // In: Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance. Woodhead Publishing. – 2014. P. 685-735.

3. Sundmacher K. Fuel Cell Engineering // Advances in Chemical Engineering. – 2012. – №4. – V. 41.

4. Козлов С.И., Фатеев В.Н. Топливные элементы с твердым полимерным электролитом // Международный научнотехнический журнал "Транспорт на альтернативном топливе". – 2016. – Т. 52. – №4. – С. 48-51.

5. Deep Learning for Time Series Forecasting // In: Predict the Future with MLPs, CNNs and LSTMs in Python / Ed. by Brownlee J. – 2018. – P. 87-160.
6. Google Colab: [сайт]. // URL: <https://colab.google/>
7. Фролов А.М., Крайнова Г.С., Должиков С.В. Анизотропия структурных неоднородностей быстрозакаленных сплавов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2018. – № 4. – С. 84-90.
8. Frolov A.M., Pisarenko T.A., Kraynova G.S., Ilin N.V., Ralin A.Yu. Effect of high-speed nonequilibrium on morphological and magnetic properties of melt-spun $\text{Co}_{58}\text{Ni}_{10}\text{Fe}_5\text{Si}_{11}\text{B}_{16}$ alloy // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2022. – Т. 15. – № S3.1. – С. 155-161.

УДК 533.599; 537.525

ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ОКСИДА ВИСМУТА ЕМКОСТНЫМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ РАЗРЯДОМ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО СВОЙСТВ

М.С. Круглов¹, С.А. Пячин², М.А. Баштакова¹

¹Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

²Дальневосточный государственный университет путей сообщений (г. Хабаровск)

kruglov_maxim@mail.ru

В данной статье представлены результаты исследования каталитической активности оксида висмута, который был обработан плазмой емкостного высокочастотного разряда. В процессе разложения органического красителя метиленового синего под воздействием ультрафиолетового и видимого света было обнаружено, что использование Bi_2O_3 в качестве катализатора значительно ускоряет процесс. В исследовании изучались изменения в оптических свойствах оксида висмута после обработки в плазме.

Научно-технический прогресс осуществляется за счет возникновения и развития передовых технологий, среди которых следует выделить такие, которые используют различные типы газовых разрядов. В частности, высокочастотные (ВЧ) разряды широко применяются в таких областях, как травление и нанесение тонких плёнок, плазмохимия, газовые лазеры и другие [1]. ВЧ-разряд представляет собой эффективный инструмент для обработки поверхности твердых тел за счет формирования разветвленного микрорельефа, образования дефектов и зон локального заряда.

Воздействие высокоэнергетических потоков заряженных частиц и интенсивное световое облучение поверхности полупроводника создают благоприятные условия для генерации электронно-дырочных пар и образования ловушек для носителей заряда. Благодаря этому ВЧ разряды успешно применяются в плазмохимических реакторах и установках для поверхностной обработки материалов. Плазменная обработка широко используется для создания и модификации наноструктур. Её цель – увеличить срок службы и надежность изделий машиностроения, а также изменить свойства полимерных композиционных материалов и полиэтиленопластов. Кроме того, с помощью плазменной обработки получают нанодисперсные порошки металлов и химических соединений [2-4].

Плазменная обработка с помощью ВЧ разряда открывает возможности для изменения физико-механических, электрических, оптических и других свойств полимерных материалов.

Газоразрядная плазма может эффективно применяться для обработки фотокатализаторов, основная задача которых является в увеличении скорости разложения загрязняющих веществ при облуче-

нии. Metalлооксидные полупроводники находят всё более широкое применение в качестве фотокаталитических материалов, способных эффективно уничтожать органические загрязнители в воде и воздухе [5]. Среди них особое внимание привлекает полупроводниковый оксид висмута Bi_2O_3 . В зависимости от способа его получения, ширина его запрещенной зоны может изменяться в широком диапазоне от 2 до 3,96 эВ [6]. Это делает оксид висмута чувствительным к поглощению светового излучения как в ультрафиолетовой (УФ), так и в видимой областях.

Цель работы заключалась в исследовании влияния ВЧ-обработки фотокаталитических материалов из оксида висмута на их эффективность в процессах разложения органических загрязнителей.

Плазменную обработку оксида висмута проводили с помощью экспериментальной установки [7], блок-схема которой показана на рис. 1.

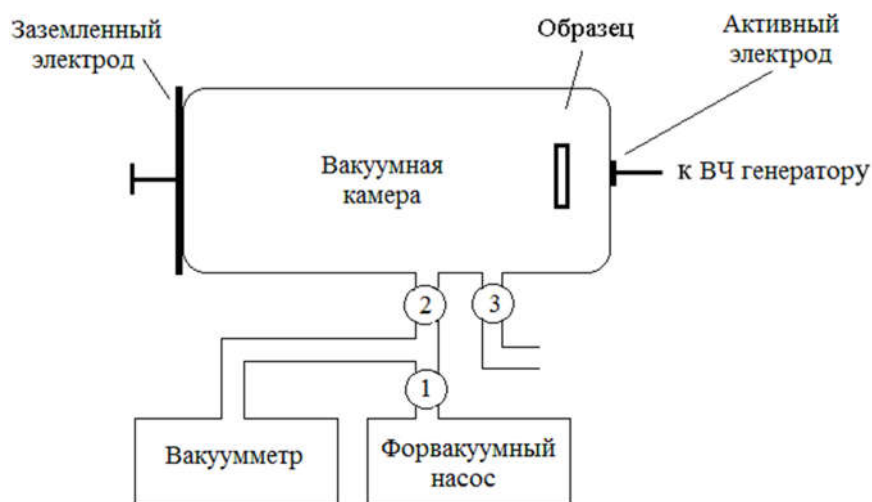


Рис. 1. Блок-схема вакуумной системы установки для облучения материалов плазмой ЕВЧР низкого давления: 1,2,3 – вакуумные клапана.

Оксид висмута наносили на стеклянные подложки площадью около 2 см². Образцы были размещали в вакуумной камере на стеклянном столе на расстоянии от 1 до 1,5 см от внешнего активного электрода. Камеру откачивали с помощью вакуумного насоса, создавая давление около 0,06 Тор. Емкостной высокочастотной разряд (ЕВЧР) возникал внутри камеры при приложении к внешним металлическим электродам переменного напряжения амплитудой около 2 кВ и частотой 11,5 МГц. Осажденный на подложку оксид висмута был обращен в сторону светящегося столба ВЧ плазмы. Плазменная обработка продолжалась в течение 10 минут.

Облученный и необлученный в плазме порошок оксида висмута помещали в стаканы, наполненные водным раствором метиленового синего (МС), который использован как модельный загрязнитель, чувствительный к гидроксильным радикалам и атомарному кислороду. Для фотоактивизация оксида висмута использовался свет дуговой ртутно-кварцевой лампы (ДРК-120) как источника ультрафиолетовой и видимой областей оптического спектра. Каждые 30 минут отбирали пробы и рассчитывали величину степени превращения органического красителя, результаты которых представлены на рис. 2.

В ходе экспериментов было установлено, что процесс разложения красителя – метиленового синего в присутствии частиц оксида висмута, обработанного плазмой ВЧ разряда, происходит быстрее, чем с необлученным оксидом висмута за один и тот же промежуток времени. Т.е. усиливаются его фотокаталитические свойства, приводящие к ускоренному разложению органического красителя метиленового синего, в сравнении с необлученным в плазме оксидом висмута.

Воздействие высокочастотной плазмы на поверхность оксида висмута приводит также и к изменению его оптических свойств: снижению коэффициента отражения, повышению коэффициента поглощения в диапазоне от 420 до 800 нм, смещению границы области поглощения в длинноволновую область и изменению ширины его запрещенной зоны.

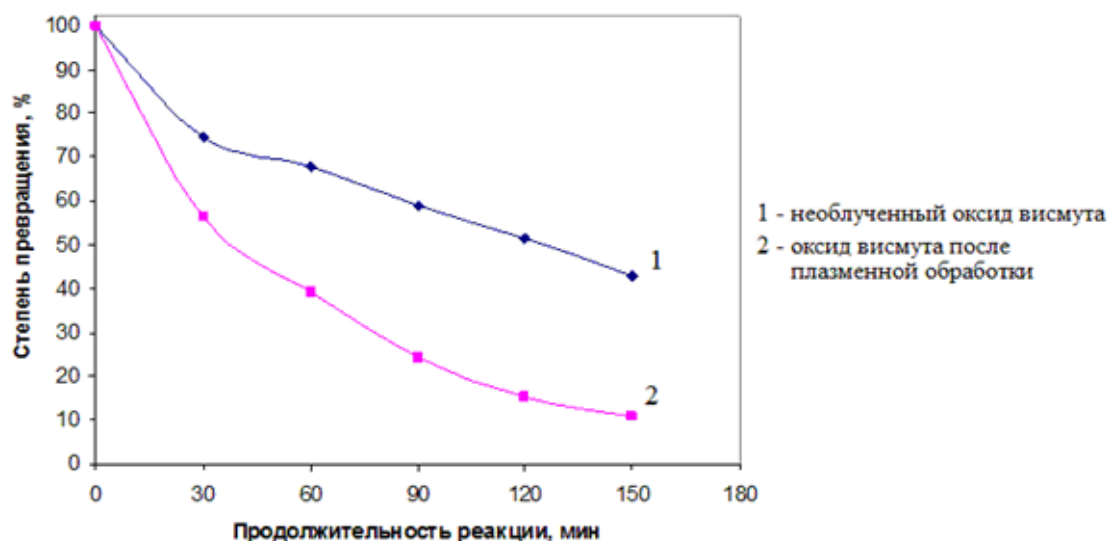


Рис. 2. Зависимости степени превращения органического красителя от продолжительности облучения УФ-видимым светом для висмутатных покрытий на стеклянной подложке.

Результаты экспериментов с изучением зависимости коэффициента отражения $R(\lambda)$ и коэффициента поглощения $F(\lambda)$ от длины волны, и как их следствие изменение ширины запрещенной зоны оксида висмута до и после плазменной обработки представлены в работе [8].

После обработки плазмой ширина запрещенной зоны оксида висмута уменьшилась с 2,7 до 2,3 эВ, что, по-видимому, объясняется формированием дополнительных уровней поглощения в запрещенной зоне оксида висмута, расположенных у границы валентной зоны и зоны проводимости. При этом фазовый состав оксида висмута до и после плазменной обработки не менялся. Это позволило предположить, что при плазменной обработке оксида висмута изменения происходят на уровне электронной структуры соединения.

В дальнейшем планируется оптимизировать параметры разряда, такие как газ, частота поля, давление и конфигурация электрода, чтобы достичь максимально возможного уровня фотокаталитических свойств оксида висмута.

1. Савинов В.П. Физика высокочастотного емкостного разряда: монография. М.:ФИЗМАТЛИТ. – 2013.–308 с.
2. Xu Y. [и др.]. Formation of silicon nanocrystal films at low temperature during capacitive radio frequency discharge transition to the high-current mode // Thin Solid Films. – 2014. (569). P.52-56.
3. Абдуллин И.Ш., Хубатхузин А.А. Использование высокочастотной плазмы пониженного давления для получения изотропных свойств металла // Вестник Казанского Технологического Университета. – 2010. № 11. С. 625-627.
4. Гарифуллин А.Р., Абдуллин И.Ш. Исследование влияния низкотемпературной плазменной обработки на капиллярные свойства базальтового волокна // Вестник Технологического Университета. 2015. № 12 (18). С. 69-70.
3. Iyyarupushpam S., Nishanthi S. T., Pathinettam Padiyan D. Photocatalytic degradation of methyl orange using α - Bi_2O_3 prepared without surfactant // Journal of Alloys and Compounds. – 2013. – V. 563. – P.104–107.
4. Leontie L., Caraman M., Visinoiu A., Rusu G.I. On the optical properties of bismuth oxide thin films prepared by pulsed laser deposition // Thin Solid Films. –2005. – V. 473. – P. 230–235.

5. Круглов М.С., Пячин С.А., Бондарева Т.В. Установка для облучения твердых тел плазмой емкостного высокочастотного разряда низкого давления // Вестник ТОГУ. – 2020. № 4(59). – С. 55-62.

6. Бондарева Т.В., Пячин С.А., Круглов М.С., Кожемяко Н.В. Модифицирование оптических свойств оксида висмута обработкой плазмой емкостного ВЧ разряда // ТОГУ-Старт: фундаментальные и прикладные исследования молодых: Материалы региональной научно-практической конференции, Хабаровск, 12-16 апреля 2021. – С. 53-61.

УДК 538.958

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛЫХ МИКРОСФЕР НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ И ДИОКСИДА ТИТАНА, ПОЛУЧЕННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ ШТЁБЕРА

Н.Г. Морев¹, В.В. Нецименко¹, Ли Чундун²

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

²Харбинский политехнический университет (Харбин)

nikita2002more@mail.ru

В работе исследуются оптические свойства двухслойных полых микросфер $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$, синтезированных золь-гель методом Штёбера. Целью являлось определение оптимального соотношения прекурсоров диоксида кремния (тетраэтилортосиликат) и диоксида титана (тетрабутилтитанат), обеспечивающего максимальную отражательную способность в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Проведенный анализ показал, что оптимальное соотношение составляет 1,0 и 0,6 мл тетраэтилортосиликата и тетрабутилтитаната соответственно. Данные материалы демонстрируют высокую отражательную способность и могут быть использованы в терморегулирующих покрытиях.

Терморегулирующие покрытия (ТРП) являются неотъемлемой частью систем обеспечения функционирования космических аппаратов, работающих в экстремальных условиях космического пространства. Среди различных типов ТРП, особый интерес представляют материалы класса «солнечные отражатели» на основе оксидов, в частности диоксида кремния и диоксида титана, благодаря их термической и химической стойкости. Однако, повышение требований к эффективности и долговечности ТРП стимулирует разработку материалов с улучшенными физико-оптическими характеристиками [1, 2].

Целью работы является синтез двухслойных полых микросфер $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ золь-гель методом Штёбера с оптимальными оптическими свойствами, обеспечивающими максимальную отражательную способность в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах солнечного излучения. В рамках экспериментальной части было осуществлено проведение синтеза двухслойных полых микросфер $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ с варьированием параметров, проведен детальный анализ их морфологии, структуры и удельной поверхности, а также определены оптимальные параметры синтеза, направленные на минимизацию поглощения солнечного излучения.

Для синтеза полых микросфер $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ был использован двухэтапный золь-гель метод Штёбера с применением полистирольных микросфер (PS) в качестве темплатов [3]. На первом этапе осуществляли формирование оболочки диоксида кремния на поверхности PS микросфер путем гидролиза тетраэтилортосиликата (ТЭОС) (1), образования связей Si-O-Si и последующей конденсации SiO_2 в среде этанола, воды и аммиака, используемого в качестве катализатора (рис. 1).

Для обеспечения эффективной модификации поверхности PS-сфер добавлялся модификатор поверхности KH550. На втором этапе проводили нанесение слоя диоксида титана посредством гидролиза тет-

рабутилтитаната (ТБТ).



Варьирование концентраций прекурсоров, а именно ТЭОС и ТБТ, служило ключевым фактором в исследовании их влияния на морфологические характеристики, физико-химические и оптические свойства формируемых композитных микросфер $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$. Детальные параметры синтеза приведены в табл.1.

После завершения реакции, полистирольные темплаты удаляли путем высокотемпературного отжига при температуре 450 °С, в течении 3 часов.

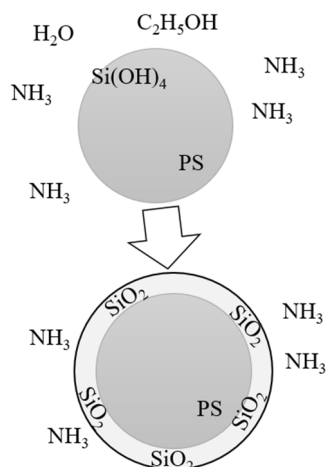


Рис. 1. Схема золь-гель синтеза диоксида кремния SiO_2

Таблица 1)

Параметры процесса синтеза микросфер $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ при различных соотношениях ТЭОС и ТБТ

ТЭОС, мл	ТБТ, мл	PS, мл	EtOH, мл	H_2O , мл	Время, ч	T, °С
0,5	0,3	5	65	15	4	50
1,0	0,6	5	65	15	4	50
1,5	0,9	5	65	15	4	50
2,0	1,2	5	65	15	4	50

Анализ результатов, полученных методом РЭМ, показал, что при низкой концентрации ТЭОС и ТБТ (0,5 и 0,3 мл соответственно) в реакционной смеси наблюдалось формирование микросфер с неоптимальной морфологией, характеризующейся значительной шероховатостью поверхности наличием дефектов. Увеличение концентрации прекурсоров (1,0 и 0,6 мл ТЭОС и ТБТ соответственно) приводило к улучшению сферичности микросфер и снижению количества дефектов. Дальнейшее увеличение объемов прекурсоров, приводило к снижению сферичности микросфер, и увеличению количества нежелательных спонтанно зарождающихся наночастиц SiO_2 и TiO_2 , что негативно сказывалось на формировании полый структуры (рис. 2).

Сопоставление этих результатов с данными, полученными методом БЭТ, подтверждает, что наибольшее значение удельной площади поверхности (141,08 $\text{м}^2/\text{г}$) наблюдалось для образцов, полученных при объемах 0,5 и 0,3 мл ТЭОС и ТБТ соответственно (табл. 2). При увеличении концентрации прекурсоров наблюдалось снижение удельной площади поверхности, что свидетельствует об уменьшении доступной площади пор и изменении внутренней структуры микросфер.

Оптические свойства синтезированных микросфер также продемонстрировали выраженную зависимость от соотношения реагентов. Для сравнения, золь-гель методом были получены порошки чистых полых микросфер на основе диоксида кремния, для которых также были оптимизированы параметры синтеза.

Спектр отражения (рис. 3) показал, что увеличение содержания прекурсоров до 1,0 и 0,6 мл ТЭОС и ТБТ соответственно приводит к росту отражательной способности композитных образцов по

сравнению с чистыми в видимом диапазоне, что указывает на более эффективное отражение солнечного излучения.

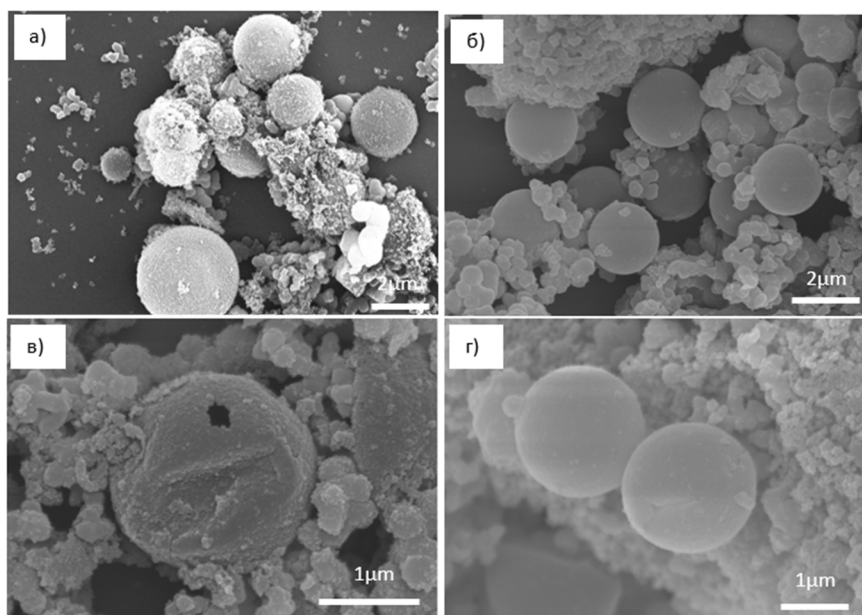


Рис. 2. РЭМ-изображение полых микросфер $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ при различных объёмах ТЭОС и ТБТ (в мл):
а – 0,5 и 0,3; б – 1,0 и 0,6; в – 1,5 и 0,9; г – 2,0 и 1,2

Таблица 2)

Удельная поверхность и размеры пор композитных полых микросфер $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ по методу БЭТ

Образцы	а	б	в	г
Удельная площадь поверхности, $\text{м}^2/\text{г}$	141,08	140,34	118,80	92,89
Средний размер пор, нм	3,80	1,67	1,93	1,43

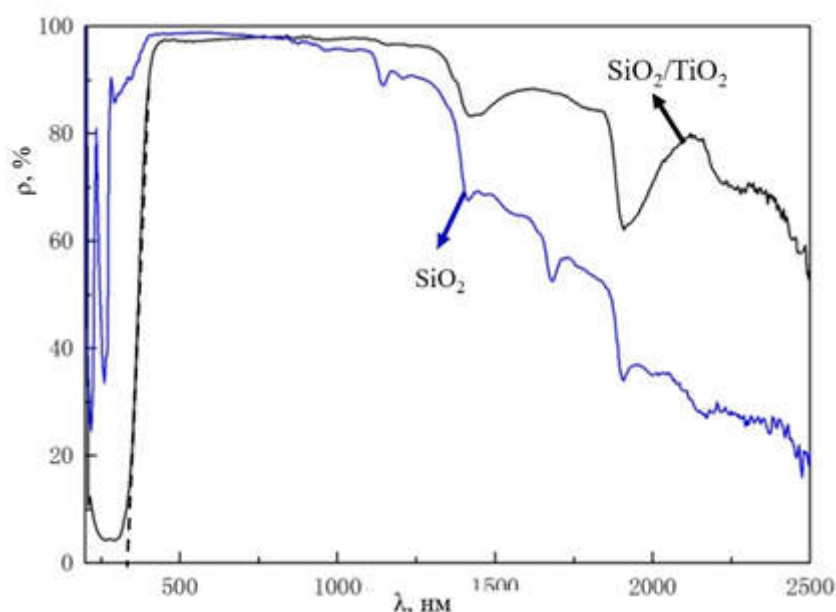


Рис. 3. Спектры отражения порошков полых микросфер $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ и SiO_2 .

Дальнейшее увеличение концентрации ТЭОС приводило к снижению отражательной способности, что вероятно, связано с ухудшением морфологии и увеличением поглощения. В то же время,

образцы с оптимальным соотношением ТЭОС и ТБТ имели наименьший интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения, равный 0,102, в то время как порошок чистых микросфер с оптимальными параметрами синтеза имел значение данного коэффициента равным 0,081, что связано с тем, что в ультрафиолетовой области спектра отражательная способность композитных микросфер значительно ниже, чем у микросфер SiO_2 . Однако, учитывая относительно низкую долю энергии ультрафиолетового излучения в солнечном спектре, достигающем поверхности Земли, можно заключить, что композитные микросферы $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ демонстрируют высокие отражательные характеристики в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, что делает их перспективным материалом для использования в ТРП.

В результате проведенного исследования золь-гель синтеза двухслойных полых микросфер было установлено, что морфологические, структурные и оптические свойства синтезированных материалов зависят от соотношения прекурсоров ТЭОС и ТБТ. Оптимальным для получения микросфер с высокой сферичностью, гладкой поверхностью и максимальной отражательной способностью в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах является соотношение 1,0 мл ТЭОС и 0,6 мл ТБТ. Полученные композитные микросферы $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ демонстрируют высокую отражательную способность, что подтверждается низким значением коэффициента солнечного поглощения (0,102). Таким образом, разработанный метод синтеза композитных полых микросфер $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$, позволяет получать материалы с контролируемыми оптическими характеристиками, что делает их перспективными для использования в качестве компонентов ТРП.

-
1. Михайлов, М. М. Прогнозирование оптической деградации терморегулирующих покрытий космических аппаратов : моногр. / М. М. Михайлов. – Новосибирск : «Наука» Сиб.изд.фирма РАН, 1999. – 192 с.
 2. Чеботарёв, В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / В. Е. Чеботарёв, В. Е. Косенко. – Красноярск : Сибирский государственный аэрокосмический университет, 2011. – 488 с.
 3. Виноградов, А.В. Разработка процессов жидкофазного наноструктурирования частиц диоксида титана для получения материалов с регулируемыми оптическими и фотокаталитическими свойствами: дисс.... док. хим. наук : 02.00.01, 02.00.04 / А. В. Виноградов. – Иваново : Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2019. – 330 с.

УДК 538.911

МАГНИТОАКТИВИРОВАННОЕ УСКОРЕНИЕ РАЗРУШЕНИЯ СПЛАВА Al-Fe-Si ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

Д.Е. Пшонкин, В.И. Филиппова, Д.С. Пупшев, Н.Г. Шерозия, Р.Р. Хайлатыпова

Московский Политехнический университет (г. Москва)

veronika.filippova.1610@gmail.com

Экспериментально исследовано влияние предварительного воздействия постоянного магнитного поля (МП) на процесс разрушения при ползучести сплава Al-Fe-Si с микроскопическими включениями. Обнаружено, что предварительная магнитная обработка образцов увеличивает скорость пластической деформации крити-

ческой стадии на 25 %. Полученные фрактограммы изломов показали, что предварительная экспозиция образцов в МП приводит к формированию более мелкодисперсной "чашечной" структуры. Полученные результаты связываются авторами с взаимодействием магнитного поля с ферромагнитными Fe-содержащими включениями, за счет магнитострикции и ротационно-сдвиговыми неустойчивостями в зоне шейки, вызванные усилением напряжений и селективным торможением дислокаций.

Введение

В настоящее время физическая природа разрушения твердых тел известна достаточно подробно [1 – 3] и не оставляет принципиально белых пятен в понимании этого процесса. Однако, как известно, влияние различных внешних воздействий таких как температура, электрические и магнитные поля, акустические волны, радиация и т.д. значительно влияют на структуру материалов и их физико-механические свойства, тем самым воздействуя на динамику процесса разрушения твердых тел и, в частности, металлов и сплавов [4, 5].

Существует большое количество исследований посвященных влиянию магнитных полей на поведение металлов и сплавов под нагрузкой, т.е. так называемая магнитопластичность [6 – 8]. Однако вопрос влияния внешних воздействий на образование и развитие магистральной трещины при макроскопическом разрушении остается актуальным из-за сложности в аналитических и экспериментальных оценках при изучении процессов формирования критической фрагментированной структуры. В данной работе приведены экспериментальные результаты предварительного воздействия постоянного магнитного поля на процесс разрушения алюминиевых сплавов с микроскопическими включениями в механических тестах на ползучесть.

Методика эксперимента

Для проведения тестов на ползучесть при одноосном растяжении использовалась рычажная машина WP-600 Creep Testing Machine, в которой производился контроль постоянства нагрузки, а также плавности нагружения и разгружения (рис.1). Образцы для механических испытаний вырезались из алюминиевой полосы поликристаллического алюминия сплава на основе Al-Fe-Si в виде двухсторонних лопаток, толщиной 2 мм и длиной в рабочей части 30 мм.

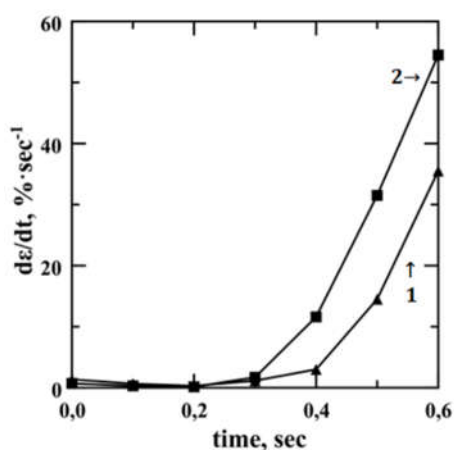


Рис. 1. Зависимость скорости деформации образцов от времени до (1) и после (2) предварительной магнитной экспозиции образцов.

Образцы для микроскопического исследования наклеивали на медные пластины с помощью двухстороннего электропроводного скотча и напыляли серебром в атмосфере аргона (0,1–0,2 мбар) в камере катодного напыления установки Bal-Tec SCD 005 (Бальцерс, Лихтенштейн) в течение 100 сек. Далее образцы исследовали на сканирующем электронном микроскопе LEO-1430 VP (Карл Цейс, Германия) в условиях высокого вакуума с использованием детектора вторичных электронов SE1 при ком-

натной температуре, ускоряющем напряжении 20 кВ и рабочем расстоянии 19-22 мм. В качестве источников постоянного магнитного поля (МП) использовались неодимовые магниты. Величина индукции магнитного поля в зазоре определялась с помощью датчика Холла и составляла $B = 0,7$ Тл. Время экспонирования образцов 30 мин. Часть образцов предварительно экспонировалась в магнитном поле при комнатной температуре перпендикулярно линиям индукции магнитного поля. После чего проводились механические испытания на ползучесть при постоянно действующей растягивающей нагрузке и проводилось сравнение с контрольной группой.

Результаты экспериментов

Ползучесть, или длительная деформация металлов и сплавов, обычно рассматривается как трехстадийный процесс, включающий в себя стадии формирования и развития пластической фрагментированной структуры [3]. На первых двух стадиях большинство пластичных металлов при наложении нагрузки деформируются равномерно по всему объему, где происходит пластическое течение материала. Непосредственно макроскопическое разрушение возникает на последней третьей стадии, именно на ней в объеме исследуемого образца наблюдается локализация пластической деформации, называемой "шейка". Именно в этой области возникает зародышевая микротрещина и ее последующий рост до момента разрушения (рис. 1). Поскольку изучаемый сплав Al-Fe-Si при нагружении способен накапливать большие остаточные деформации, его разрушение происходит, как правило, вязко. Рост магистральной трещины сопровождается интенсивной пластической деформацией. Наложение внешнего постоянного магнитного поля в качестве предварительной обработки показало прирост скорости пластической деформации на третьей критической стадии по сравнению с контрольными образцами.

Также вследствие предварительной магнитной обработки обнаружены изменения в микропрофиле изломов образцов. За счет влияния магнитного поля на дефектную структуру и магнитоактивные Fe-содержащие включения, возникают изменения в полях механических напряжений в шейке из-за ротационно-сдвиговых неустойчивостей. Магнитная активация дислокаций совместно с магнитоупругими напряжениями при магнитострикции включений приводит к более интенсивной перестройке структуры, что вызывает изменения в форме вязкого чашечного излома. Увеличение скорости пластической деформации на критической третьей стадии и изменение морфологии изломов могут быть объяснены в рамках термофлуктуационной теории разрушения при пассивном нагружении [1 – 3, 9]. Ключевым аспектом является взаимодействие магнитного поля с ферромагнитными железосодержащими включениями, приводящее к модификации дислокационной структуры и локальных напряжений за счет магнитострикции. Магнитострикция порождает дополнительные локальные напряжения в местах контакта включений с матрицей, что снижает энергию активации образования микротрещин в уравнении скорости ползучести:

$$\dot{\varepsilon} = \rho \cdot b \cdot v = \rho \cdot b \cdot \left(\frac{\lambda}{\tau_0}\right) \exp\left(\frac{-U(\sigma)}{kT}\right), \quad (1)$$

где ρ – плотность дислокаций; v – скорость подвижных дислокаций; λ – длина свободного пробега; τ_0 – период колебаний атомов $\sim 10^{-13}$ с; b – вектор Бюргерса.

Возникающие магнитоупругие напряжения в Fe-содержащих включениях понижают величину потенциального барьера для термофлуктуационного преодоления дислокаций, ослабленную дополнительными напряжениями $\sigma_{\text{лок}}$:

$$U(\sigma) = U_0 - V\sigma_{\text{лок}}, \quad (2)$$

что объясняет ускорение деформации на третьей стадии (рис. 1). Изменение профиля изломов (рис. 2) напрямую связано с модификацией полей напряжений.

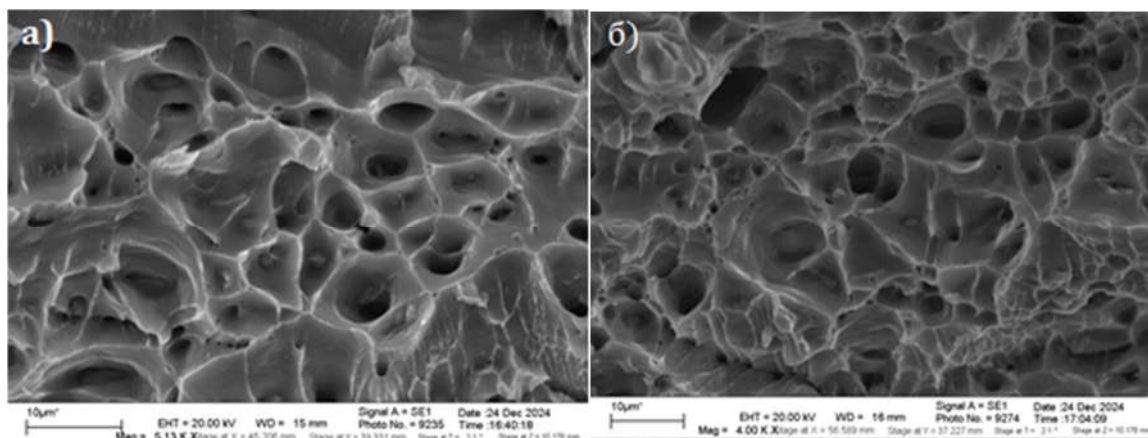


Рис.2. Фрактограммы разрушения сплава Al-Fe-Si до (а) и после (б) предварительной магнитной обработки.

Ротационно-сдвиговые неустойчивости в зоне «шейки» возникают из-за усиления локальных напряжений на границах включений и селективного торможения дислокаций магнитным полем. Это приводит к формированию более мелкодисперсных «чашек» вязкого разрушения, где каждая чашка соответствует зоне локализованной пластической деформации вокруг включения.

Выводы

Предварительное воздействие постоянного магнитного поля с индукцией $B = 0,7$ Тл в течение 30 минут статистически значимо увеличивает скорость пластической деформации на критической третьей стадии ползучести сплава Al-Fe-Si на 25 % по сравнению с необработанными образцами. Фрактографический анализ выявил формирование более мелкодисперсной «чашечной» структуры излома после экспозиции в магнитном поле. Средний размер ямок (чашек) до обработки составил 7,81 мкм, после – 6,38 мкм, что соответствует уменьшению на 18,4 %. Это указывает на изменение масштаба локализации пластической деформации и более интенсивное развитие микроразрушений в объеме материала. Основной причиной наблюдаемых эффектов является взаимодействие постоянного магнитного поля с ферромагнитными Fe-содержащими микроскопическими включениями в алюминиевой матрице. Это взаимодействие реализуется через два основных механизма: магнитострикция включений генерирует дополнительные локальные магнитоупругие напряжения на границе раздела включение-матрица; возникающие в зоне шейки ротационно-сдвиговые неустойчивости за счет предварительного воздействия магнитным полем приводят к селективному торможению движущихся дислокаций.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и образования РФ (проект №FZRR-2020-0023).

1. Згорбечкий Е.С., Михайлов А.Н. Кинетическая теория прочности твердых тел // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7, № 2. – С. 5–15.
2. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций // Машиностроение. – 1990. – 448 с.
3. Паньков А.А. Физические основы прочности и разрушения материалов // Пермь: ПГТУ. – 2003. – 320 с.
4. Лихачёв В.А., Малинин В.Г. Физические основы механики деформируемого тела. Т. 1 // ЛГУ. – 1987. – 344 с.
5. Гриняев Ю.В., Чертова Н.В. Мезоскопическое описание процессов деформации и разрушения // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2, № 5. – С. 5–14.
6. Гусаров В.В., Сайко А.Н. Магнитопластический эффект в алюминиевых сплавах с ферромагнитными включениями // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15, № 4. – С. 77–82.

7. Дегава М., Саенко В.С. Влияние магнитного поля на деформацию алюминиевых сплавов // Металлофизика и новейшие технологии. – 2013. – Т. 35, № 8. – С. 1068–1077.
8. Гусаров В.В., Костюк А.В. Магнитопластический эффект в немагнитных материалах с ферромагнитными включениями // Вестник ЮУрГУ. Серия "Математика. Механика. Физика". – 2010. – № 22(200). – С. 34–39.
9. Ломакин Е.В. Термофлуктуационные модели ползучести и разрушения // Проблемы прочности. – 2005. – № 3. – С. 25–33.

УДК 539.213.2:539.25; 539.213.26

ОТ ЦИФРОВОГО ПАСПОРТА МАТЕРИАЛА К ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЕ

**А.М. Фролов¹, В.С. Плотников¹, Е. В. Пустовалов¹, Г. С. Крайнова¹,
Д.А. Полянский¹, С.В. Должиков¹**

¹Дальневосточный федеральный университет (г. Владивосток)
froloff5@yandex.ru

В работе представлены результаты анализа концепции разработки и создания цифровых паспортов материалов. Предложено не ограничиваться только организацией баз данных цифровых паспортов, а создавать полноценные цифровые платформы для производства и конструирования современных наукоемких конструкционных и функциональных материалов с заданными служебными и коммерческими свойствами.

В настоящее время широко обсуждается создание цифровых паспортов материалов (ЦПМ). ЦПМ представляет собой набор данных о материале, гарантирующий его точное воспроизведение и достаточный для его применения в изделии. Концепция ЦПМ была разработана Центром компетенций национальной технологической инициативы (НТИ) по Новым функциональным материалам на базе Новосибирского государственного университета совместно с инжиниринговым центром «ИК ЦТО». ЦПМ нужны для стандартизации хранения и представления данных о материалах на государственном уровне в России. В этом заключается основная идея и основное отличие от уже существующих в мире баз данных материалов. Разработка "Цифрового паспорта материала" – это инновационный подход к управлению данными о материалах, который позволяет систематизировать, хранить и анализировать информацию о свойствах, составе, методах получения и применения материалов. Такой паспорт может быть полезен для научных исследований, промышленного производства и контроля качества разрабатываемых материалов с заданными служебными свойствами. Подобная стандартизация позволит инженерам и конструкторам в разных организациях применять ЦПМ с минимальными требованиями к испытаниям материалов и с максимальной уверенностью в надежности данных. Проект по созданию отечественной базы цифровых паспортов для материалов планируется завершить в конце 2026 – начале 2027 года [1].

В цифровом паспорте материала должна отражаться известная точная технология изготовления материала. Она может содержаться в ЦПМ явно или находиться в собственности компании производителя, который предоставляет гарантии. За материалом, получившим ЦПМ, производится контроль – должно быть известно состояние поставки материала, произведены проверки с помощью телеметрии на производстве, тестирование, неразрушающий контроль. Кроме того, в ЦПМ необходимо представить область применения и четко определить те свойства материала, которые необходимо знать для его соответствующего применения. Отметим, что целеполагание создания и реализация ЦПМ лежит в

русле мирового научного направления Materials Genome Initiative (MGI). MGI – это масштабная инициатива, запущенная правительством США в 2011 году и поддерживаемая мировым научным сообществом с целью ускорения открытия, разработки и внедрения новых перспективных материалов. Основная цель MGI заключается в использовании современных вычислительных методов, данных и экспериментальных технологий и коммерческой привлекательности для сокращения времени, и затрат, необходимых для создания новых перспективных материалов.

Чтобы удовлетворить запросы всех, заинтересованных в применении ЦПМ, необходимо включать в них знания разработчиков материалов, производителей, технологов, конструкторов, инженеров, химиков, испытателей, а также учитывать коммерческие интересы потребителей, менеджеров и т.д. Следует собрать всю необходимую информацию и представить её удобной для всех форме.

Проведенные исследования аморфных и аморфно-нанокристаллических металлических сплавов (ААНКМС), включая высокоэнтропийные ААНКМС, которые обладают уникальными механическими, физическими и химическими свойствами [2, 3, 4], позволили выработать некоторые рекомендации по созданию цифрового паспорта материалов.

Выделены три составляющих цифрового паспорта.

1. Служебные (эксплуатационные) характеристики – полностью открытая часть для общего доступа. В ней перечисляются свойства (например, электрические, магнитные, прочностные и т.д.), которыми обладает тот или иной материал, сплав, а также режим эксплуатации материала (например, температурный диапазон, давление и т.д.). В этой составляющей должны быть перечислены и изделия, которые производятся из данного материала или в которые он входит как компонент.

Актуальной для первой составляющей является информация о производителях деталей, механизмов из данных материалов (сплавов). Необходимо учитывать стандарты, по которым работают производители, в каком виде им необходимо предоставлять сплавы (порошки, ленты и т.д.).

2. Научные исследования материала – частично закрытая для общего доступа составляющая. Полностью отражаются исследования или ссылки на них, уже опубликованные в открытой печати. Это позволит обеспечить, с одной стороны, незабываемость авторских прав, а с другой надежность результатов, прошедших различный уровень рецензирования.

Немаловажен и учет сведений, которые могут быть не предназначенными для открытого доступа. Следует отметить, что данные могут быть скрыты не намерено (полузакрытые данные), например, входящие в цифровой формат электронно-микроскопических изображений.

3. Технологические характеристики – полностью закрытая для общего доступа составляющая, которая находится у производителя материала. В открытой части (первая составляющая) даются, перечисляются производители материала и способы связи с ними. Производитель сам определяет, на каких условиях он может передать технологию заинтересованным лицам или организациям.

Проведенный анализ позволяет предложить структуру открытой части цифрового паспорта материала, рис.1. Необходимо отметить, что данная структура может быть дополнена, с учетом мнения заинтересованных сторон. В целом создание цифрового паспорта материала достаточно непростая задача, ввиду отсутствия как стандартов в этой области, так и простых договоренностей между всеми участниками процесса.

При создании ЦПМ необходимо развитие междисциплинарного подхода, включающего научные исследования, материаловедение, информационные технологии и инженерии. Например, при использовании ААНКМС в медицине (трансплантология, создание медицинских изделий) необходимы данные на стыке наук – химии, физики, биологии и медицины. С другой стороны, постоянно создаются новые материалы и уже существующие ЦПМ должны способствовать более быстрому их созданию и внедрению. Так, в медицине практически под каждого пациента необходимо изготовить материалы,

точно воспроизводящие свойства его персонализированных тканей [5]. К ЦПМ (или отдельным его частям) должен быть доступ и у исследователей. Они могут создавать различные модели (как расчетные, так и описательные), которые будут способствовать улучшению технологии производства, изменению служебных свойств и созданию новых материалов. Например, для ААНКМС это могут быть модели, описанные в [6 – 8], позволяющие дать конкретные рекомендации технологам и производителям сплавов.

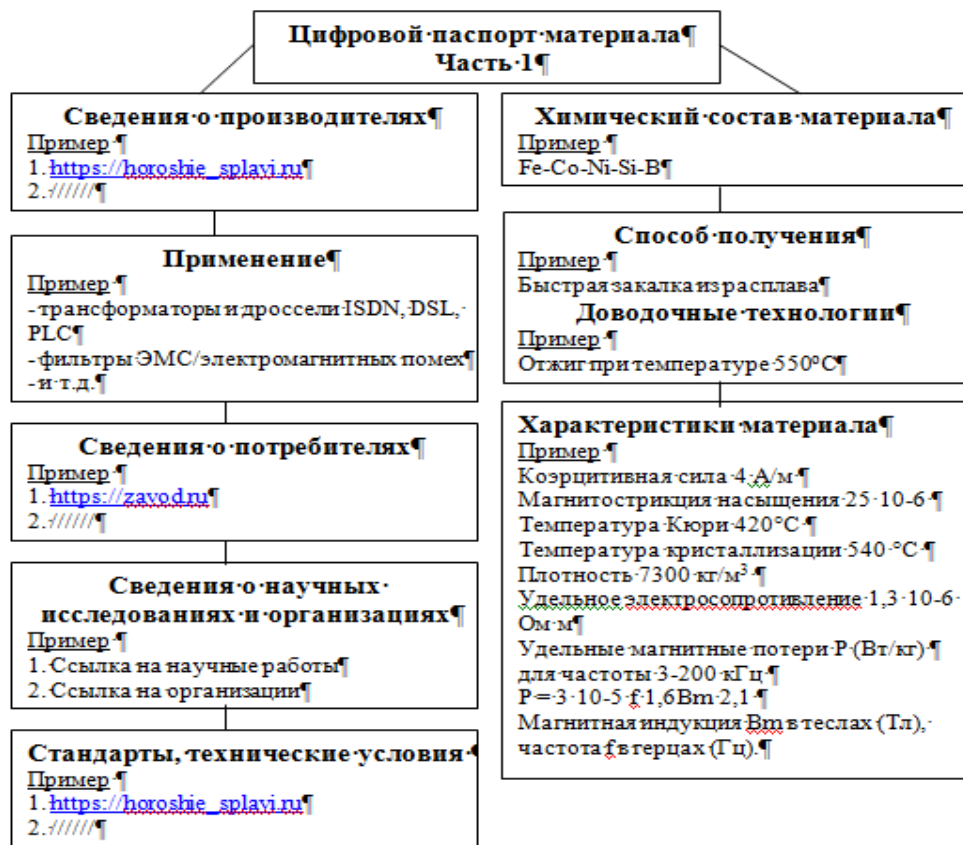


Рис.1. Пример характеристик, отражаемых в открытой части цифрового паспорта материала.

При разработке и создании ЦПМ необходимо учитывать возможность машинного обучения (ML – Machine Learning) и связанных с ним -искусственного интеллекта, нейронных сетей [9] и метода расчёта фазовых диаграмм [10] CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams) для проектирования новых конструкционных и функциональных материалов. Таким образом, целесообразно рассматривать организацию не отдельной базы данных ЦПМ, а информационной платформы, на базе которой возможно создание не только самих ЦПМ, но и новых материалов. Исследования в области ААНКМС позволили предложить схему такой платформы, рис.2.

Предлагается, рис.2, создание отдельных платформ для разных видов материалов (ААНКМС, полимерные материалы и т.д.), которые объединяются в рамках единой информационной платформы РФ. О создании такой платформы было заявлено в НТИ «Цифровое материаловедение» Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана.

Создание информационных платформ по видам материалов (по отраслям) позволит упорядочить и структурировать столь объемную область знания как наука о материалах, а с учетом междисциплинарного подхода, получать необходимые данные о материалах без трудоемких изыскательских работ. Например, рис.2, производители ААНКМС, производители изделий из ААНКМС, а также производители конечной продукции из этих изделий (деталей) имеют возможность координации действий в рамках единого информационного пространства, экономя время и ресурсы, удешевляя конечный продукт.

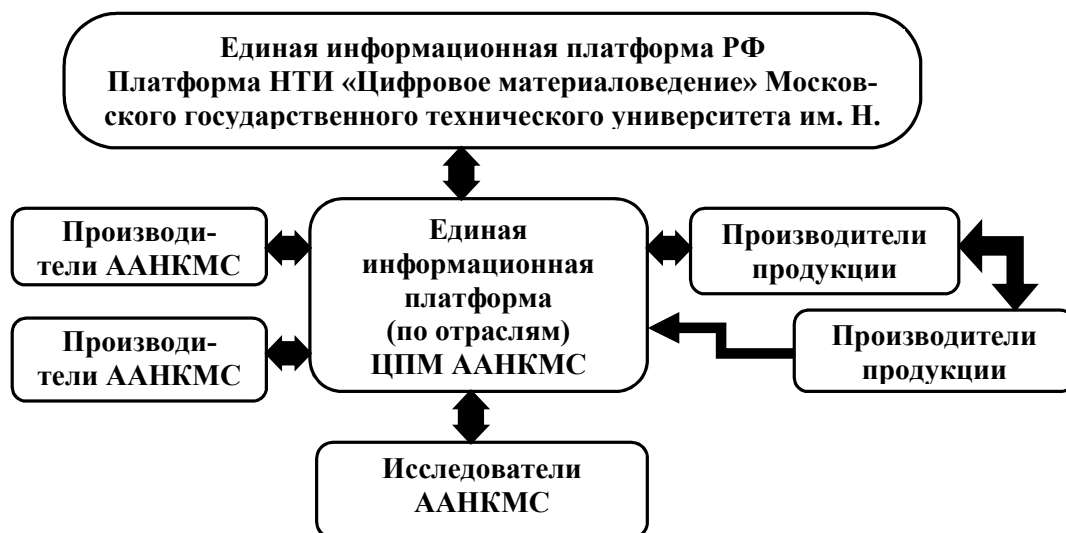


Рис. 2. Структурная схема цифровой платформы (по отраслям).

Таким образом, создание ЦПМ по видам материалов в рамках единой информационной платформы РФ позволит оптимизировать производство и осуществлять доступ к передовым функциональным и конструкционным материалам с заданными служебными и коммерческими свойствами, что в свою очередь повысит экономическую конкурентоспособность Российской Федерации и обеспечит национальную безопасность для таких секторов экономики, как здравоохранение, связь, энергетика, электроника, транспорт и обороноспособность.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов развития ДВФУ по направлению «Искусственный интеллект и большие данные» (№ ДВФУ-ФЦК-25-02-1.02-0046).

1. Разработана концепция цифровых паспортов материалов// URL: <https://new.ras.ru/activities/news/razrabotana-kontseptsiya-tsifrovyykh-pasportov-materialov/> (дата обращения 05.05.2025).
2. Jiang L., Bao M., Dong Y., Yuan Y., Zhou X., Meng X. Processing, production and anticorrosion behavior of metallic glasses: A critical review // Journal of Non-Crystalline Solids. –2023. – V.612. –C.122355.
3. Zhang S., Ma D., Liang X., Chen C. Influence of Al addition on the microstructure and properties of Fe₂₅Co₂₅Ni₂₅(Si_{0.3}B_{0.7})₂₅ high entropy metallic glass // Intermetallics.– 2024. – V.169. –C/108304.
4. Ilin N.V., Komogortsev S.V., Kraynova G.S., Davydenko A.V., Tkachenko I.A., Kozlov A.G., Tkachev V.V., Plotnikov V.S. Magnetic correlations peculiarities in amorphous Fe-Cu-Nb-Si-B alloy ribbons // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. –V.541.V.168525.
5. Дмитрий Иванов: у новых материалов должен быть цифровой паспорт // URL: <https://radiosputnik.ru/20240920/1973677103.html> (дата обращения 05.05.2025).
6. Фролов А.М., Крайнова Г.С., Ансович А.В., Ткачев В.В., Ильин Н.В., Должиков С.В., Плотников В.С. Корреляция морфологии и магнитных характеристик лент типа файнмет в зависимости от состава // труды XVIII рег. науч. конф. Физика: Фундаментальные и прикладные исследования, образование. – 2020 – С.151-155.
7. Фролов А.М., Крайнова Г.С., Должиков С.В. Анизотропия структурных неоднородностей быстрозакаленных сплавов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2018. – № 4. – С. 84-90.
8. Грудин Б.Н., Плотников В.С. Обработка и моделирование микроскопических изображений: монография - Владивосток: Дальнаука. – 2010. – 350 с.
9. Long T., Zhilin Long Z., Pang B. An end-to-end explainable graph neural networks-based composition to mechanical properties prediction framework for bulk metallic glasses // Mechanics of Materials.– 2024. – № 191. –C.104945.
10. Kattner U.R. The CALPHAD method and its role in material and process development // Technol. Metal. Mater. Min. – 2016. –V.13. – № 1. – P. 3-15.

Секция «Общая и техническая физика, оптика»

УДК 629.78; 621.32

ЛАМПОВО-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ МОДУЛЬ ИЗЛУЧЕНИЯ

М.В. Андреева, К.Н. Афонин, А.В. Ермолаев, В.С. Солдаткин, В.И. Туев

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (г. Томск)
vasilii.i.tuev@tusur.ru

В статье приведены результаты разработки и исследования спектральной характеристики излучения лампово-полупроводникового модуля имитатора солнечного излучения. Лампово-полупроводниковый модуль излучателя объединяет на общей печатной плате на металлическом основании галогенную лампу накаливания и единичные корпусированные полупроводниковые диоды без применения люминофоров. Рабочий диапазон модуля от 400 до 1100 нм. Диапазон длин волн излучателя от 700 до 1100 нм обеспечивает галогенная лампа. Коротковолновая часть спектра от 400 до 700 нм обеспечена диодами со значениями длины волны излучения 405, 450, 475, 528, 616, 623 и 660 нм. Абсолютное значение энергетической освещенности, измеренное калиброванным фотопреобразователем лучистого потока, на расстоянии 0,1 м от источника составило 540 Вт/м². Значение относительной неравномерности энергетической освещенности облучаемой поверхности с размерами 100 на 100 мм на расстоянии 0,1 м 65 %. Применение галогенной лампы в составе лампово-полупроводникового модуля излучения позволяет обеспечить спектральную равномерность по ГОСТ Р МЭК 60904-9-2016, но не достигнуты требования по значению энергетической освещенности 1000 Вт/м² и равномерности освещенности по площади.

Имитаторы солнечного излучения (ИСИ) применяют для измерения вольт-амперных характеристик солнечных батарей в условиях, соответствующих внеатмосферному (АМ 0, плотность энергетического потока 1367 Вт/м²) и наземному (АМ 1,5, 1000 Вт/м²) излучению [1]. Традиционно ИСИ создавались на основе ксеноновых ламп, спектральные характеристики излучения которых близки к солнечному [2].

Современные достижения в полупроводниковых технологиях позволяют создавать высокоэффективные и надёжные твердотельные источники излучения, которые уже получили широкое признание и применение в светотехнике. Совершенствование и развитие полупроводниковой техники связано с созданием твердотельных приборов, генерирующих излучение в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях солнечного спектра.

В настоящей работе приведены результаты разработки и исследования спектральной характеристики излучения модуля имитатора солнечного излучения, объединяющего галогенную лампу накаливания и единичные корпусированные полупроводниковые диоды без применения люминофоров.

Излучающие диоды характеризуются сравнительно узким спектральным диапазоном длин волн излучения, поэтому для создания диапазона длин волн солнечного излучения, простирающегося

от 200 до 2000 нм, применяют группы диодов с различными значениями длины волны излучения с общим количеством групп от 6 [3] до 11 [4].

Значения мощности излучения единичных диодов не превышают единиц ватт, поэтому общее количество единичных излучающих диодов в группах для достижения мощности внеатмосферного солнечного излучения достигает десятков штук в зависимости от длины волны излучения [5].

Потоки излучения различных длин волн суммируются на облучаемой поверхности, формируя значение мощности потока, равного мощности внеатмосферного солнечного излучения.

Стандарт [1] определяет спектр солнечного излучения АМ 1,5 (рис. 1).

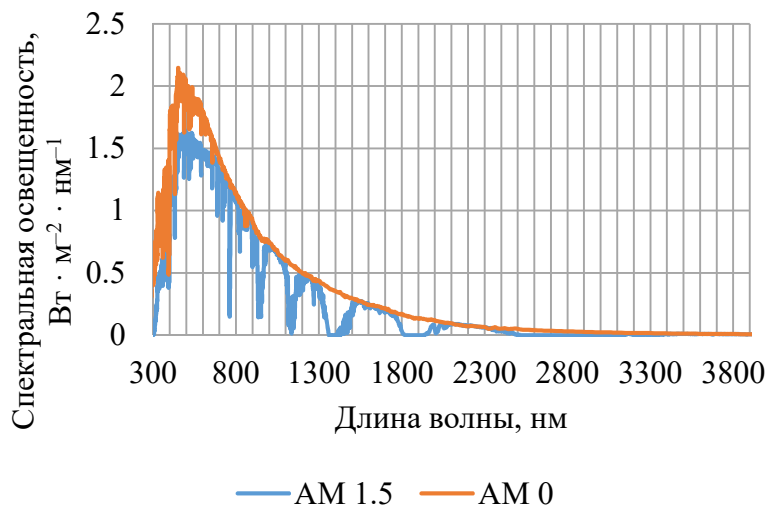


Рис. 1. Спектры солнечного излучения наземного АМ 1,5 и внеатмосферного АМ 0.

Согласно ГОСТ Р МЭК 60904-9-2016 [6], для оценки качества имитаторов ограничивают диапазон длин волн пределами от 400 нм до 1100 нм, который разбит на шесть поддиапазонов, каждый из которых вносит определенный процентный вклад в суммарную энергетическую освещенность (ЭО). Спектральное соответствие ИСИ определяется отклонением от стандартного спектра АМ 1,5, приведенного в [1]. Процентные доли каждого из шести спектральных интервалов в суммарной энергетической освещенности приведены в таблице.

Результаты экспериментального исследования спектральных характеристик лампово-полупроводникового модуля ИСИ

Диапазон длин волн, нм	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1100
Относительная доля энергетического потока, %	49,4	17,0	27,5	2,1	2,4	1,4
Значение долей по ГОСТ Р МЭК 60904-9-2016	18,4	19,9	18,4	14,9	12,5	15,9
Отклонение, %	31,0	-2,9	9,1	-12,8	-10,1	-14,5

При выборе типа используемой в составе модуля лампы проведено экспериментальное исследование энергетического потока излучения шести типов ламп разных производителей. Измерение энергетического потока осуществлялось калиброванным фотопреобразователем лучистого потока на расстоянии 0,1 м от источника:

1. Bosch /H4/ 55Вт/ 12В без рефлектора – 197,5 Вт/м².
2. Bosch /H4/ 55Вт/ 12В с конусным рефлектором Ø40 мм – 163 Вт/м².
3. Bosch /H4/ 55Вт/ 12В с конусным рефлектором Ø30 мм – 68,9 Вт/м².
4. Navigator/MR16/ 50Вт/ 12В – 614,5 Вт/м².
5. Navigator/MR11/ 50Вт/ 220В – 72 Вт/м².

6. Navigator/JCD/ 60Вт/ 220В – 29,7 Вт/м².

Для образца с номером 1 оценка проводилась в направлении, нормальном к осевой линии лампы по центру колбы. Для образцов с номерами 2 – 6 оценка проводилась в направлении осевой линии лампы с применением изготовленных рефлекторов (2-3) и конструктивно встроенных рефлекторов (4 – 5). Сравнение приведенных результатов показывает, что наиболее подходящей по значению энергетического потока излучения является лампа Navigator/MR16/ 50Вт/ 12В.

Изготовлен макет лампово-полупроводникового модуля с габаритными размерами 100 × 100 × 50 мм (рис. 2). Предусмотрено крепление макета к радиатору и/или водяному охлаждающему элементу.



Рис. 2. Фотография макета.

Лампово-полупроводниковый модуль излучателя объединяет на общей печатной плате на металлическом основании галогенную лампу накаливания и единичные корпусированные полупроводниковые диоды без применения люминофоров.

Спектральная характеристика исследуемого модуля, измеренная спектрометром АТР3030 с погрешностью не более 0,09 %, представлена на рис. 3. Диапазон длин волн излучателя от 700 до 1100 нм обеспечивает галогенная лампа. Коротковолновая часть спектра от 400 до 700 нм обеспечена излучением диодов со значениями длины волны излучения 405, 450, 475, 528, 616, 623 и 660 нм.

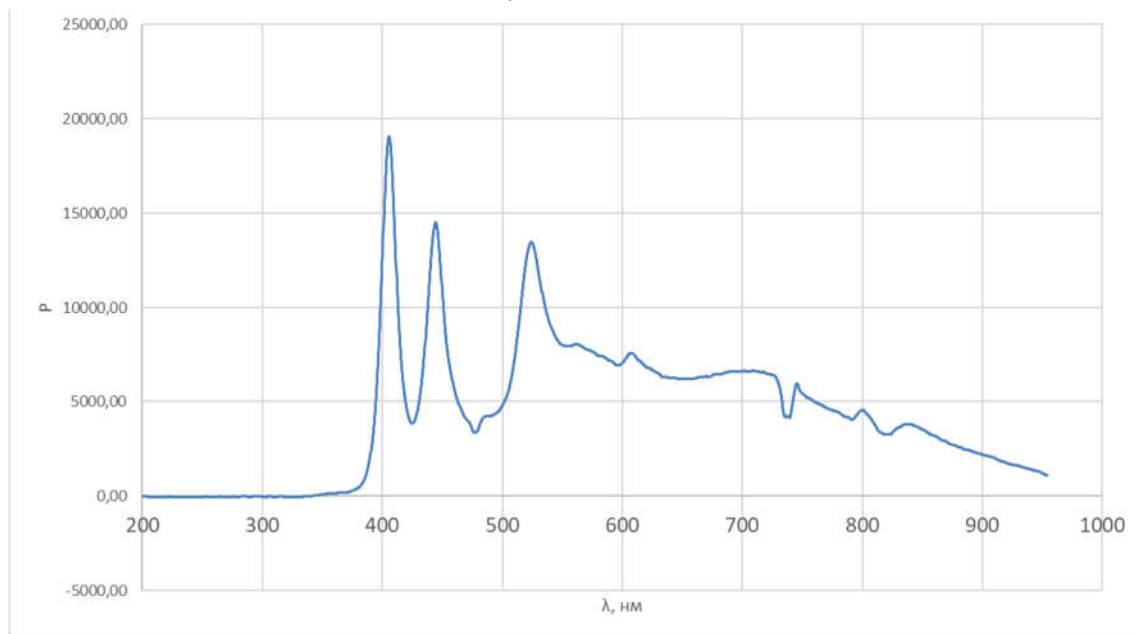


Рис. 3. Спектральная характеристика излучения лампово-полупроводникового модуля в относительных единицах.

Расчетные значения относительной доли энергетического потока в диапазонах длин волн, определенных в [6], представлены в таблице. Для сравнения там же приведены гостовские значения долей и отклонения полученных значений от нормативных.

Абсолютное значение энергетической освещенности, измеренное калиброванным фотопреобразователем лучистого потока, на расстоянии 0,1 м от источника составило 540 Вт/м².

Относительная неравномерность энергетической освещенности облучаемой поверхности с размерами 100 на 100 мм на расстоянии 0,1 м иллюстрируется рис. 4. Значение неравномерности энергетической освещенности 65 %.

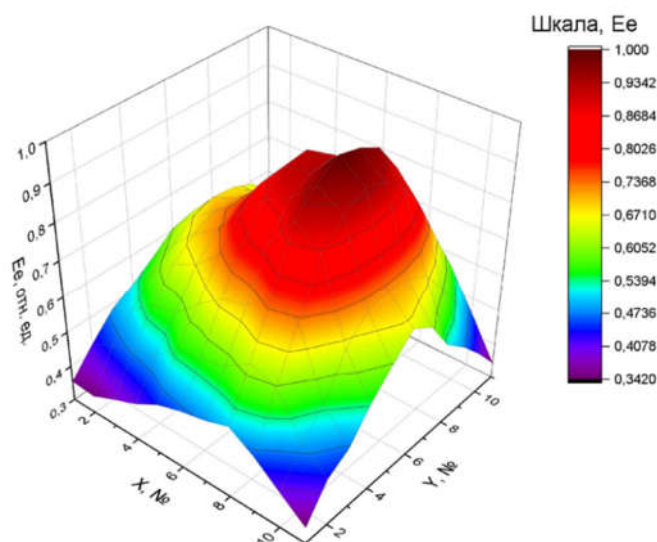


Рис. 4. Относительная неравномерность энергетической освещенности облучаемой поверхности с размерами 100 на 100 мм на расстоянии 0,1 м.

Таким образом, применение галогенной лампы в составе лампово-полупроводникового модуля излучения позволяет обеспечить спектральную равномерность по ГОСТ Р МЭК 60904-9-2016, но не достигнуты требования по значениям энергетической освещенности 1000 Вт/м² и равномерности освещенности по площади.

1. ГОСТ Р МЭК 60904-3-2016. ПРИБОРЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ. Часть 3. Принципы измерения характеристик фотоэлектрических приборов с учетом стандартной спектральной плотности энергетической освещенности наземного солнечного излучения. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 82 с.
2. С.В. Гавриш, А.Н. Кондратьев, В.В. Логинов, Н.Ю. Петренко, С.Г. Киреев Характеристики излучения короткодуговых ксеноновых газоразрядных ламп высокого давления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Сер. Приборостроение. – 2019. – № 6. – С. 50-63. DOI: 10.18698/0236-3933-2019-6-50-63.
3. Шевчук А.А. Разработка светодиодной сборки имитатора внеатмосферного солнечного излучения / Шевчук А.А., Двирный В.В., Майбах М.С., Санько С.А., Павлова А.А. // Решетневские чтения. Материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. – 2022. – Т. 1. – С. 412–414.
4. Kurt J. Linden, William R. Neal and Harvey B. Serreze Adjustable spectrum LED solar simulator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/263051771> (дата обращения: 16.07.2024 г.).
5. И.А. Белова, М.В. Мартинович, Д.Ю. Федорова. Источник искусственного освещения, имитирующий солнечный спектр, для тестирования солнечных батарей / И.А. Белова, М.В. Мартинович, Д.Ю. Федорова. // Доклады ТУСУР. – 2021. – Т. – 24. – № 4. – С. 19–24.
6. ГОСТ Р МЭК 60904-9-2016. ПРИБОРЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ. Часть 9. Требования к характеристикам имитаторов солнечного излучения. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 15 с.

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И БИОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТРИЧНОГО ТЕПЛОВИДЕНИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Б.Г. Вайнер

Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН
Новосибирский государственный университет (г. Новосибирск)
boris-stmt@yandex.ru

Тепловизионный метод экспериментальных исследований, именуемый также методом инфракрасной (ИК) термографии, уже многие годы успешно применяют при решении разнообразных научно-технических и народно-хозяйственных задач. Ставшая доступной технология изготовления, так называемых, тепловизоров нового поколения, оснащенных матричными (двухкоординатными) детекторами ИК излучения, не только привела к кардинальному улучшению характеристик тепловизионных камер в части быстродействия, пространственного и температурного разрешения, вместе взятых, но также существенно развила границы научно-технического применения этих приборов. Современная ИК термография является уникальным инструментом физических исследований, не имеющим сравнимых с ней аналогов и конкурентов. Беспрецедентная универсальность тепловидения определяется тем, что этот метод позволяет на количественном уровне регистрировать и анализировать почти все природные явления, сопровождаемые выделением и поглощением теплоты. А поскольку поверхностные температурные поля тел с их динамическими изменениями при вариации условий эксперимента обычно высокоинформативны, тепловидение высокого временного и температурного разрешения зачастую служит единственным измерительным средством, позволяющим извлекать новые сведения об изучаемых объектах. В обзорном докладе представлены наиболее интересные результаты исследований, полученные автором в разных научных направлениях с применением матричного тепловидения. Продемонстрировано применение метода в химической физике (быстропротекающие процессы адсорбции и десорбции), физической химии (низкотемпературные каталитические реакции), материаловедении, твердотельной электронике (свойства полупроводниковых приборов), биофизике (функционирование живых систем). Показано, что современная ИК термография способна приоткрыть завесу над многими скрытыми явлениями природы.

Инфракрасная (ИК) термография, больше известная как тепловидение, сегодня стала уже довольно привычной технологией, применение которой можно встретить в разных сферах человеческой деятельности. Отдельные термограммы и динамические “термофильмы” стали часто демонстрировать даже в кино и передавать по телевизионным каналам. Помимо традиционного применения тепловизионных камер в военной и космической областях, эти оптические приборы нашли достойное место в медицине, строительстве, архитектуре и множестве других народно-хозяйственных приложений. Относительно часто тепловизионный метод исследования привлекают и к решению научных проблем, однако, имеет место такой феномен, что рекордные технические параметры, обеспечиваемые сегодня мировыми производителями тепловизионных камер, обладают гораздо большим потенциалом, чем использует современная наука [1].

В Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (ИФП СО РАН) в 90-х годах прошлого столетия была разработана и применена на практике версия тепловизора медицинского назначения с матричным ИК детектором формата 128×128 на основе арсенида индия. Позднее тепловизор получил официальное название ТКВр-ИФП/СВИТ. Ключевые особенности этого прибора состоят в том, что в отличие от большинства известных тепловизионных систем он функционирует в

коротковолновой ИК области спектра 2,5 – 3,05 мкм и является спектрально узкополосным (рабочий диапазон длин волн существенно уже средней рабочей длины волны) [2]. Оба названные свойства дают возможность, в частности, с высоким пространственным разрешением обнаруживать скрытые дефекты в слоистых полупроводниковых структурах, полученных методом прямого сращивания [3].

Пример спектрально узкополосного изображения одной из подобных структур приведен на рис. 1. Выигрышная сторона такого способа дефектоскопии заключается в том, что здесь не требуется ИК лазер в качестве источника опорного излучения. Сам тепловизор обеспечивает спектральную селективность и способен выявить интерференционную картину при наличии фактически любого теплового источника в качестве опорного излучателя [2].



Рис. 1. Тепловизионное изображение (в режиме на отражение) твердотельной структуры, полученной методом прямого сращивания пары кремниевых пластин с разным уровнем легирования. Спектрально узкополосный тепловизор ТКВр-ИФП/СВИТ позволяет обнаружить локализацию скрытых дефектов (“пузырей”) на границе сращивания.

Несмотря на то, что ТКВр-ИФП/СВИТ изначально создавался для нужд медицины, он нашел себе достойное применение при решении значительного числа других научных задач, где выделение и/или поглощение теплоты, сопровождаемое температурными изменениями, способно приносить новую информацию о предмете исследования [4, 5]. Заметим, к слову, что при быстроедействии 100 кадров (термограмм) в секунду и измеряемом объекте комнатной температуры (на уровне 30 °С) данный тепловизор обеспечивает температурную чувствительность около 0,03 °С.

Одним из направлений исследований, “не свойственных” медицинским диагностическим приборам, служат некоторые проблемы, стоящие перед химической физикой. Обоснованием для использования ИК термографии в этой области является вполне закономерное желание воспользоваться тем, что фазовые переходы первого рода сопровождаются выделением и поглощением теплоты, выявление особенностей которых может в научном отношении оказаться полезным и информативным [1, 2, 6].

Другое адекватное применение ИК термография находит в физической химии, в том числе, в катализе. И если в задачах, посвященных поиску наиболее эффективных высокотемпературных катализаторов, применение тепловидения относительно давно известно [7], то, как недавно было нами обосновано [1], современное скоростное и высокочувствительное матричное тепловидение лучшим образом может вписаться в арсенал диагностического инструментария, подходящего также и для низкотемпературного катализа, гипотетически заменив в этой области некоторые измерительные технологии на тепловизионные, как более универсальные и информативные.

На рис. 2 изображена тепловизионная экспериментальная установка, созданная в ИФП СО РАН для исследования сорбционных и каталитических процессов, протекающих на поверхности твердых материалов в условиях комнатных температур. Внутри реактора возможно разместить библиотеку образцов, обладающих разными свойствами, и дозированно направить к ним газ-адсорбат или какой-то

другой газ, взаимодействующий с поверхностью. Тепловизор ТКВр-ИФП/СВИТ непрерывно регистрирует температуру образцов и ее изменения в реальном масштабе времени.



Рис. 2. Тепловизионная камера ТКВр-ИФП/СВИТ, установленная над входным окном реактора для регистрации сорбционных и каталитических процессов.

Последующий интеллектуальный или компьютерный анализ позволяет сделать заключение по итогам эксперимента. Для иллюстрации сказанного на рис. 3 приведена фотография библиотеки с образцами и ее тепловой образ на одном из этапов опыта. Разный размер наночастиц золота на поверхности оксида практически не изменяет цвета образцов, но существенно влияет на их каталитическую активность, что подтверждает ИК термография. Красные оттенки на термограмме соответствуют более высокой температуре, синие – более низкой.

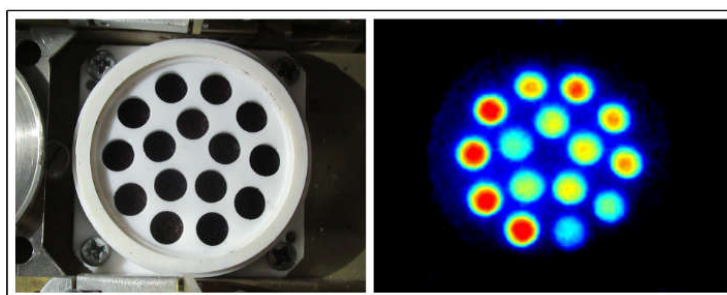


Рис. 3. Фотография (слева) и соответствующая термограмма (справа) библиотеки из 15 твердотельных мелкодисперсных образцов катализатора $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Au}$, предназначенного для низкотемпературного окисления CO до CO_2 .

Мощная компьютерная поддержка современных тепловизионных камер превратила метод из качественного в количественный, когда при наличии сведений о коэффициенте черноты интересующей поверхности можно выражать характеристики изучаемых тепловых процессов в температурных единицах.

На рис. 4 и рис. 5 это продемонстрировано для случая, когда ИК термография применена в исследовании экзотермической каталитической реакции окисления CO до CO_2 на наночастицах золота, нанесенных на поверхность окислов металлов (в данном случае нами использовался оксид алюминия). Эксперимент представлял собой семикратный напуск газовой смеси в реактор, изображенный на рис. 2. На график рис. 4 нанесены температурные характеристики, измеренные во всех 15 ячейках библиотеки. Разная амплитуда температурного отклика в разных ячейках библиотеки обусловлена разной каталитической активностью структур. Детально анализируя кривые, изображенные на рис. 4, можно заключить, что амплитуда температурного сигнала зависит как от размеров наночастиц, так и от партии изготовленных образцов. Последнее позволяет, в том числе, обеспечивать тепловизионный контроль технологии изготовления. На рис. 5 изображены кривые, соответствующие одной выбранной партии.

Хорошо видно, что тепловидение корректно отражает степень каталитической активности твердотельных структур, поскольку известно, что чем ниже температура прокали (отжига) образцов, тем меньше размер наночастиц и, соответственно, выше активность катализатора.

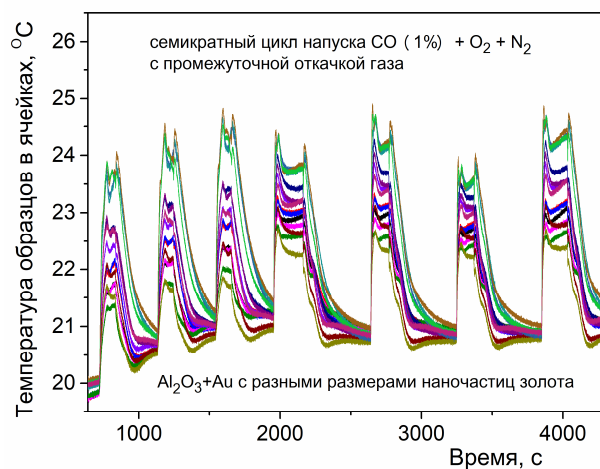


Рис. 4. Семикратное повторение напуска газовой смеси, содержащей 1% угарного газа, в реактор с 15 образцами, отобранными из 3-х партий катализатора $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Au}$.

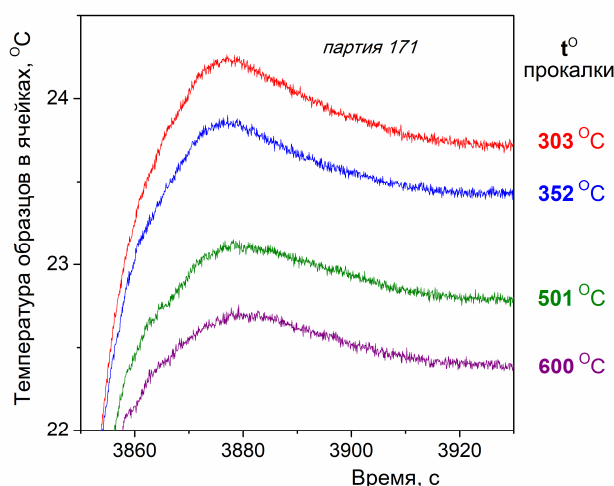


Рис. 5. Характеристики, полученные с помощью тепловизора и демонстрирующие, что каталитическая активность образцов $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Au}$ существенно зависит от размера наночастиц золота, который, в свою очередь тем меньше, чем ниже температура прокали (отжига) структур.

Физика, как известно – наука о природе. В том числе, о живой природе. Изучением биофизических процессов с помощью тепловидения, равно, как и разработкой новых биомедицинских методов исследования человека и животных с применением ИК термографии, мы интенсивно занимаемся с той поры, как создали в своей лаборатории ИФП СО РАН первую тепловизионную камеру [8 – 15]. Интересно, что с определенного момента эта тематика близко соприкоснулась с явлениями физической адсорбции.

Прежде всего, с использованием тепловизора мы на количественном уровне провели подробные исследования потоотделения [9]. Также сорбционные процессы были привлечены для прецизионной диагностики динамики легочного дыхания у людей и животных. Здесь мы предложили и успешно применили в исследованиях тепловизионный метод сорбционно усиленной ИК термографии (sorption-enhanced infrared thermography – SEIRT) [13].

В чем суть данного метода. Вполне понятно, что присутствие сурфактанта в легких приводит

практически к стопроцентной влажности выдыхаемого воздуха. Причем эти сто процентов соответствуют температуре ядра организма – около 37–38 °С. Соответственно, температура практически любых предметов, окружающих человека или животного в лабораторных условиях, заведомо ниже точки росы для выдыхаемого пара. В результате, молекулы воды при выдохе адсорбируются и далее – конденсируются на таких “холодных” предметах, приводя к их разогреву из-за значительной (более 2000 Дж/г) выделившейся теплоты фазового перехода первого рода. Такое увеличение температуры способен легко зарегистрировать тепловизор, поскольку температура объекта с низкой теплоемкостью, попавшего в поток выдыхаемого воздуха (мы обычно использовали тонкий медицинский бинт или кусочек ваты), возрастает при этом на несколько градусов при чувствительности прибора, напомним, около трёх сотых градуса! Вдох, в свою очередь, приводит к испарению осевшей влаги с поверхности вышеупомянутого объекта, вызывая охлаждение последнего.

Описанный инновационный подход позволил даже у лабораторных крыс получить перепад температуры сорбционного индикатора в цикле “вдох-выдох”, превышающий 10 (!) градусов [13].

Высокая чувствительность SEIRT к тонким нюансам дыхания позволила также надежно зарегистрировать кардиогенные осцилляции легочного дыхания как у людей, так и у других млекопитающих – поросят, лабораторных крыс, кролика. Пример таких осцилляций приведен на рис. 6.

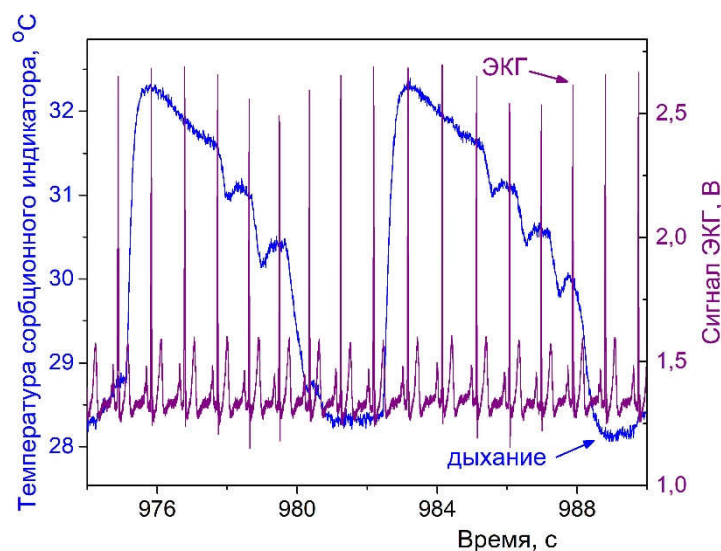


Рис. 6. Осцилляции дыхания, вызванные сердцебиением, зарегистрированные у человека методом сорбционно усиленной ИК термографии (SEIRT). Для подтверждения природы эффекта на рисунке приведена электрокардиограмма, измеренная синхронно с тепловизионной записью дыхания.

Ясно, что сфера применения матричного тепловизионного метода не ограничивается тем, что перечислено выше. В докладе представлены также некоторые наши результаты, полученные в области материаловедения [16 – 18] и других приложений.

Автор благодарит Б.Л. Мороза за изготовление образцов с наночастицами золота, нанесенными на поверхность окиси алюминия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, тема № FWGW-2025-0014.

1. Vainer, B.G. Infrared thermography as a powerful, versatile and elegant research tool in chemistry: Principles and application to catalysis and adsorption // ChemPlusChem –2020 – V. 85 – Iss. 7 – P. 1438-1454. DOI: 10.1002/cplu.202000202.

2. Vainer, B.G. Quantitative characterization of vapour adsorption on solid surfaces and estimation of emissivity

of solids using narrow-band short-wave infrared thermography // QIRT Journal – 2008 – V. 5 – No. 2 – P. 175-193. DOI: 10.3166/qirt.5.175-193.

3. Vainer, B.G., Kamaev, G.N., Kurishev, G.L. Application of the narrow spectral range InAs-FPA-based IR camera for the investigation of the interface voids in silicon wafer bonding // Journal of Crystal Growth. – 2000 – V. 210 – No. 1-3 – P. 351-355. DOI: 10.1016/S0022-0248(99)00709-5.

4. Vainer, B.G. Focal plane array based infrared thermography in fine physical experiment // Journal of Physics D: Applied Physics – 2008 – V. 41 – No. 6 – P. 065102 (12 pp.). DOI: 10.1088/0022-3727/41/6/065102.

5. Vainer, B.G. Lasers and infrared thermography: advantageous cooperation // Applied Optics – 2016 – V. 55 – No. 34 – P. D95-D100. DOI: 10.1364/AO.55.000D95.

6. Mel'gunov, M.S., Ayupov, A.B., Fenelonov, V.B., Vainer, B.G. Direct contact-free real-time acquisition of temperature profiles in adsorbent bed during vacuum swing adsorption // Adsorption – 2013 – V. 19 – Iss. 2-4 – P. 835-840. DOI: 10.1007/s10450-013-9526-3.

7. Loskyl, J., Stöwe, K., Maier, W.F. Infrared thermography as a high-throughput tool in catalysis research // ACS Combinatorial Science – 2012 – V. 14 – P. 295-303. DOI: 10.1021/co200168s.

8. Vainer, B.G. Treated skin temperature regularities revealed by IR thermography // Proceedings of SPIE – 2001 – V. 4360 – P. 470-481. DOI: 10.1117/12.421027.

9. Vainer, B.G. FPA-based infrared thermography as applied to the study of cutaneous perspiration and stimulated vascular response in humans // Physics in Medicine and Biology – 2005 – V. 50 – No. 23 – P. R63-R94. DOI: 10.1088/0031-9155/50/23/R01.

10. Vainer, B.G., Markel, A.L. Systemic vascular response to brachial arteries crossclamping may prognosticate the outcome of remote ischemic preconditioning // Medical Hypotheses – 2015 – V. 84 – P. 298-300. DOI: 10.1016/j.mehy.2015.01.013.

11. Vainer, B.G., Morozov, V.V. Infrared thermography-based biophotonics: Integrated diagnostic technique for systemic reaction monitoring // Physics Procedia – 2017 – V. 86 – P. 81-85. DOI: 10.1016/j.phpro.2017.01.025.

12. Moreira, D.G., Costello, J.T., Brito, C.J., Adamczyk, J.G., Ammer, K., Bach, A.J.E., Costa, C.M.A., Eglin, C., Fernandes, A.A., Fernández-Cuevas, I., Ferreira, J.J.A., Formenti, D., Fournet, D., Havenith, G., Howell, K., Jung, A., Kenny, G.P., Kolosovas-Machuca, E.S., Maley, M.J., Merla, A., Pascoe, D.D., Priego Quesada, J.I., Schwartz, R.G., Seixas, A.R.D., Selfe, J., Vainer, B.G., Sillero-Quintana, M. Thermographic imaging in sports and exercise medicine: A Delphi study and consensus statement on the measurement of human skin temperature // Journal of Thermal Biology – 2017 – V. 69 – P. 155-162. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2017.07.006.

13. Vainer, B.G. A novel high-resolution method for the respiration rate and breathing waveforms remote monitoring // Annals of Biomedical Engineering – 2018 – V. 46 – Iss. 7 – P. 960-971. DOI: 10.1007/s10439-018-2018-6.

14. Vainer, B.G. Radial artery pulse wave velocity: a new characterization technique and the instabilities associated with the respiratory phase and breath-holding // Physiological Measurement – 2023 – V. 44 – P. 015004 (13 pp.). DOI: 10.1088/1361-6579/acb4dd.

15. Вайнер, Б.Г. Современная тепловизионная фотоника в биомедицине // Прикладная фотоника – 2024 – Т. 11 – № 3 – С. 5-21. DOI: 10.15593/2411-4375/2024.3.01.

16. Vainer, B.G., Volodin, A.M., Shepelin, A.V. Hydration-induced thermal behavior of crystalline and amorphous dispersed alumina // Thermochemica Acta – 2021 – V. 706 – P. 179066 (6 pp.). DOI: 10.1016/j.tca.2021.179066.

17. Лукин, Е.С., Иванов, А.М., Вайнер, Б.Г. Тепловизионные исследования в экспериментальной механике // Дефектоскопия – 2003 – № 6 – С. 70-77. DOI: 10.1023/B:RUNT.0000011629.08688.60.

18. Ivanov, A.M., Lukin, E.S., Vainer, B.G. Evaluation of storage energy of the constructional steel during plastic deformation // In: QIRT'2006, 8-th conference on Quantitative InfraRed Thermography, Italy, Padova, June 28-30, 2006 – 6 pp. – Proceedings on-line: <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/051.pdf>.

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МКА: КОНСТРУКЦИЯ, МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА

А.Е. Голых

Амурский государственный университет (г. Благовещенск)

toksikccc@gmail.com

В данной работе представлены результаты проектирования, выбора конструкционных материалов и анализа технологических процессов для производства тепловакуумной камеры (ТВК), предназначенной для проведения термических, радиационных и вакуумных испытаний малых космических аппаратов (МКА) стандарта CubeSat до 12U. Разработка вызвана необходимостью обеспечения доступности дорогостоящих квалификационных испытаний для образовательных и научных учреждений. Проведен сравнительный анализ потенциальных конструкционных материалов (алюминиевые сплавы, нержавеющие и углеродистые стали) по критериям вакуумной плотности, свариваемости, предельной прочности. В работе обоснован выбор нержавеющей стали AISI 304L в качестве основного конструкционного материала камеры. Представлена трехмерная модель камеры, разработанная в САПР SolidWorks, с описанием ключевых элементов. Проанализированы этапы технологического процесса производства, включающие плазменную резку, механическую обработку, сварные работы в среде защитного газа. Полученные результаты демонстрируют возможность создания эффективного и надежного испытательного оборудования силами лаборатории с соблюдением требований международных стандартов по тепловакуумным испытаниям (например, стандарт ECSS-E-ST-10-03C).

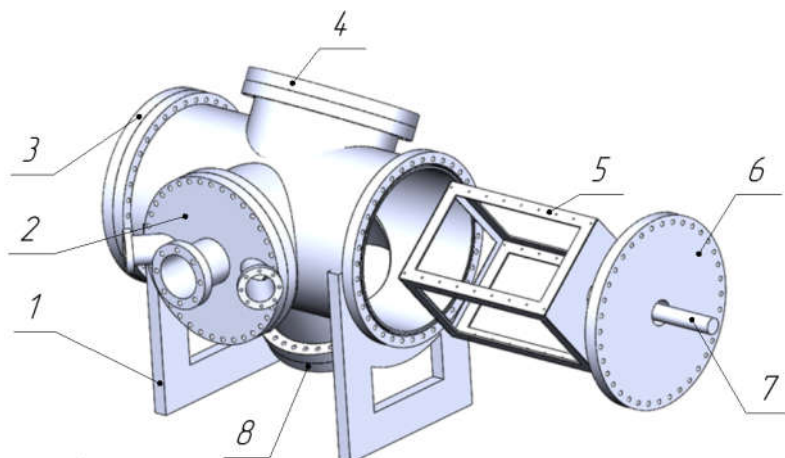
Проведение тепловакуумных и радиационных испытаний является обязательным этапом квалификации любого космического аппарата. Данные испытания позволяют моделировать условия космического пространства (от $1,3 \cdot 10^{-3}$ до $1,3 \cdot 10^{-15}$ Па), экстремальные температурные циклы возникающие в процессе выведения МКА, а также воздействие ионизирующего излучения, благодаря чему можно проверить работоспособность всех систем МКА до его запуска [1, 2].

Стоимость коммерческого проведения таких испытаний, как и цена серийных тепловакуумных камер, остается крайне высокой для большинства университетов, ведущих разработку спутников формата CubeSat и оборудования, работающего в космосе. В связи с этим актуальной задачей становится разработка и производство ТВК, способной обеспечить необходимые параметры испытаний при значительном снижении затрат. Одним из наиболее важных этапов является выбор конструкционного материала, определяющего эксплуатационные характеристики, надежность и стоимость конечного изделия. Данная работа является продолжением исследований [3, 4], направленных на создание собственной испытательной инфраструктуры для МКА в НОЦ АмГУ им. Циолковского, и посвящена этапам проектирования, сравнительного анализа материалов и планирования производства тепловакуумной камеры.

Спроектированная тепловакуумная камера (рис. 1) представляет собой цилиндрический сосуд, закрытый с торцов съёмными крышками. Одна из торцевых крышек имеет отверстие, предназначенное для установки сальников и подшипников вала. Помимо этого, в камере предусмотрены три радиальных фланца, предназначенных: для визуального контроля тестирования; подачи охлаждающей жидкости; отвода газа; подвода ионизирующего излучения и т.д.

Внутри камеры на вращающемся валу размещена каретка, на которой крепится испытуемый образец (МКА). Для термостатирования камеры и охлаждения/нагрева испытуемого образца в конструкции предусмотрена система каналов для подачи хладагента (рис. 2).

Основным критерием выбора материала в контексте вакуумной техники является его низкая газопроницаемость и способность сохранять вакуумно-плотные свойства после проведения сварочных и механических работ. Дополнительными требованиями являются коррозионная стойкость, немагнитность (для исключения помех при испытаниях электронных компонентов), прочность при рабочих температурах и технологичность [5 – 7].



1 – опоры камеры; 2 – съемной радиальной крышки с фланцами; 3 – торцевой заглушки; 4 – радиальной заглушки с окном для наблюдения; 5 – каретки для размещения МКА; 6 – торцевой заглушки с отверстием для установки подшипников и сальников вала; 7 – вращающегося вала; 8 – нижней радиальной заглушки

Рис. 1. Трехмерная модель тепловакуумной камеры с извлеченной кареткой спутника.

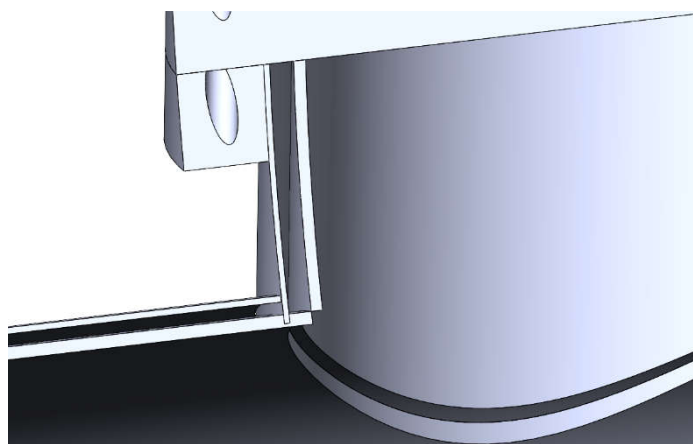


Рис. 2. Вид части тепловакуумной камеры в разрезе.

Был проведен сравнительный анализ наиболее распространенных материалов, используемых в вакуумной технике. Результаты анализа представлены в таблице. Как видно из данных таблицы, нержавеющая сталь марки AISI 304L демонстрирует оптимальный баланс характеристик для данного применения. Помимо этого, она широко распространена и ее стоимость значительно ниже AISI 316L.

Для основных элементов камеры (цилиндр, крышки) выбраны листы толщиной 10 мм, для элементов каретки и внешнего охлаждающего контура листы толщиной 3 мм.

Производство камеры планируется осуществлять по следующему технологическому маршруту: плазменная резка (раскрой листового и трубного материала по чертежам); механическая обработка (фрезерование плоскостей фланцев, сверление отверстий.); сборка и сварка (проведение сварочных работ в среде инертного газа (аргонодуговая сварка TIG) для всех герметичных швов с целью ис-

ключения окисления; контроль качества (визуальный и токовихревой контроль сварных швов.); испытание на герметичность.

Таким образом, в результате проведенной работы выполнено проектирование тепловакуумной камеры для испытаний МКА стандарта CubeSat до 12U. Проведен сравнительный анализ конструкционных материалов, по результатам которого обоснован выбор нержавеющей стали AISI 304L, обеспечивающей оптимальный баланс высоких эксплуатационных характеристик таких как: предел прочности около – 600 МПа; предельное остаточное давление – $\geq 1 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-9}$ Па, и технологичности. Разработан и проанализирован технологический процесс производства, ключевыми этапами которого являются плазменная резка, механическая обработка и сварные работы в защитном газе.

Материалы и их характеристики для изготовления тепловакуумной камеры

Материал	Вакуумная плотность (предельное остаточное давление)	Технология сварки	Коррозионная стойкость (по ГОСТ 9.005-72)	Предел прочности, σ_b (МПа)	Магнитные свойства
Алюминиевые сплавы (АМг6, АМц)	$\geq 1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-8}$ Па	Аргондуговая (TIG) и полуавтоматическая (MIG) сварки	Устойчив в атмосферных условиях. Склонен к коррозии в некоторых электролитах	315 – 340 (АМг6)	Немагнитный
Сплавы стали (Ст3, Ст20)	высокая газопроницаемость	Ручная дуговая (MMA), аргондуговая (TIG) сварки	Неустойчив. Требуется нанесения защитных покрытий (никелирование, окраска)	370 – 420 (Ст3)	Магнитный
Нержавеющая сталь AISI 304L	$\geq 1 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-9}$ Па	Аргондуговая сварка (TIG)	Полностью устойчива в атмосферных условиях и во многих агрессивных средах	520 – 600	Немагнитный
Нержавеющая сталь AISI 316L	$\geq 1 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-9}$ Па	Аргондуговая сварка (TIG)	Полностью устойчива в атмосферных условиях и в большинстве агрессивных сред	520 – 620	Слабomagнитный

Проведенные работы подтверждают возможность создания силами лаборатории собственного комплекса для проведения тепловакуумных испытаний, что значительно снизит стоимость квалификации разрабатываемых малых космических аппаратов и оборудования, работающего в космосе, и повысит самостоятельность научно-образовательного центра в области космического приборостроения. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку конструкторской документации, валидацию ее вакуумных и температурных характеристик с модельными данными и проведение первых испытаний инженерных образцов МКА.

1. Европейский стандарт проведения наземных испытаний аэрокосмической техники ECSS-E-ST-10-03C [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.abbottaerospace.com/downloads/ecss-e-st-10-03c-space-engineering-testing/> – 10.07.2025.

2. ISO 10109-1:1994 Оптика и оптические приборы. Требования к работе в определенных окружающих условиях. Часть 1. Общая информация, определения, климатические зоны и их параметры: дата введения: 01.11.1994. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.standards.ru/print.aspx?control=27&id=3624211&print=yes>– 10.07.2025.

3. Патент на полезную модель № 211274 U1 Российская Федерация, МПК В64G 7/00. Имитатор транспортно-пускового контейнера для поведения вибродинамических испытаний спутников стандарта CubeSat 1U-3U: № 2021139634 :заявл. 29.12.2021 :опубл. 30.05.2022 / Д. В. Фомин, А. Е. Голых.

4. Патент на изобретение № RU2812511C1 Российская Федерация МПК В64G99/00. Имитатор транспортно-пускового контейнера для спутников стандарта CubeSat 6U, предназначенный для использования в составе поворотных устройств: №2023118467:заявл. 13.07.2023:опубл. 30.01.2024 / Д. В. Фомин, А. Е. Голых.

5. Фомин, Д. В. Универсальная платформа полезной нагрузки для малых спутников стандарта CubeSat [Электронный ресурс] / Д. В. Фомин, Д. О. Струков, А. С. Герман // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2018. – Т. 61. – № 5. – С. 446-449. – doi 10.17586/0021-3454-2018-61-5-446-449. – Режим доступа:<https://cyberleninka.ru/article/n/universalnaya-platforma-poleznoy-nagruzki-dlya-malyh-sputnikov-standarta-cubesat> . – 09.10.2023.

6. Вакуумная техника : учебник для вузов / Розанов Л. Н. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 2007. - 390 с. : ил. - (Для высших учебных заведений. Электронная техника). - Библиогр.: с. 385. - ISBN 978-5-06-005521-4.

7. Материалы XIX международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология», Москва, Экспоцентр, 2–4 апреля 2025 г. – М., 2025.

УДК 550.34

СЕЙСМОРЕГИСТРАТОР ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «СЕЙСМО-ПРО»

С.В. Губин, В.В. Насыров, К.С. Рябинкин

*Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)
maraul@inbox.ru*

Описывается разработанный трёхканальный сейсморегистратор, предназначенный для регистрации и обработки сейсмических сигналов, описаны принципы работы устройства, его аппаратная и программная реализация. Приведены результаты его тестирования.

Современные сейсмические регистраторы должны обеспечивать высокую точность измерений и обработку данных в реальном времени. Однако их стоимость, как у промышленного аналога Байкал-8 (свыше 1 млн рублей), или коммерческих решений (около 590 – 1140 \$), ограничивает масштабы применения. Разработанный сейсморегистратор стоимостью 25 000 рублей решает эту проблему.

В представленной работе описан трёхканальный сейсморегистратор, разработанный на базе современных и доступных электронных компонентов. Его себестоимость составляет около 25 000 рублей, что на порядок ниже стоимости коммерческих аналогов, и делает его перспективным решением для создания масштабных сейсмических сетей. Ключевая задача данного устройства – обеспечить максимальное покрытие территории наблюдения при минимальных затратах, что особенно актуально для долгосрочных геофизических исследований, мониторинга слабых землетрясений и изучения локальных тектонических процессов [1].

Разработанный регистратор (рис. 1) демонстрирует высокую функциональную готовность и

пригоден для профессионального использования. Он способен фиксировать сейсмические колебания в широком диапазоне частот и амплитуд, что позволяет применять его как в научных исследованиях, так и в образовательных целях. Устройство оснащено интерфейсом Ethernet, обеспечивающим стабильную передачу данных в локальную сеть или напрямую на удалённый сервер для последующей обработки и архивирования. Это позволяет интегрировать регистратор в распределённые системы мониторинга, что обеспечивает оперативный доступ к сейсмическим данным в режиме реального времени. Модульная архитектура устройства обеспечивает возможность его дальнейшего масштабирования и адаптации для решения различных прикладных задач, включая развёртывание автономных систем мониторинга, сейсморазведку и др.

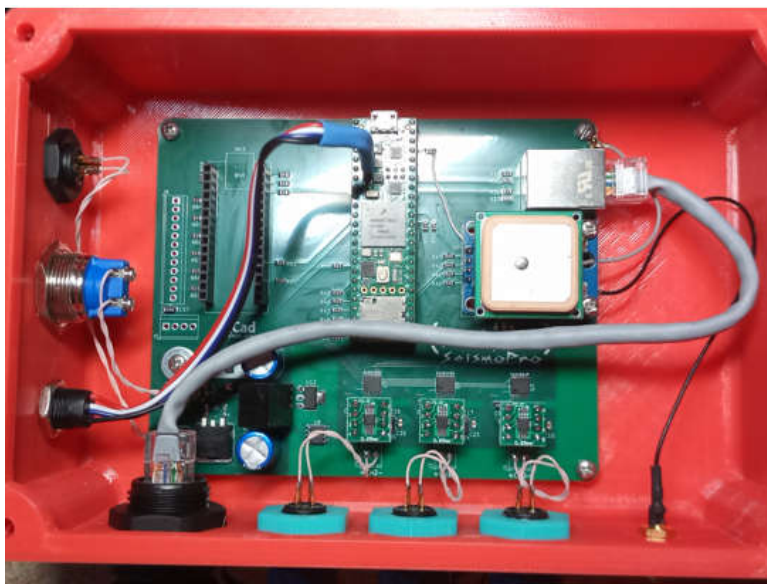


Рис. 1. Внешний вид сейсморегистратора.

Основу устройства составляют микроконтроллер MIMXRT1062 (Teensy 4.1), трёхосевые датчики GS-ONE LF и 24-битные АЦП AD7766. Система включает буферные усилители, фильтры и GPS-модуль для синхронизации времени. Питание обеспечивается от источника 9 – 15 В.

В процессе функционирования регистратора сейсмограммы в формате miniSeed записываются на microSD-карту, слот которой подключен к соответствующему аппаратному интерфейсу микроконтроллера. Кроме этого с помощью Ethernet PHY-трансивера DP83825, расположенного на плате Teensy, эти же данные посредством POST-запросов отправляются на удалённый веб-сервер, где приводятся к виду, пригодному для дальнейшего чтения и обработки нейросетевым клиентом.

В целях обеспечения согласованного взаимодействия всех компонентов системы и достижения детерминированного результата была разработана оптимальная конфигурация соединений, в которой перечисленные элементы были объединены в единый комплекс. На рис. 2 представлен ключевой функциональный блок электрической схемы – входная цепь и АЦП.

Схема канала АЦП повторяет рекомендации производителя, с разделением аналоговой и цифровой земли. SPI-интерфейс используется для передачи данных с минимизацией помех.

Остальные функциональные блоки электрической схемы не представляют существенного интереса в контексте данного исследования, в связи с чем их рассмотрение опущено, а полная схема отладочной платы, на базе которой сейсморегистратор разработан, приведена в [2].

Программное обеспечение (C++, Arduino IDE) управляет АЦП через прерывания, фильтрует данные (БИХ-фильтр 100 Гц), записывает их на microSD и передаёт по Ethernet. Синхронизация по GPS обеспечивает точную временную привязку.

С целью валидации разработанного сейсморегистратора было проведено натурное испытание в контролируемых условиях, приближённых к лабораторным. К устройству подключили электромагнитные сейсмодатчики, после чего выполнили регистрацию искусственно возбуждаемых механических колебаний. Воздействие генерировалось за счет свободного падения тестового груза массой $\sim 4,6$ г с высоты 1 м на расстоянии 5 м от датчиков. Полученные сейсмограммы (рис. 3) свидетельствуют о стабильной работе регистрирующей системы при частоте дискретизации 100 Гц.

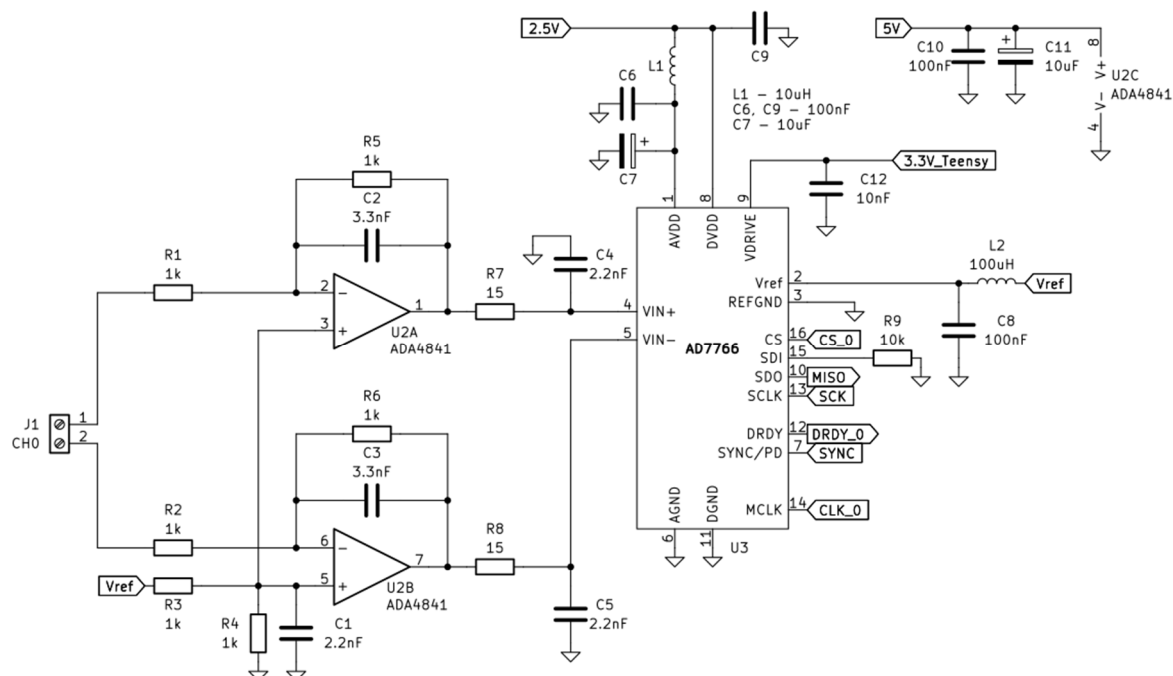


Рис. 2. Типовая электрическая схема канала АЦП.

Полученные данные демонстрируют следующие результаты. Амплитуды пиковых значений в каналах X, Y и Z составили 800, 779 и 1723 отсчётов (0,24, 0,23 и 0,51 мВ соответственно), что свидетельствует о преобладании вертикальной компоненты (Z) в зарегистрированном сигнале по сравнению с горизонтальными (X, Y). Уровни шумов во всех каналах были сопоставимы (161–172 отсчётов, 0,05 мВ), что подтверждает равномерность шумовых характеристик системы. Отношение сигнал/шум варьировалось от 13,9 дБ (X, Y) до 20,0 дБ (Z), отражая значительное превосходство полезного сигнала над фоновыми помехами, особенно в вертикальной компоненте. Полученные значения соответствуют типичным параметрам низкоамплитудной сейсмической регистрации, что подтверждает корректность работы сейсморегистратора в заданных условиях. Наблюдаемая асимметрия в чувствительности каналов обусловлена особенностями ориентации датчиков и анизотропией распространения колебаний искусственно сгенерированного сигнала.

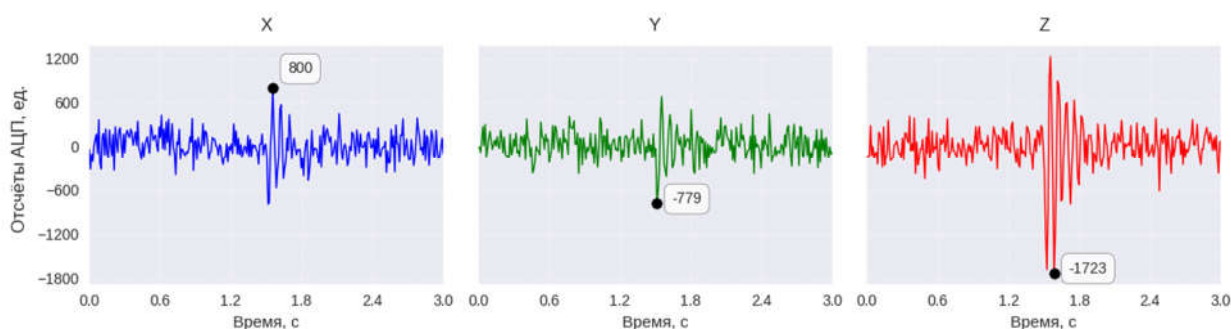


Рис. 3. Тестовые сейсмограммы.

Получившийся трёхканальный сейсморегистратор подтвердил свою работоспособность в приложении низкоамплитудной сейсмической регистрации. Устройство продемонстрировало стабильную чувствительность во всех каналах, с преобладанием вертикальной компоненты (Z) в зарегистрированном сигнале, что согласуется с направленностью искусственного воздействия. Отношение сигнал/шум на уровне 13,9–20,0 дБ и сопоставимые уровни шумов (0,05 мВ) свидетельствуют о высокой точности измерений и минимальном уровне помех.

Низкая себестоимость, модульная архитектура и возможность интеграции данного сейсморегистратора в распределённые сети мониторинга открывает широкие перспективы, которые делают его эффективным решением для задач сейсморазведки, изучения локальной тектоники, а также образовательных проектов. Дальнейшее развитие включает в себя полноценное полевое тестирование в областях с повышенной тектонической активностью, расширение динамического диапазона, улучшение системы обработки и хранения данных и др.

Разработанный сейсморегистратор представляет собой конкурентоспособную альтернативу коммерческим аналогам, сочетая доступность, надёжность и достаточную точность для профессионального использования в геофизических исследованиях.

1. Применение сейсмостанции «Сейсмопро» для изучения вулканической активности / К.С. Рябинкин [и др.] // Физика: фундамент. и прикл. исслед., образование : Материалы XXII Всерос. науч. конф. – Хабаровск, 2024. – С. 223-228. – EDN KEYVIL.

2. Teensy and Teensy++ Schematic Diagrams. URL: <https://www.pjrc.com/teensy/schematic.html> (Дата обращения: 16.07.2025)

УДК 535.399

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ МАКСЕНА Ti_3C_2

В.Г. Ефременко¹, Е.А. Антонычева¹, А.А. Ушков², А.В. Сюй², И.В. Мартынов², Б.Е. Позов²

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения (г. Хабаровск)

²Московский физико-технический институт (г. Долгопрудный)

oblako3@yandex.ru

Одним из многообещающих материалов для создания таких наночастиц является MX-фаза Ti_3C_2 , которая сочетает в себе свойства металлов и керамики. В данной статье рассматриваются оптические свойства наночастиц Ti_3C_2 в сравнении с Au и их потенциальные применения. Показано, что при уменьшении диаметра наночастиц Ti_3C_2 до 20 нм коэффициент фототермического преобразования достигает 0,999 в широком спектральном диапазоне от 600 до 800 нм.

В последние годы нанотехнологии и наноматериалы привлекают всё больше внимания благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам и широкому спектру потенциальных применений в области электроники, фотоники, медицины и энергетики. Особое место среди них занимают двумерные материалы, обладающие высокой проводимостью, гибкостью и возможностью тонкой настройки своих характеристик.

© Ефременко В.Г., Антонычева Е.А., Ушков А.А., Сюй А.В., Мартынов И.В., Позов Б.Е., 2025

Максены, являющиеся классом двумерных материалов, привлекают внимание исследователей благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам. Одним из наиболее изучаемых представителей этого класса является Ti_3C_2 , который относится к семейству MXenes. Наночастицы Ti_3C_2 обладают выдающимися оптическими свойствами, что делает их перспективными для применения в различных областях, включая оптоэлектронику, фотокатализ и сенсоры [1, 2]. В данной статье рассматриваются ключевые оптические характеристики Ti_3C_2 и их потенциальные применения.

Ti_3C_2 представляет собой двумерный материал, состоящий из слоев титана и углерода. Его структура включает в себя чередующиеся слои TiC и функциональные группы, такие как $-\text{OH}$, $-\text{O}$ или $-\text{F}$, которые могут находиться на поверхности. Эта уникальная архитектура обеспечивает высокую механическую прочность и проводимость, а также влияет на оптические свойства материала.

Ti_3C_2 демонстрирует высокую оптическую поглощаемость в широком диапазоне длин волн, что делает его подходящим для использования в солнечных элементах и фотокатализе. Исследования показывают, что Ti_3C_2 способен поглощать более 90 % света в видимом и инфракрасном диапазонах [2]. Это связано с наличием переходов электронов между валентной и проводящей зонами, а также с возможностью формирования экситонов.

Некоторые исследования указывают на наличие флуоресцентных свойств у Ti_3C_2 при определенных условиях [3]. Флуоресценция может возникать из-за дефектов в структуре или взаимодействия с окружающей средой. Эти свойства открывают новые возможности для использования Ti_3C_2 в биомедицинских сенсорах и маркерах, а также в системах оптической визуализации.

Ti_3C_2 обладает значительными нелинейными оптическими свойствами, что делает его интересным для применения в устройствах, использующих эффекты самофокусировки и генерации гармоник. Нелинейные эффекты могут быть использованы для создания высокочастотных лазеров и других оптоэлектронных компонентов.

Наночастицы Ti_3C_2 могут проявлять плазмонные резонансы, что делает их подходящими для использования в области плазмонной оптики. Эти эффекты могут быть использованы для усиления светового взаимодействия на наноуровне, что открывает новые горизонты для разработки наносенсоров и других оптоэлектронных устройств.

На рис.1 представлены спектры экстинкции, поглощения и рассеяния, а также эффективности фототермического преобразования для наночастиц Au диаметром 40 нм. На длине волны 500-520 нм максимальный коэффициент фототермического преобразования составляет 0,95 (рис.1). При уменьшении диаметра наночастиц Au до 20 нм коэффициент фототермического преобразования достигает 0,995. Но у золота есть один недостаток, оно эффективно работает в узком спектральном диапазоне, 500-520 нм. В то время как наночастицы максенов Ti_3C_2 обладают широким спектром поглощения в диапазоне 600-800 нм и высоким коэффициентом фототермического преобразования 0,99-0,995 (рис.2). При уменьшении диаметра наночастиц Ti_3C_2 коэффициент фототермического преобразования достигает 0,999 в широком спектральном диапазоне от 600 до 800 нм (рис.3).

Наночастицы с улучшенными оптическими свойствами могут быть использованы в солнечных элементах, светодиодах и фотодетекторах. Благодаря своим флуоресцентным свойствам такие наночастицы могут служить эффективными биомаркерами для визуализации клеток и тканей. Наночастицы могут использоваться в качестве катализаторов в реакциях фотокатализа благодаря своим уникальным оптическим свойствам.

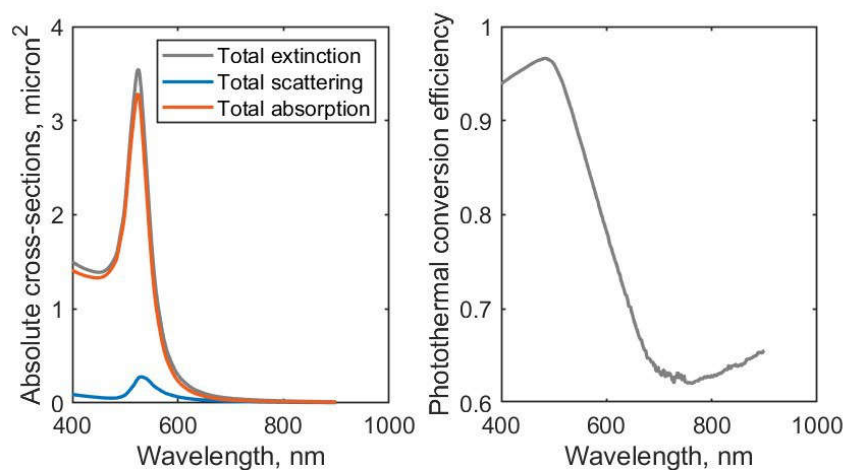


Рис.1. Оптические свойства наночастиц Au диаметром 40 нм.

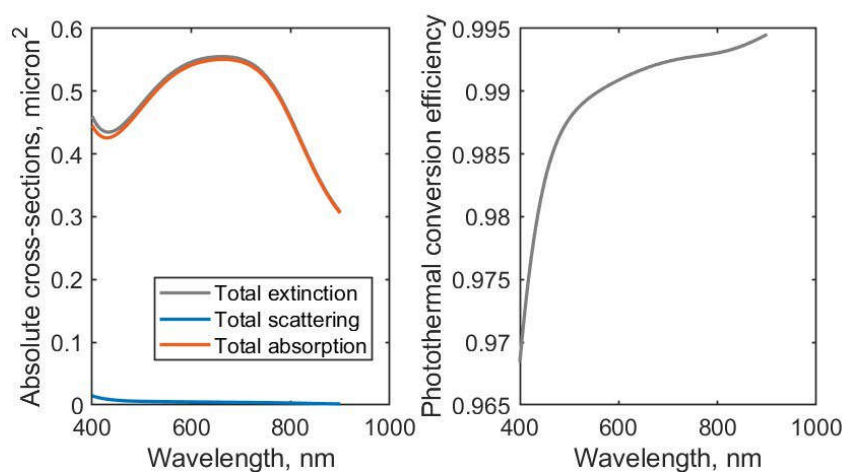


Рис.2. Оптические свойства наночастиц Ti_3C_2 диаметром 40 нм.

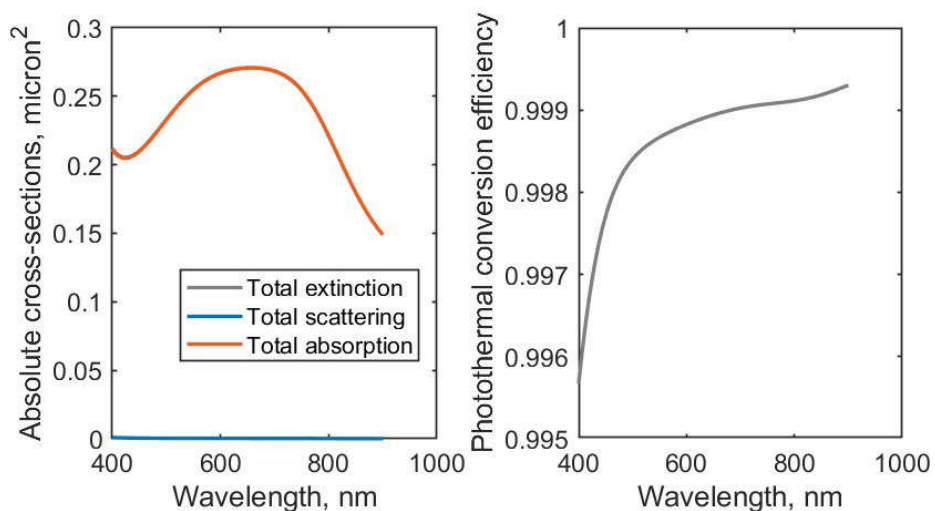


Рис.3. Оптические свойства наночастиц Ti_3C_2 диаметром 20 нм.

Оптические свойства наночастиц на основе максена Ti_3C_2 представляют собой многообещающую область исследований с большим потенциалом для практического применения. Уникальные характеристики этого материала открывают новые горизонты в области энергетики, экологии и информационных технологий. Будущие исследования должны сосредоточиться на оптимизации методов синтеза и модификации Ti_3C_2 для расширения его функциональных возможностей и улучшения его

характеристик. Исследование оптических свойств Ti_3C_2 продолжает оставаться актуальной темой, способствующей развитию новых технологий и материалов. Благодаря высоким фототермическим свойствам данные материалы становятся перспективными для биомедицинских применений в области тераностики, а также для фототермического катализа, выделения водорода, очищения воды, опреснения воды [4 – 6].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-10108, <https://rscf.ru/project/25-79-10108/>

1. Daria A. Panova, Gleb I. Tselikov, Georgy A. Ermolaev, Alexander V. Syuy, Dmitrii S. Zimbovskii, Olesya O. Kapitanova, Dmitry I. Yakubovsky, Arslan B. Mazitov, Ivan A. Kruglov, Andrey A. Vyshnevyy, Aleksey V. Arsenin, and Valentyn S. Volkov, "Broadband optical properties of Ti_3C_2 MXene revisited," Opt. Lett. 49, 25-28 (2024).

2. Renyuan Li, Lianbin Zhang, Le Shi, and Peng Wang. MXene Ti_3C_2 : An Effective 2D Light-to-Heat Conversion Material. ACS Nano 11(4). March 2017.

3. Syuy, A.V., Novikov, S.M., Tselikov, G.I. et al. Narrowband Photoluminescence in MXenes. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 87 (Suppl 3), S448–S452 (2023).

4. A. V. Syuy, I. V. Martynov, D. I. Tselikov, G. I. Tselikov, V. G. Efremenko, D. V. Dyubo, M. S. Gurin, D. S. Shtarev, A. V. Arsenin, V. S. Volkov. Efficient desalination of seawater under sunlight. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2024, Vol. 88, Suppl. 3, pp. S443–S449.

5. Tselikov, Gleb; Minnekhanov, Anton; Ermolaev, Georgy; Tikhonowski, Gleb; Kazantsev, Ivan; Dyubo, Dmitry; Panova, Daria; Tselikov, Daniil; Popov, Anton; Mazitov, Arslan; Smirnov, Sergei; Lipilin, Fedor; Ahsan, Umer; Orekhov, Nikita; Kruglov, Ivan; Syuy, Alexander; Andrei V., Kabashin; Chichkov, Boris; Sofer, Zdeněk; Arsenin, Aleksey; Novoselov, Kostya; Volkov, Valentyn S. Tunable Nanostructuring for van der Waals Materials. ASC Nano 2025, 19, 22820-22836.

6. Vladimir V. Starchenko, Maksim I. Paukov, Arina V. Radivon, Dmitry. I. Yakubovsky, Alexander I. Chernov, Alexey V. Shupletsov, Alexander V. Syuy, Aleksey V. Arsenin, Maria G. Burdanova, Yan Zhang, Shuang Sun, Gennady A. Komandin, Kirill I. Zaytsev, Aram A. Mkrtchyan, Yuriy Gladush, Albert G. Nasibulin, Dmitry V. Krasnikov, Mikhail V. Shashkov, Ivan S. Kazantsev, Mikhail S. Mironov, Gleb I. Tselikov, and Valentyn Volkov. Electrochemically and optically-switched terahertz electromagnetic interference shielding using MXenes. Physical Review Materials, 9, 074008 (2025).

УДК 53.087:538.93

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ В НАНОСУСПЕНЗИЯХ

В.И. Иванов¹, И.Н. Егоршин²

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения (г. Хабаровск)

²Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

В данной работе исследуется возможность формирования нанокристаллических структур в прозрачных наносuspensions под действием сил светового давления. В отличие от известных методов, основанных на термодиффузии микрочастиц, предлагаемый подход позволяет эффективно управлять осаждением наночастиц при высоких начальных концентрациях. На основе модели, учитывающей дрейф наночастиц в световом поле и диффузионные процессы, получено стационарное распределение концентрации. Результаты работы

открывают перспективы для управляемого синтеза наноструктур в жидких средах без использования сложных химических методов.

Широко известны химические методы формирования наноструктур (например, фотонных кристаллов) из жидкой фазы [1]. Однако недавние исследования демонстрируют ряд новых возможностей. Например, в работе [2] показано, как светоиндуцированная термодиффузия латексных микрочастиц в растворе приводит к образованию двумерного кристалла на охлаждающей поверхности в конвективном потоке жидкости. При этом концентрация микрочастиц увеличивалась в зоне светового пучка на несколько порядков. Для наночастиц реализация такого метода затруднена, поскольку коэффициент термодиффузии для них значительно меньше, чем для микрочастиц. В [3] показано, что силы светового давления можно эффективно использовать для осаждения наночастиц в наносuspензии.

В данной работе предлагается использовать силы светового давления для создания кристаллов из наночастиц в прозрачной наносuspензии.

Рассмотрим прозрачную наносuspензию, которая подвергается воздействию лазерного излучения с равномерным распределением интенсивности. В отличие от работы [3] начальная концентрация наночастиц не считается малой. В первом приближении можно предположить, что установившаяся скорость движения наночастиц в суспензии под влиянием светового поля линейно зависит от интенсивности излучения [3].

Динамика изменения концентрации наночастиц описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-D \frac{\partial C}{\partial x} - C(1-C)V \right), \quad (1)$$

где $C(z,t)$ – объемная доля дисперсной фазы; D – коэффициент диффузии; V – скорость дрейфа наночастиц.

В установившейся суспензии $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ получим: $-D \frac{\partial C}{\partial x} - C(1-C)V = 0$, $\frac{\partial C}{C(1-C)} = -\frac{V}{D} dx$.

После интегрирования:

$$\ln \frac{C}{1-C} = -\frac{V}{D} x + A, \quad \frac{C}{1-C} = \exp \left(-\frac{V}{D} x + A \right), \quad C = \frac{\exp \left(-\frac{V}{D} x \right) \exp(A)}{\left[1 - \exp \left(-\frac{V}{D} x \right) \exp(A) \right]}.$$

Найдем A из условий нормировки:

$$\int_0^L C dx = C_0 L, \quad (2)$$

где C_0 – начальная концентрация наночастиц; L – длина кюветы.

$$A = \ln \left(\frac{1 - \exp \left(\frac{V}{D} C_0 L \right)}{\exp \left(\frac{V}{D} C_0 L \right) - \exp \left(\frac{V}{D} L \right)} \right), \quad B = \exp(A) = \frac{1 - \exp \left(\frac{V}{D} C_0 L \right)}{\exp \left(\frac{V}{D} C_0 L \right) - \exp \left(\frac{V}{D} L \right)}.$$

В итоге решение одномерной задачи (1) с соответствующими граничными условиями на верхней и нижней границах в стационарном режиме выглядит как:

$$C = \frac{B \exp\left(-\frac{V}{D}z\right)}{\left(1 + B \exp\left(-\frac{V}{D}z\right)\right)}, \quad (3)$$

где B – константа, определяемая из условий нормировки.

Как показывают оценки при интенсивности излучения около МВт/м^2 , что для прозрачных наноматериалов вполне достижимо с использованием непрерывных лазерных источников, объемная доля наночастиц на дне кюветы может достигать единицы, формируя условия для образования кристаллической структуры

Предложенный метод создания коллоидных кристаллов из разбавленных наносuspensions открывает новые возможности для разработки наноматериалов, фотонных кристаллов и химических сенсоров. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования методов оптической диагностики наноматериалов [4].

Debora J.D., Lyon L.A. Thermoresponsive photonic crystals // J. Phys. Chem. B. -2000. – 104. – P.6327–6331.

1. Duhr S., Braun D. Two-dimensional colloidal crystals formed by thermophoresis and convection // Applied Physics Letters. – 2005. – 86. – P. 131921.

2. KheV.K., Ivanov V.I., Ivanova G.D., Chigrin P.G. Sedimentation of particles by the light pressure in nanosuspension // Proc. SPIE. -2017. – 10466. – P. 104664K.

3. Иванов В.И., Егоршин И.Н. Модуляционный метод светоиндуцированной псевдо-призмы в наносuspensions // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов.– №16. – 2024. – С. 134-139.

УДК 539.32

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.В. Казарбин, К.А. Драчёв, В.В. Савченко

Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

007504@togudv.ru

В работе представлены результаты комплексного исследования влияния пластификаторов, армирующих наполнителей и плазменной обработки на физико-механические и оптические свойства эпоксидных композитов на основе ЭД-20. Экспериментально установлены оптимальные концентрации пластификаторов ДЭГ-1 и ДБФ, определено влияние количества слоев углеродного волокна на механические характеристики, а также изучены изменения оптических свойств в результате плазменной обработки.

Интенсивное развитие авиакосмической промышленности, а также необходимость импортозамещения в различных ее отраслях, выдвигает перед инженерами и учеными новые задачи по обеспечению надежности работы различных систем при длительных сроках эксплуатации. В связи с этим актуальны исследования в области уменьшения влияния внешних факторов (УФ-излучение, потоки

© Казарбин А.В., Драчёв К.А., Савченко В.В., 2025

кислородной плазмы и т.д.) на функциональные материалы, применяемые в промышленности [1]. Кроме этого, ужесточающиеся современные требования к полимерным композиционным материалам в аэрокосмической, автомобильной и строительной отраслях диктуют необходимость создания материалов с контролируемым комплексом функциональных характеристик. Эпоксидные смолы, обладая уникальным сочетанием адгезионных свойств, химической стойкости, представляют особый интерес как основа для таких материалов. Однако их широкое применение ограничивается рядом недостатков, таких как, повышенная хрупкость, недостаточная ударная вязкость. В последние годы активно развиваются три основных направления модификации эпоксидных композитов: применение пластификаторов для регулирования эластично-прочностных характеристик, армирование волокнистыми наполнителями для создания анизотропных свойств и плазменная обработка поверхности для управления адгезионными свойствами составляющих композиционного материала.

Несмотря на большое количество работ в каждом из этих направлений в отдельности, практически отсутствуют комплексные работы, устанавливающие взаимосвязи между всеми тремя видами модификации и их совместным влиянием на функциональные характеристики материалов. Данная работа направлена на заполнение этого пробела. Цель данной работы выявить влияние модифицирующих добавок, армирования и плазменной обработки на акустические, механические и оптические свойства эпоксидных композитов на основе эпоксидиановых смол.

Для исследования были выбраны две базовые матрицы на основе эпоксидианового олигомера ЭД-20 (ГОСТ 10587-84) с отвердителем полиэтиленполиамином (ПЭПА) в массовом соотношении 10:1 и низковязкого двухкомпонентного эпоксидного состава ХТ116А/ХТ116Б (массовое соотношение 10:3). В качестве модифицирующих добавок использовались пластификаторы на основе диэтиленгликоля (ДЭГ-1) и дибутилфталата (ДБФ) в различных концентрациях от 1 до 50 масс.%. В качестве армирующих наполнителей использовались углеродное волокно и термопластичный эластомер стирол-бутадиен-стирол (SBS).

Для изготовления образцов эпоксидную смолу предварительно смешивали с пластификатором, затем в получившуюся композицию добавляли отвердитель. После смешивания и центрифугирования в течение 5 минут, составы заливались в формы, изготовленную из технического силикона в соответствии с ГОСТ 11262-2017 (рис.1). В процессе заливки производилось добавление армирующих составов, прошедших предварительную тепловую и плазменную обработку. Каждая партия состояла из не менее чем двух образцов.



Рис.1. Образец.

Измерения проводились с помощью измерительного комплекса Time WDW-50E для образцов, изготовленных в соответствии с ГОСТ 11262-2017, при комнатной температуре. Непосредственно измерялась зависимость силы растяжения F от изменения длины образцов Δl . Скорость перемещения подвижного захвата составляла 10 мм/мин. Результаты измерений регистрировались и отображались встроенным программным обеспечением персонального компьютера в виде графика и отчета результатов измерений.

Плазменная обработка проводилась с помощью емкостного высокочастотного разряда (ЕВЧР) низкого давления (0,15 Торр) напряжением 2 кВ с частотой внешнего поля 7 МГц. Более подробное описание установки для облучения плазмой твердых тел рассмотрено в работах [2, 3].

Акустические измерения проводились с использованием автоматизированной измерительной системы, включающая в себя генератор сигналов ГСПФ-052, цифровой осциллограф Bordo B-222, пьезоэлектрические преобразователи, программное обеспечение для хранения и последующей обработки сигналов. Скорость звука (C) определялась по времени прохождения импульса между датчиками с учетом поправочных коэффициентов, коэффициент затухания (α) – по уменьшению амплитуды переотраженных сигналов. Оптические измерения выполнялись на спектрофотометре СФ-2000 в диапазоне 190-1000 нм с шагом 1 нм.

Акустические исследования позволили детально изучить влияние пластификаторов на процесс отверждения. На рис. 2 представлены типичные кривые изменения скорости звука для композиций с различным содержанием ДЭГ-1.

Все композиции проходят три стадии отверждения: начальный период (0-2 ч), стадия гелеобразования (2-24 ч) и окончательное отверждение (24-168 ч). Добавление пластификатора увеличивает продолжительность начального периода на 15-20 % на каждые 5 % ДЭГ-1. Максимальная скорость звука снижается на 3-5 % при введении 10 % пластификатора.

Результаты механических испытаний представлены в таблице. Наблюдается нелинейная зависимость прочности от количества слоев армирования. Анализ изломов показал, что снижение прочности как правило связано с неполным пропиткой среднего слоя, образованием межслойных дефектов, неоптимальным распределением напряжений внутри образца.

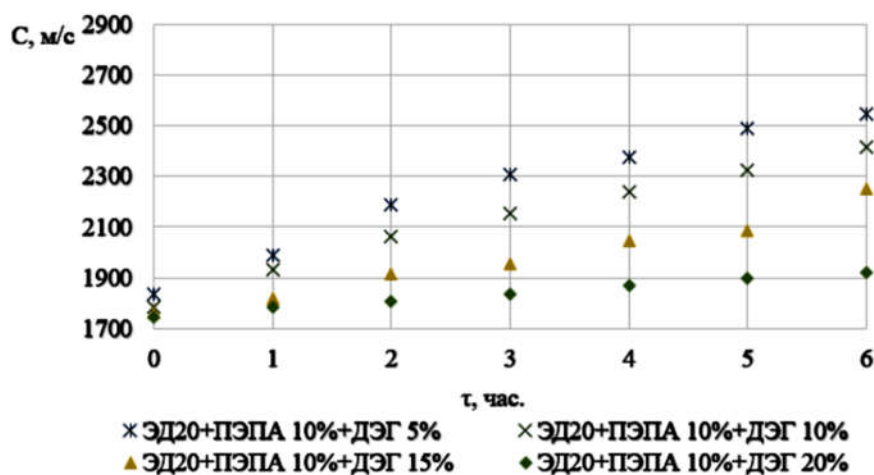


Рис.2. Зависимости скорости продольной волны от времени отверждения.

Механические характеристики армированных композитов

Количество слоев армирования	$\sigma_{\max}$, МПа	E, ГПа	ε , %
1	35,85	2,72	1,32
2	92,05	4,17	2,21
3	82,7	4,53	1,83

Плазменная обработка приводит к значительным изменениям поверхностного слоя в УФ-видимой области спектра. При этом происходит уменьшение пропускания (помутнение поверхности) на 30-35 % при $\lambda=400-700$ нм, появление новых полос поглощения на 280 и 320 нм, а также изменение оптической плотности поверхности. Плазменная обработка поверхности армирующего материала приводит к незначительному увеличению прочности образцов, что, по-видимому, связано с улучшением адгезионных свойств системы «смола-углеволокно».

Таким образом, установлены количественные и качественные зависимости между содержанием пластификаторов и кинетикой отверждения. Выявлено, что добавление пластификатора ДЭГ-1 увеличивает начальный этап отверждения на 15-20 %/10 %, добавление в качестве модификатора ДБФ снижает максимальную скорость звука на 3-5 % уже при концентрации в 10 %. При этом плазменная обработка позволяет контролируемо изменять поверхностные и оптические свойства. Определено, что оптимальное время обработки составляет 20-30 мин. При этом происходит снижение пропускания на 30-35 % в видимой области, появляется поверхностная пленка, улучшающая адгезию материала. Полученные результаты позволят в дальнейшем продолжить изучение комбинированного влияния пластификаторов и наполнителей на эксплуатационные свойства композиционных материалов и приступить к разработке многослойных структур с градиентом физико-механических свойств. Кроме этого, необходимо провести исследования по оптимизации режимов плазменной обработки армирующих материалов.

1. Degradation of Epoxy-Particles Composites Exposed to UV and Gamma Radiation / M. Torres [et al.] // Chemistry. 2023. Vol. 5. P. 559–570.

2. Круглов М. С., Пячин С. А., Бондарева Т. В. Установка для облучения твердых тел плазмой емкостного высокочастотного разряда низкого давления // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2020. № 4. С. 55–62.

3. Пошарникова, К. С. Оптические свойства модифицированных эпоксидиановых смол / К. С. Пошарникова, К. А. Драчев, М. С. Круглов // ТОГУ-СТАРТ: фундаментальные и прикладные исследования молодых : Материалы VI региональной научно-практической конференции, Хабаровск, 07–12 апреля 2025 года. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2025. – С. 227-231.

УДК 535:621

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТЕКОЛ ЭЛЕКТРОНИКИ И СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В НИХ

А.М. Кармоков, Х.Х. Лосанов, О.А. Молоканов, З.В. Шомахов

Кабардино-Балкарский государственный университет (г. Нальчик)

karmokov@kbsu.ru, molokanov@kbsu.ru

Экспериментально исследованы температурная зависимость и кинетика электропроводности и фазовых изменений стекол для электронной техники. Установлено влияние массопереноса под действием электрического поля на электропроводность и фазовые изменения в стеклах. Проведена оценка зависимости размера нанокристаллов, возникающих в структуре стекла, от температуры и времени изотермического отжига.

Электрофизические и эксплуатационные характеристики электронно-оптических преобразователей, в основном, определяется физико-химическими свойствами используемых функциональных материалов, например, таких как специальные стекла, используемых в микроканальных пластинах. В связи с этим, знание закономерности изменения электрофизических характеристик в зависимости от термодинамических воздействий на свойства поверхности и объема этих стекол является важным для технологии производства электронно-оптических преобразователей [1 – 4].

В настоящей работе исследованы закономерности фазовых превращений на поверхности и в

объеме свинцово-силикатного стекла С87-2 при различных термодинамических воздействиях и связанные с ними изменения физических и электрофизических свойств.

Результаты рентгеновского элементного и рентгенофазового анализа стекол С87-2 после различных термодинамических воздействий показывают, что при температурах от 400 °С до 550 °С в стеклах образуются кристаллические фазы, размеры и скорости роста которых зависят от температуры и времени изотермической выдержки образцов.

Анализ результатов свидетельствует о том, что в объеме стекол образуются в основном наноразмерные кристаллические фазы на основе SiO_2 и в незначительных количествах Pb и Pb_2O , причем дифракционные максимумы, соответствующие Pb и Pb_2O трудно разрешаются из-за совпадения в основном их параметров решетки. С повышением температуры отжига размеры кристаллофаз монотонно увеличиваются и со временем стабилизируются. Кинетика роста новой кристаллической фазы в исследованных стеклах приближенно согласуется с классической теорией Зельдовича для зародышей кристаллической фазы, что позволяет оценить параметры роста.

Из сравнения результатов исследования стекол после различных термодинамических воздействий следует, что при водородном восстанавливающем отжиге поверхность обогащается наноразмерными кристаллами Pb , Pb_2O и SiO_2 . Их содержание на поверхности превосходит объемное в $\sim 1,5 \div 2$ раза. В этом случае на поверхности фиксируются пики, соответствующие нескольким кристаллографическим ориентациям свинца.

Фазовые изменения на поверхности и в объеме стекол оказывают существенное влияние на электропроводность и диэлектрические свойства стекол. С повышением температуры электропроводность, как и следует ожидать, возрастает, причем энергия активации проводимости имеет два различных значения в низкотемпературной и высокотемпературной областях зависимости.

Очевидно, энергия активации в низкотемпературной области ответственна за стабильность работы стекла в составе электронно-оптических преобразователей, т.е. чем меньше энергия активации проводимости, тем выше стабильность работы конечного прибора применения.

Изотермический отжиг образцов приводит к изменению электропроводности стекла. В свинцово-силикатных стеклах проводимость уменьшается со временем отжига. По-видимому, это связано с образованием и ростом наноразмерных кристаллических фаз. Если во время экспериментов через образец пропусклся электрический ток, то это усиливало массоперенос и стимулировало рост новых фаз, так как при высоких температурах в стеклах считается преобладание ионной проводимости. Электропроводность монотонно уменьшается со временем и через 4–5 часов зависимость, практически, выполаживается [5 – 8].

Изменение размеров кристаллитов и проводимости стекла со временем согласуются между собой. Используя модель электропроводности, предложенную Максвеллом для неоднородной среды, состоящей из матрицы и сферических частиц в ней, и модель образования и роста новой кристаллической фазы Зельдовича, получено соотношение, связывающее скорость роста новой фазы $v = dr/dt$ и изменения проводимости в стеклах в виде:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{2}{3} R \left[\frac{(\sigma_2 - \sigma_1)(2\sigma_1 + \sigma)}{(\sigma - \sigma_1)(2\sigma_1 + \sigma_2)} \right]^{2/3} \frac{(2\sigma_1 + \sigma_2)(\sigma_1 + \sigma)}{(\sigma_2 - \sigma_1)(2\sigma_1 - \sigma_2)} \frac{d\sigma}{dt} = K \frac{d\sigma}{dt}, \quad (1)$$

где R – половина среднего расстояния между частицами новыми фазами; σ , σ_1 , σ_2 – электропроводность среды, внешней (между частицами) и внутренней частей шара, соответственно; r – радиус частицы новой фазы.

Используя уравнение (1) и результаты рентгенофазового анализа стекол С87-2, экспериментально полученные кинетические кривые электропроводности и построены зависимости скорости роста наночастиц от времени отжига и изменение размера частиц со временем отжига.

С увеличением времени отжига скорость роста нанокристаллов. Анализируя полученные кривые для трех изученных марок стекол можно сказать, что все они приблизительно аппроксимируются полиномом третьей степени.

Интегрируя полученные зависимости для каждого стекла при температурах 400 °С, 450 °С и 500°С, построены зависимости роста среднего радиуса нанокристаллов от времени отжига. Полученные зависимости показывают, что наноразмерные кристаллические частицы растут, и со временем их размеры монотонно стабилизируются.

Анализируя температурные зависимости проводимости стекла С87–2 после трех циклов нагрев – охлаждение (нагрев до 400 °С, 450 °С и 500°С) выявлено что, после второго нагрева при температурах ниже 200 °С электропроводность уменьшается приблизительно в 10 раз, а энергия активации проводимости снижается на ~30 % по сравнению с первым нагревом. Третий нагрев заметных изменений в уровень электропроводности и энергию активации не вносит.

Таким образом, отжиг свинцово-силикатного С87-2 приводит к образованию наноразмерных кристаллов, что, по-видимому, стабилизирует структуру. Это, в свою очередь, приводит к снижению электропроводности и энергии активации проводимости при температурах от комнатной до ~200 °С, что, на наш взгляд, является важным для надежности работы приборов применения – электронно-оптических преобразователей.

1. Кулов, С.К. Наноразмерные неоднородности на поверхности свинцово силикатного стекла для МКП / С.К. Кулов, А.М. Кармоков, О.А. Молоканов // Известия РАН. Серия Физическая. – 2009. – Т. 73. – № 11. – С. 1649–1651.

2. Кармоков, А.М. Электропроводность и массоперенос в стеклах микроканальных пластин при различных условиях отжига / А.М. Кармоков, О.А. Молоканов, З.В. Шомахов // X Юбилейная международная научная конференция «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии»: сборник материалов, Ставрополь (17-22 октября 2010 года). – Ставрополь: СевКавГТУ, – 2010. – С. 418–419.

3. Шомахов, З.В. Температурная зависимость и кинетика электропроводности свинцово-силикатного стекла / З.В. Шомахов, О.А. Молоканов, С.К. Кулов, А.М. Кармоков // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2010. – № 1. – С. 102–108.

4. Кармоков, А.М. Электропроводность и электромассоперенос свинцово-силикатного стекла, применяемого в электронно-оптических преобразователях / А.М. Кармоков, О.А. Молоканов, З.В. Шомахов // III Международная научно-техническая конференция «Микро- и нанотехнология в электронике»: материалы конференции, Нальчик (11-16 октября 2010 года). – Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет, 2010. – С. 296–301.

5. Шомахов, З.В. Электропроводность свинцово-силикатного стекла в процессах нагрева и изотермического отжига / З.В. Шомахов, О.А. Молоканов, А.М. Кармоков // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 7. – С. 14-17.

6. Шомахов, З.В. Влияние температуры изотермического отжига на образование нанокристаллов в стекле С78-5 / З.В. Шомахов, В.И. Альмяшев, А.М. Кармоков, Р.Ш. Тешев, О.А. Молоканов // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2011. – Т. I. – № 4. – С. 5–7.

7. Кармоков, А.М. Изменение электропроводности свинцово-силикатного стекла С87-2 в процессе изотермической выдержки / А.М. Кармоков, О.А. Молоканов, О.О. Молоканова, З.В. Шомахов // Международный междисциплинарный симпозиум «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы»: труды симпозиума, Нальчик (17-21 сентября 2013 года). – Нальчик–Ростов-на-Дону–Туапсе: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2013. – С. 103–106.

8. Кармоков, А.М. Электропроводность боратно-бариевого стекла С78-5 в процессе образования и роста нанокристаллов / А.М. Кармоков, О.А. Молоканов, З.В. Шомахов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. – Вып. 5. – С. 120–123.

АНАЛИТИКА БОЛЬШИХ ДАННЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**Е.В. Пустовалов, А.Н. Федорец, В.В. Ткачев, А.М. Фролов, Г.С. Крайнова, И.Н. Наливайко***Дальневосточный федеральный университет (г. Владивосток)**pustovalov.ev@dvfu.ru*

Представлены результаты разработки лабораторного сервиса комплексной обработки изображений на основе технологии больших данных и искусственного интеллекта с возможностью анализа изображений из различных источников, адаптивного обучения по требованию заказчика, обеспечение хранения, поиска, анализа, в том числе с привлечением технологии искусственного интеллекта, адаптированной к предметной области заказчика. Показано применение технологии к массиву изображений структуры поверхности различных материалов.

В настоящее время технология анализа больших данных основной акцент делает на обработку числовых и текстовых данных [1, 2], тогда как анализ изображений методами искусственного интеллекта и больших данных существенно отстает [3]. Таким образом разработка комплексного сервиса по работе с большими данными, на основе метаинформации, распознавания текста и классификации актуальна [4]. Особенно остро стоит проблема анализа изображений, получаемых в ходе научных исследований, обусловленная наличием большого разнообразия изучаемых явлений и материалов. Например, при анализе данных с БАК (большого адронного коллайдера) используется обработка изображений, компьютерное зрение и методы глубокого обучения, что позволяет получать новые научные результаты [5], в электронной микроскопии начинают применяться нейросети и методы глубокого обучения [6, 7]. Комплексный анализ изображений методами ИИ и БД востребован в системах контроля качества, мониторинга рабочих процессов по ISO 9000/10000 широкого круга предприятий реального сектора экономики. В настоящий момент по результатам исследований только 13 % респондентов в некоторой степени используют сервисы ИИ и БД для анализа изображений [8].

Изображения, получаемые в результате научных исследований, содержат несколько типов данных: метаданные, текстовые на изображении и, собственно, само изображение. Например, на рис. 1 приведены несколько изображений поверхности материалов.

Метаинформация вносится программным обеспечением оборудования, текстовые данные на изображении представляют собой комбинацию аппаратных и пользовательских данных. Все эти типы данных требуют разных подходов для анализа и обработки. Так изображение рис.1, а содержит следующую метаинформацию: DataSize=2560x1920; PixelSize=13.40794 nm; SignalName=SE; AcceleratingVoltage=15000 Volt; DecelerationVoltage=0 Volt; Magnification=3700; WorkingDistance=8800 um; EmissionCurrent=83000 nA. Эти параметры необходимы как для обеспечения повторяемости условий исследований, так и для сравнительного и многомасштабного анализа. Поскольку в настоящее время в лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений ДВФУ накопилось более 200 тысяч изображений структуры различных материалов с приростом несколько сотен в неделю, то актуальным становится вопрос создания системы обработки изображений на основе технологий больших данных и искусственного интеллекта.

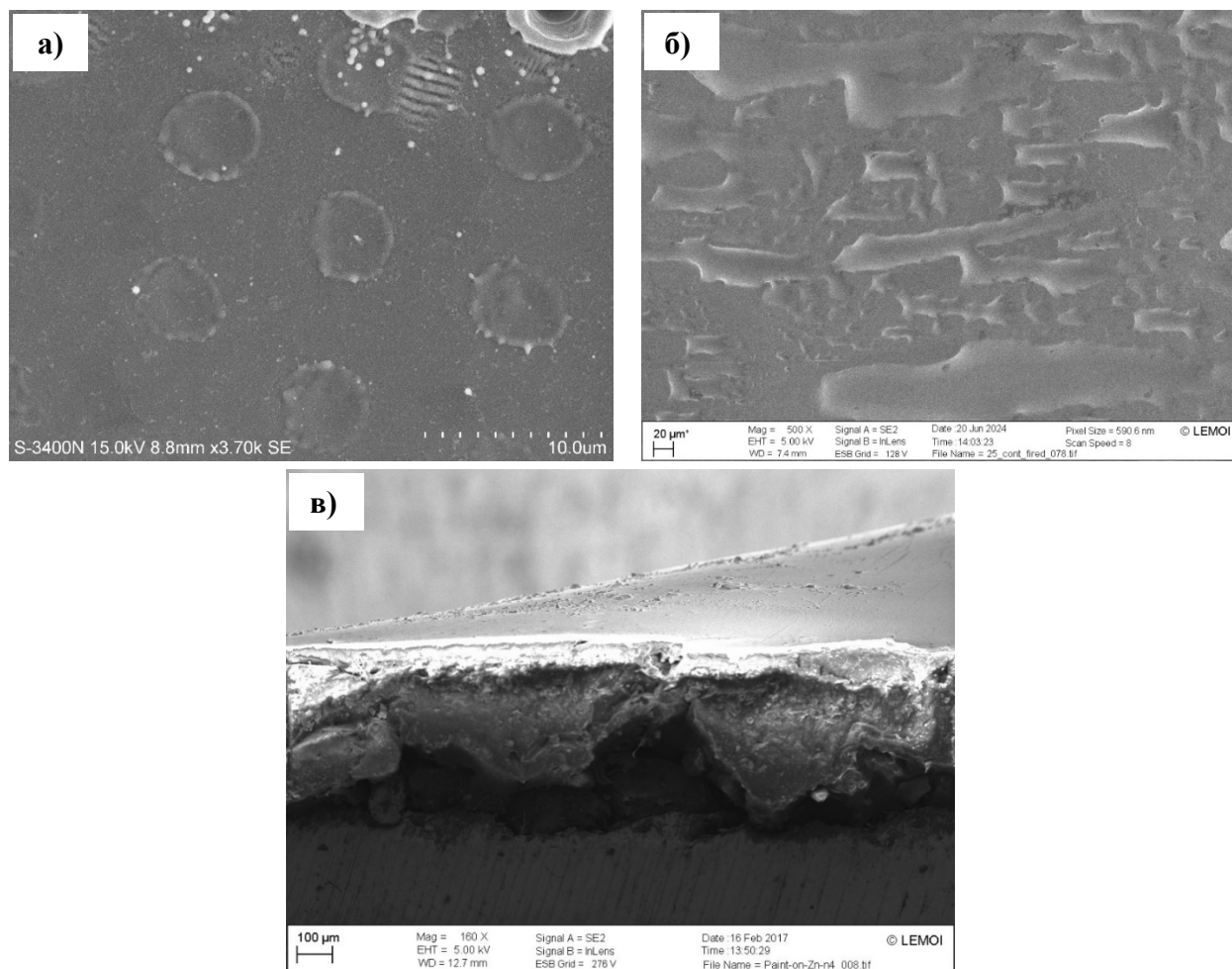


Рис. 1. Изображения поверхности: а) результатов лазерной абляции аморфного сплава; б) структура контактной поверхности ленты аморфного сплава; в) поперечный срез окрашенной металлической поверхности с коррозией.

Система хранения и обработки использует сервисы экосистемы озеро данных Hadoop с обработчиками (MapRed, Spark), что позволяет обрабатывать большие массивы данных в параллельном режиме, также обеспечивая распределенное отказоустойчивое хранение. Такой подход обеспечит оперативную обработку данных сокращая сроки анализа изображений. Для оперативной обработки поступающих изображений разработан микросервис на JAVA сканирующий сетевую файловую систему, обновляющий список файлов, извлекая метаданные. Для хранения метаданных используется Apache HBase с распределенной файловой системой Hadoop (HDFS). Интеграция Hbase и sql-интерфейса (HiveQL) Apache Hive предоставляет пользователю возможность оперирования данными и выгрузки по запросу в HDFS. Формирование и фильтрация данных для статистики и отчетов осуществляется связкой сервисов расписаний Apache Airflow и Apache Spark. Первый позволяет создавать расписания, планировать и мониторить работу программных модулей в форме направленных ациклических графов (DAG), тогда как второй (Spark) является библиотекой обработки и анализа больших данных. В нашем случае для Spark разработаны модули на JAVA для фрагментации изображений на текстовую и содержательную часть и извлечения текстовой информации из изображений. Выделенная текстовая часть также размещается в Hbase. Фрагмент изображения без текста размещается в HDFS. В Airflow создано расписание определяющее время и порядок выполнения операций, обработка ошибок.

Построена тестовая сверточная сеть с тремя и пятью сверточными слоями, несколькими вариантами функций активации, полносвязным слоем. Наилучшие результаты показал вариант нейронной сети с пятью сверточными слоями и сигмоидной функцией активации.

Развернуты и настроены два кластера Hadoop (NDFS, MapRed, Hive, Spark, Yarn, Zookeeper): 7 узлов 28 ядер, 150 Гб RAM, 1.5 Тб HDD; 5 узлов 20 ядер, 160 Гб RAM, 4.6 Тб HDD. Тестирование показало требуемую производительность от 100 до 1000 изображений за 24 часа в зависимости от размеров. Обучение нейросети на тестовой выборке 1000 изображений показало уровень ошибки в 37 % при определении класса исследуемого материала по его изображению. Сильное влияние на качество оказывает физический размер точки на изображении (pixel size), что связано с увеличением. Для обзорных изображений с увеличением 150-1000 крат уровень ошибки снижается до приемлемых 12 %. Это говорит о необходимости группировки изображений в наборы, получаемые в ходе исследования одного объекта, но с разными параметрами эксперимента. На тестовом массиве было выделено 18 классов изображений для 5 типов материалов, что демонстрирует необходимость введения дополнительных водных параметров для разработанной свёрточной нейронной сети.

-
1. Cloud Vision [Электронный ресурс] URL: <https://cloud.google.com/vision> , свободный ресурс – Загл. с экрана. Язык англ. Дата обращения: 01/06/2025
 2. Amazon Recognition / <https://aws.amazon.com> , свободный ресурс – Загл. с экрана. Язык англ. Дата обращения: 01/06/2025
 3. Image Processing service <https://www.uniquesdata.com/image-processing-services/> , свободный ресурс – Загл. с экрана. Язык англ. Дата обращения: 01/06/2025
 4. Image Processing service / <https://roadmap.sh/projects/image-processing-service> , свободный ресурс – Загл. с экрана. Язык англ. Дата обращения: 01/06/2025
 5. A. Schwartzman et al Image Processing, Computer Vision, and Deep Learning: new approaches to the analysis and physics interpretation of LHC events / A. Schwartzman, M. Kagan, L. Mackey, B. Nachman and L. De Oliveira// J. Phys.: Conf. Ser. - 2016 . - V.762. – P.012035.
 6. Loïc Grossetête et al Principle of TEM alignment using convolutional neural networks: Case study on condenser aperture alignment / Loïc Grossetête, Cécile Marcelot, Christophe Gatel, Sylvain Pauchet, Martin Hytch// Ultramicroscopy. – 2024. – V.267. – P.114047.
 7. Jeffrey M Ede Deep learning in electron microscopy// Mach. Learn.: Sci. Technol. – 2021. – V.2 – P.011004
 8. Нейросети для бизнеса: зачем нужны, как использовать и где искать / <https://sberbusiness.live/publications/neiroseti-dlya-biznesa-zachem-nuzhni-kak-ispolzovat-i-gde-iskat> , свободный ресурс – Загл. с экрана. Язык рус. Дата обращения: 01.08.2025

УДК 535.211

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИИ ПЛЕНКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

С.А. Пячин, Н.Н. Рекунова, А.И. Щербатюк

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения (г. Хабаровск)
pyachin@mail.ru*

В работе приведены результаты моделирования деформации полимерной пленки, возникающей в условиях лазерного облучения. Изучено влияние радиуса и плотности мощности лазерного луча на температуру и изменение рельефа пленки за счет светоиндуцированной деформации. Показано, что повышение плотности мощности излучения приводит к росту температуры и уменьшению радиуса кривизны полимерной пленки, что качественно совпадает с результатами экспериментов.

Полимерные материалы имеют достаточно широкое распространение во всех отраслях народного хозяйства из-за их уникальных свойств, прежде всего, благодаря способности полимеров испытывать значительные деформации без разрушения. При определенных условиях их деформация может быть упругой с восстановлением формы и размеров после снятия нагрузки. Управление формой изделий из полимеров является важной задачей и может быть использовано в различных технических приложениях. Одним из механизмов изменения рельефа поверхности полимерной пленки является контролируемый нагрев с последующим остыванием. В качестве теплового источника можно использовать лазерное излучение [1, 2]. Цель работы заключалась в моделировании изменения кривизны поверхности полимерной пленки при ее нагреве в условиях воздействия лазерного излучения.

Компьютерное моделирование температурного поля и величины деформации тонкой пластины от теплового источника, в нашем случае – лазерного излучения, проводили с помощью универсального программного комплекса для расчётов динамики и прочности методом конечных элементов SIMULIA Abaqus [3]. Объектом исследования являлась квадратная тонкая пластина размером 200×200 единиц, что соответствовало области 30×30 мм. Толщина – 60 мкм (0,4 единицы). Для расчета использовали исходные данные о свойствах материала: плотность – 1400 кг/м³; удельная теплоемкость – 1050 Дж/(кг·град); теплопроводность – 0,24 Вт/(м·град); коэффициент поглощения излучения – 94 %. Модуль Юнга – 3 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,3. Начальная температура равна 25 °С.

Для определения параметров теплового источника, возникающего в зоне действия лазерного потока, была измерена интенсивность излучения на разном расстоянии от центра луча с помощью фотодиода ФД-22К. Установлено, что в центре пятна мощность теплового потока примерно одинакова, но резко убывает к границе лазерного луча с радиусом R_0 . Распределение плотности светового потока можно описать выражением

$$f(r) = I_m \left(\frac{\pi}{2} - \arctan(\mu(r - \Delta)) \right). \quad (1)$$

где I_m – интенсивность в центре луча; μ , Δ – постоянные параметры.

При изменении размеров области облучения пленки общая мощность лазерного луча не изменялась, поэтому

$$P = 2\pi \int_0^{R_0} r f(r) dr = const. \quad (2)$$

Исходя от радиуса области облучения R_0 и выполнения условия (2), были подобраны параметры I_m и μ так, чтобы мощность луча P была равна 54 мВт. В таблице приведены найденные параметры, соответствующие разным условиям облучения. На рис. 1 показаны радиальное распределение плотности мощности светового потока, падающего на пленку, для разных радиусов лазерного луча.

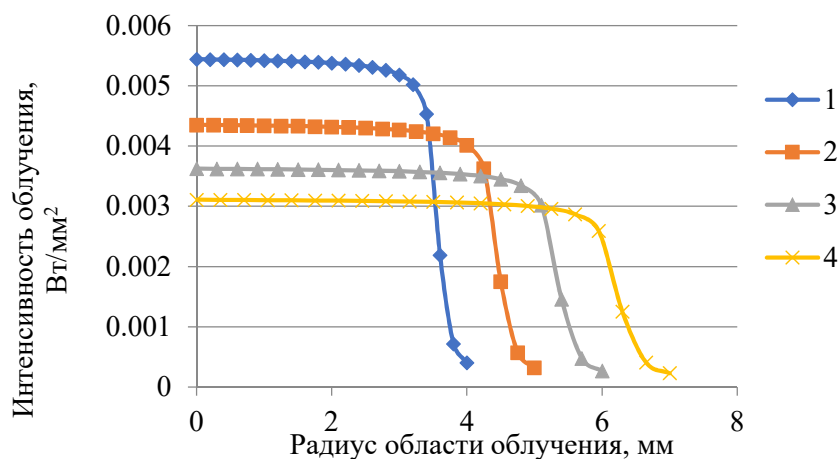


Рис. 1. Радиальное распределение интенсивности лазерного излучения. Радиус области воздействия излучения: 1 – 4 мм; 2 – 5 мм; 3 – 6 мм; 4 – 7 мм.

Параметры уравнений (2), описывающих пространственно-энергетические характеристики лазерного излучения, падающего на пленку

Параметр уравнения	Радиус лазерного луча R_0 , мм			
	4	5	6	7
I_m , мВт/мм ²	1,75	1,40	1,17	0,99
μ , мм ⁻¹	9,85	7,88	6,57	5,63
Δ , мм	3,57	4,45	5,35	6,24

Результаты вычисления температурного поля в полимерной пленке при воздействии лазерного луча с разной плотностью мощности и радиусами от 4 до 7 мм показаны на рис. 2. На сносках на рис. 2 представлена градация цвета в зависимости от температуры. Толщина пленки в 500 раз меньше ее длины, поэтому можно считать, что температура одинаковая по глубине рассматриваемой пластины. На рис. 2 видно, что с увеличением радиуса лазерного луча растут размеры области с более высокой температурой по сравнению с краями. В центре области воздействия температура уменьшается с 61,9 °С до 46,1 °С при снижении плотности мощности теплового потока с 3,5 мВт/мм² до 2,0 мВт/мм².

Данные о температурном поле были использованы для расчета термоупругих напряжений и деформаций, возникающих в тонкой квадратной пластине. Если допустить сдвиг боковых сторон квадратной пластины по осям X и Y , но запретить их перемещение по оси Z , то при нагреве центральная часть пластины поднимается, а края пластины расходятся в горизонтальном направлении. При этом, смоделированный рельеф деформированной пластины под действием нагрева в области падения лазерного луча по форме совпадает с профилями полимерной пленки, наблюдаемых при проведении экспериментов по светоиндуцированной деформации пленки [4]. На рис. 3 показаны профили пленки при воздействии лазерных лучей с разными радиусами и интенсивностями. Анализируя изображения, можно констатировать, что с увеличением радиуса лазерного луча, сопровождаемого снижением интенсивности излучения, рельеф поверхности пленки изменяется. При радиусе луча, равном 4 мм, центральная область пленки (рис. 3, а) более выпуклая, чем при радиусе 7 мм (рис. 3, г).

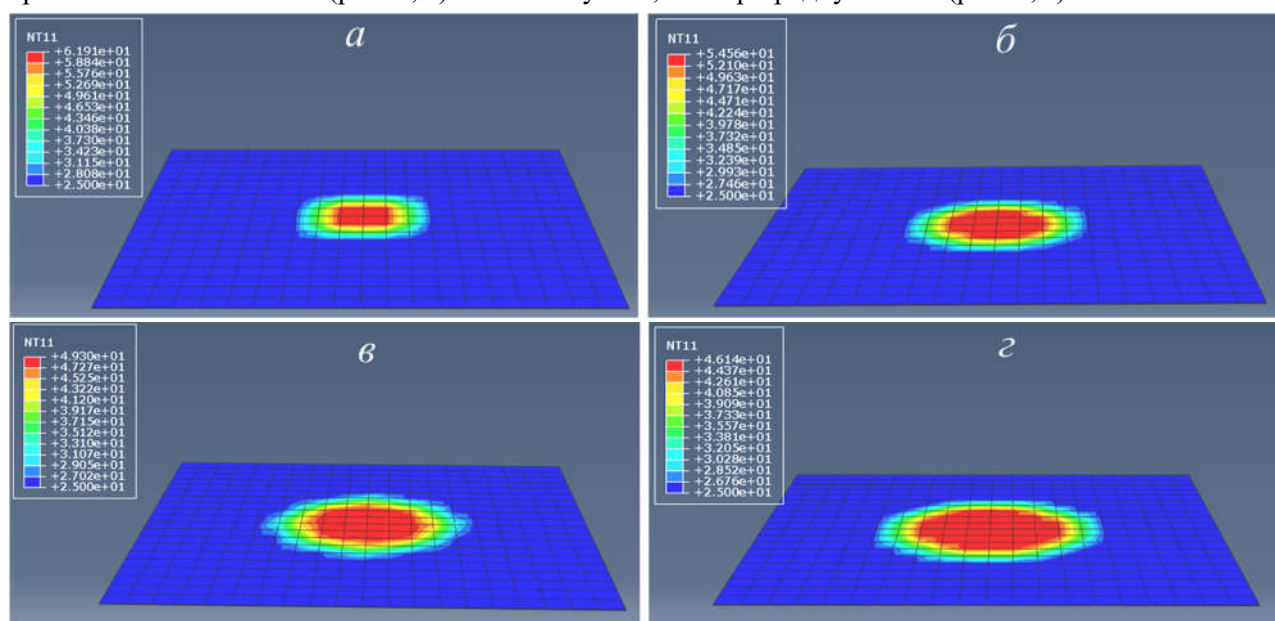


Рис. 2. Распределение температуры в пластине в условиях воздействия лазерного луча радиусом:
а) 4 мм; б) 5 мм; в) 6 мм; г) 7 мм.

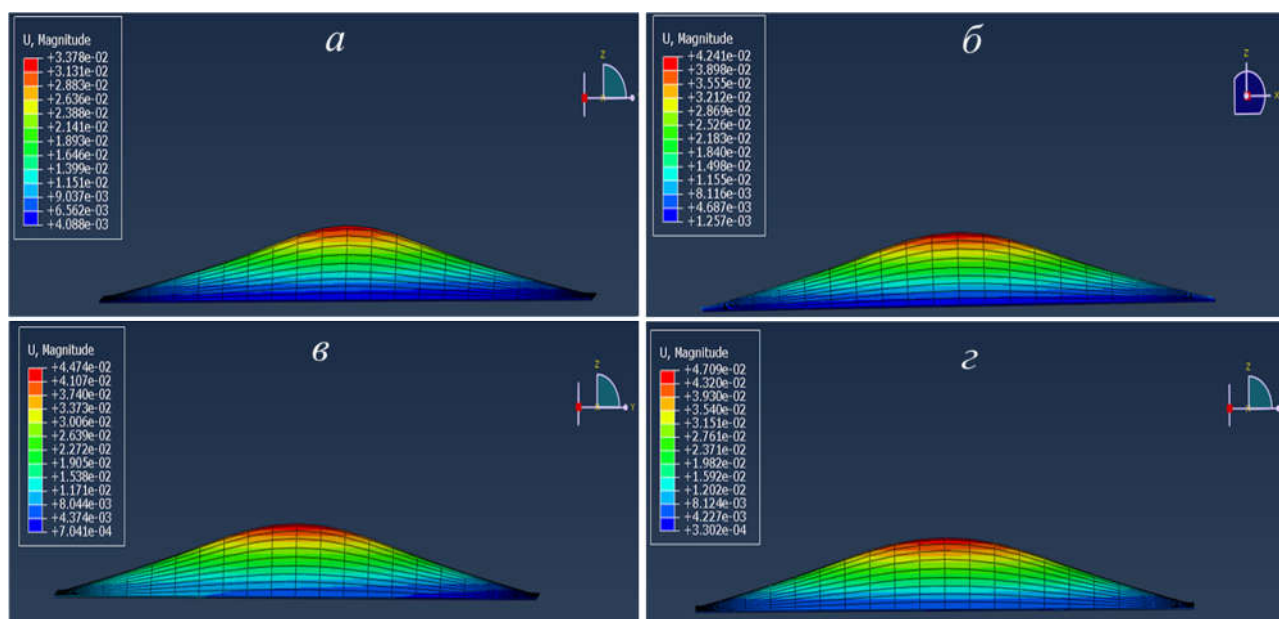


Рис. 3. Деформация пленки при нагреве лазерным лучом с фиксацией перемещения боковых сторон по Z (вид сбоку): при воздействии лазерного излучения разной интенсивности и радиуса:

- 1 – $I_m = 1,75 \text{ мВт/мм}^2$, $R_0 = 4 \text{ мм}$; 2 – $I_m = 1,4 \text{ мВт/мм}^2$, $R_0 = 5 \text{ мм}$; 3 – $I_m = 1,17 \text{ мВт/мм}^2$, $R_0 = 6 \text{ мм}$;
4 – $I_m = 1,0 \text{ мВт/мм}^2$, $R_0 = 7 \text{ мм}$.

Для сравнения радиуса кривизны поверхности пленки профили для разных условий лазерного воздействия были наложены друг на друга, они представлены на рис. 4. Поскольку высоты деформированных пленок разные, поэтому они приведены в относительных единицах $\xi = h / h_{\max}$, где $h_{\max}$ – высота в центре изогнутой пластины.

Как видно из рисунка, воздействие лазерного луча с меньшим диаметром при одинаковой полной мощности приводит к деформации пленки с меньшим радиусом кривизны поверхности, что качественно совпадает с результатами экспериментальных исследований [4].

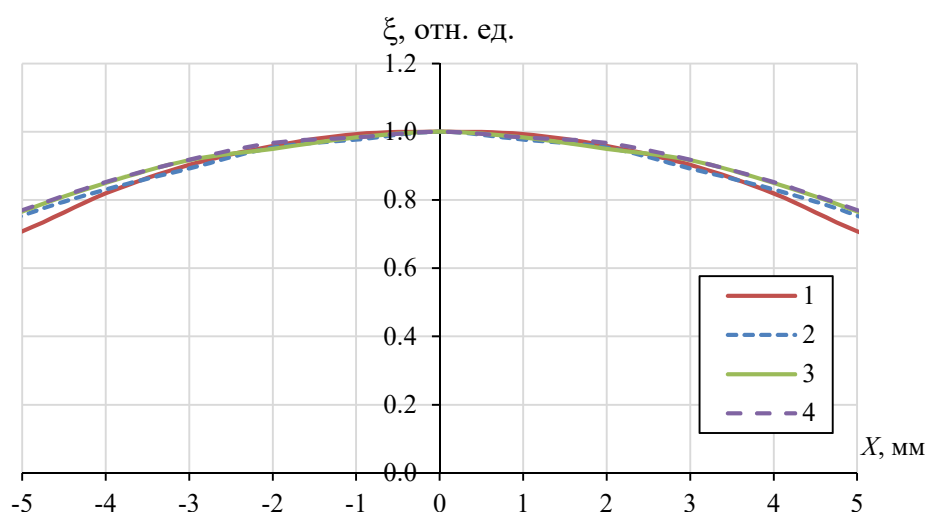


Рис. 4. Кривизна поверхности пластины при воздействии лазерного излучения разной интенсивности и радиуса: 1 – $I_m = 1,75 \text{ мВт/мм}^2$, $R_0 = 4 \text{ мм}$; 2 – $I_m = 1,4 \text{ мВт/мм}^2$, $R_0 = 5 \text{ мм}$; 3 – $I_m = 1,17 \text{ мВт/мм}^2$, $R_0 = 6 \text{ мм}$; 4 – $I_m = 1,0 \text{ мВт/мм}^2$, $R_0 = 7 \text{ мм}$.

В целом можно констатировать, что выполнение компьютерного моделирования с помощью программы SIMULIA Abaqus может быть использовано для описания процессов нагрева и деформации

полимерной тонкой пленки. Такие вычисления приводят к качественно правильным результатам, которые не противоречат экспериментальным данным. Результаты работы могут быть использованы для создания лазерных устройств, применяемых для нужд фотоники и оптоинформатики, материаловедения, а также используемых для управления материалами с памятью формы.

1. Иванов В. И., Окишев К.Н., Рекунова Н. Н. Деформация полимерной пленки под действием лазерного излучения // Бюллетень научных сообщений. – 2014. – № 19. – С. 52–55.

2. Рекунова Н. Н., Щербатюк А. И., Зиссер И. С., Касьянов И. А., Пячин С. А. Определение коэффициента термического расширения полимерной пленки методом лазерной деформации // Бюллетень научных сообщений. – 2023. – № 28. – С. 49–55.

3. Рыжов С. А., Ильин К. А., Тропкин С. Н., Нуштаев Д. В. Бородин А. К. Левадный Е. В., Мальгин М. Г., Бородин А. К., Миронова А. В. «SIMULIA Abaqus. Начало работы»: Учебное пособие. М.: Изд-во ООО «ТЕСИС», 2024. – 311 с.

4. Рекунова Н. Н., Щербатюк А. И., Зиссер И. С., Иванов В. И., Пячин С. А. Управление кривизной линзы из полимерной пленки лазерным пучком // Бюллетень научных сообщений. – 2024. – № 29. – С. 90–95

УДК 535.016

ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ НАНОЧАСТИЦ НИОБАТА ЛИТИЯ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ

А.В. Сюй¹, И.А. Завидовский¹, Д.И. Целиков^{1,2}, И.В. Мартынов¹, Н.В. Сидоров³, М.Н. Палатников³

¹Московский физико-технический институт (г. Долгопрудный)

²Московский инженерно-физический институт (г. Москва)

³Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева (г.Апатиты)
alsyuy271@gmail.com

В последние десятилетия фотокаталитические материалы привлекают значительное внимание исследователей благодаря своим уникальным свойствам и широкому спектру применения в области очистки окружающей среды, энергетики и фотоники. Одним из перспективных направлений является использование аморфных наночастиц, которые обладают высокой реактивностью и эффективностью в фотокаталитических процессах. В данной статье рассматриваются фотокаталитические свойства аморфных наночастиц ниобата лития, синтезированных методом лазерной фрагментации. Этот метод позволяет получать наночастицы с контролируемыми характеристиками, что открывает новые горизонты для их применения в различных областях. Исследование фотокаталитических свойств аморфных наночастиц ниобата лития может внести значительный вклад в развитие новых решений для решения актуальных проблем современности, таких как загрязнение окружающей среды и устойчивое использование ресурсов.

Фотокатализ – это процесс, в котором свет используется для ускорения химических реакций с помощью катализаторов. В последние годы фотокаталитические материалы привлекают внимание благодаря своей способности эффективно разлагать органические загрязнители и производить чистую энергию. Одним из многообещающих материалов для фотокатализа являются аморфные наночастицы ниобата лития (LiNbO_3), которые обладают уникальными оптическими и электрохимическими свой-

ствами. Синтез этих наночастиц методом лазерной фрагментации открывает новые возможности для их применения в экологически чистых технологиях [1, 2].

Синтез аморфных наночастиц ниобата лития производится методом лазерной фрагментации (рис.1), который является высокоэффективным способом получения наночастиц, который основан на лазерном воздействии на порошок ниобата лития в воде.

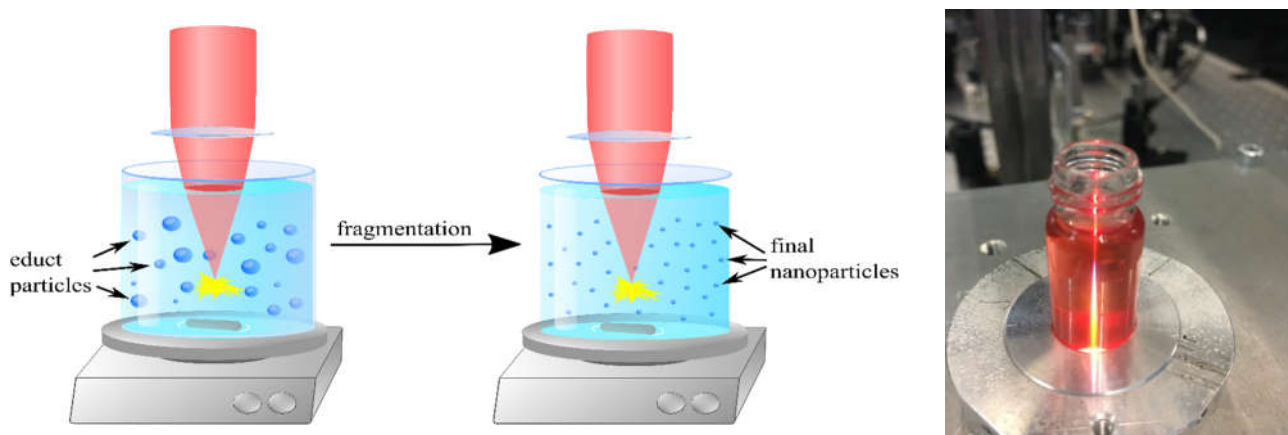


Рис.1. Схема лазерной фрагментации.

При этом происходит его локальное нагревание и последующее испарение, что приводит к образованию наночастиц. Этот метод позволяет контролировать размер, морфологию и структуру получаемых частиц, что является критически важным для их фотокаталитических свойств (рис.2).

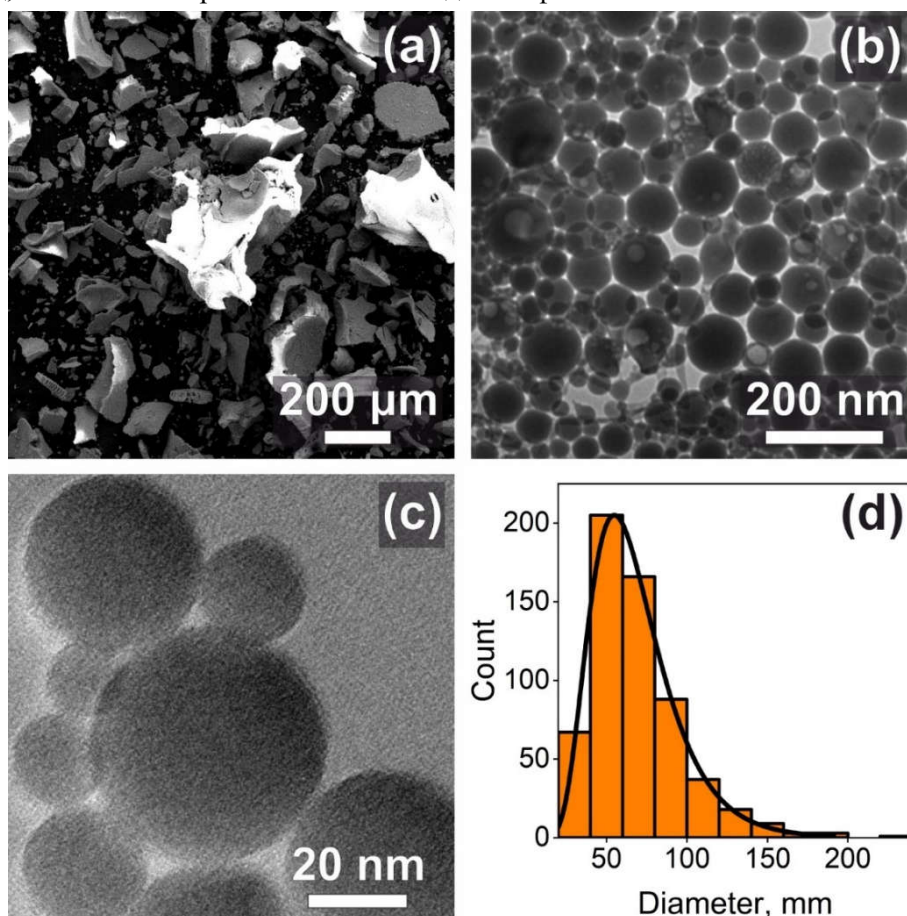


Рис.2. Морфология наночастиц ниобата лития: а) исходный порошок ниобата лития, б, с) фрагментированные наночастицы ниобата лития, d) распределение по размерам. Лазер Yb:KGW (1030 нм, 250 фс, 25 мкДж, 200 кГц, ТЕТА-20, Авеста, Россия).

При синтезе аморфных наночастиц ниобата лития важно учитывать параметры лазера, такие как длина волны, мощность и время облучения. Эти факторы влияют на степень фрагментации и конечные характеристики наночастиц. Полученные аморфные наночастицы обладают высокой реактивностью благодаря большому количеству активных сайтов на их поверхности.

Фотокаталитические свойства аморфных наночастиц ниобата лития обусловлены их способностью поглощать свет и генерировать электронно-дырочные пары. При облучении частиц светом с подходящей длиной волны происходит переход электрона из валентной зоны в зону проводимости, что приводит к образованию свободных электронов и дырок. Эти носители заряда могут участвовать в различных химических реакциях, включая разложение органических загрязнителей и фотосинтез. Морфология и структура аморфных наночастиц напрямую влияют на их фотокаталитическую активность. Наночастицы с большим соотношением поверхности к объему обеспечивают большее количество активных сайтов для химических реакций. Кроме того, аморфная структура способствует лучшему распределению электронов, что увеличивает эффективность процессов фотокатализа. На рис.3 представлены фотокаталитические свойства наночастиц LiNbO_3 и порошка Li_2O_5 .

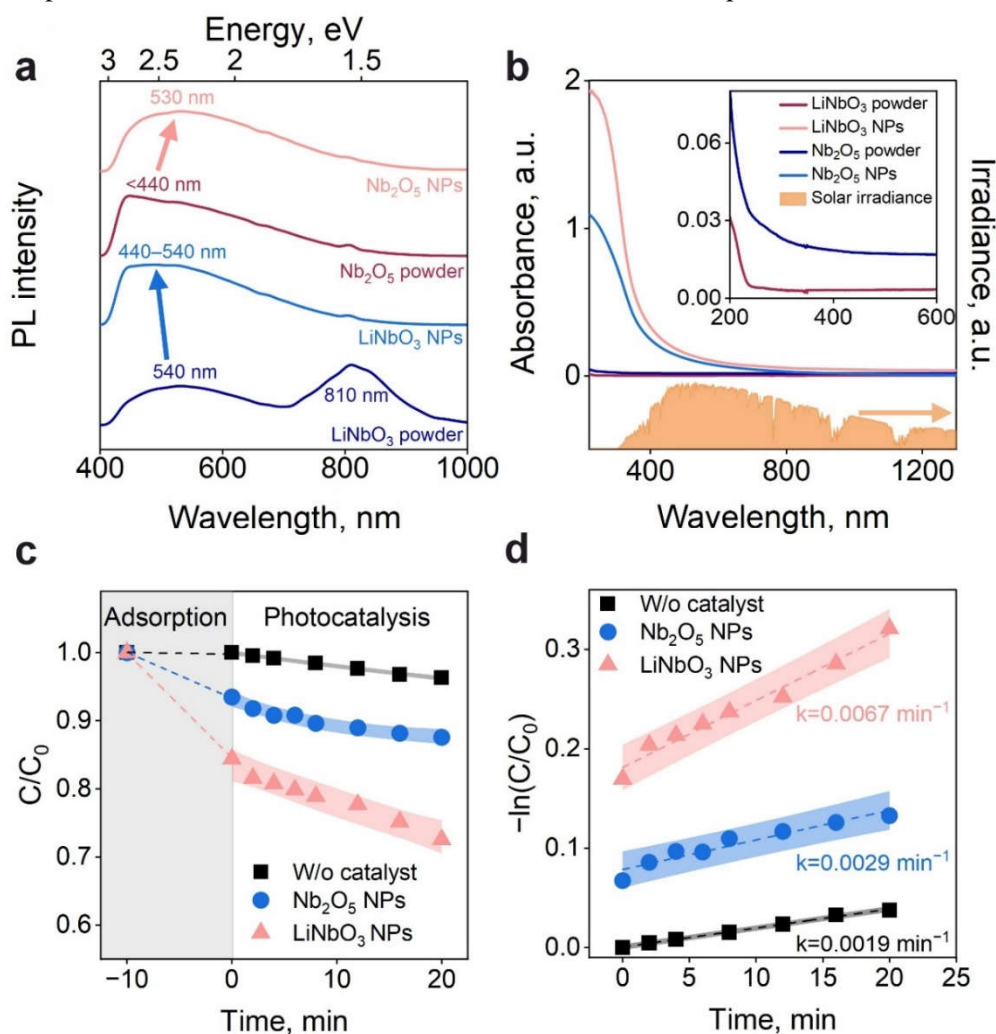


Рис. 3. Фотокаталитические свойства наночастиц LiNbO_3 и порошка Li_2O_5 .

Исследования показывают, что увеличение времени облучения лазером и оптимизация условий синтеза приводят к улучшению фотокаталитических свойств. Например, аморфные наночастицы с меньшими размерами демонстрируют более высокую активность по сравнению с крупными частицами.

Фотокаталитические свойства аморфных наночастиц ниобата лития открывают новые горизонты для их применения в области очистки окружающей среды. Они могут быть использованы для разложения органических загрязнителей в сточных водах, а также для удаления токсичных веществ из воздуха. Кроме того, эти материалы могут быть интегрированы в солнечные панели для повышения их эффективности путем преобразования солнечной энергии в химическую.

Исследование фотокаталитических свойств аморфных наночастиц ниобата лития, синтезированных методом лазерной фрагментации, представляет собой перспективное направление в области материаловедения и экологии. Эти материалы обладают уникальными свойствами, которые могут быть использованы для решения актуальных экологических проблем, таких как загрязнение окружающей среды и устойчивое использование ресурсов. Дальнейшие исследования в этой области могут привести к разработке новых технологий, способствующих созданию более чистого и безопасного мира.

Методом лазерной фрагментации в жидкости синтезированы аморфные наночастицы ниобата лития размером 30-100 нм. Установлено, что аморфные наночастицы ниобата лития проявляют фотокаталитическую активность. Ожидается, что кристаллические наночастицы будут сильнее активировать фотокаталитическую реакцию. Показано, что в структуре аморфных наночастиц LiNbO_3 присутствуют кислородные октаэдры O_6 с расположенными в них ионами Li^+ и Nb^{5+} . То есть наночастицы в некоторой степени сохраняют структуру (и, соответственно, свойства) обычного кристаллического сегнетоэлектрика LiNbO_3 . Этот факт может позволить получать новые материалы путем введения аморфных наночастиц в различные матрицы. Однако структура полученных аморфных наночастиц существенно разупорядочена по сравнению со структурой кристаллических порошков.

1. Pedro R.S. Prezas and Manuel P.F. Graça. Structural Characterization of Lithium Niobate Nanoparticles Prepared by the Sol-Gel Process, Using X-Ray and Raman Spectroscopy and Scanning Electron Microscopy // In book: Applications of molecular spectroscopy to current research in the chemical and biological sciences (pp.32) Publisher: InTech. Editors: Mark T. Stauffer.

2. Rahn, Johanna, Hüger, Erwin, Dörrer, Lars, Ruprecht, Benjamin, Heitjans, Paul and Schmidt, Harald. "Self-Diffusion of Lithium in Amorphous Lithium Niobate Layers" Zeitschrift für Physikalische Chemie, vol. 226, no. 5-6, 2012, pp. 439-448.

УДК 535.215.6: 538.971

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА НА ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Si}$

А.А. Яковлев¹, Т.А. Писаренко¹, К.В. Игнатович¹, В.В. Мараров¹, Д.А. Цуканов^{1,2}

¹ИАПУ ДВО РАН (г. Владивосток)

²Дальневосточный федеральный университет (г. Владивосток)

yakovlev@iacp.dvo.ru

В данной работе проведено исследование особенностей латерального фотовольтаического эффекта в гетероструктуре $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{n-Si}(111)$ с защитным прозрачным покрытием. Мы определили, что исследуемая структура демонстрирует многообещающие результаты в качестве фотовольтаической ячейки при толщине слоя Bi_2Te_3 5 нм. Спектральные зависимости фоточувствительности идентифицируют локализацию процесса фо-

тогенерации в области пространственного заряда кремниевой подложки при толщине слоя теллурида висмута 5 нм и более и в слое Bi_2Te_3 при его толщине менее 3 нм.

В последнее десятилетие большой интерес в области оптоэлектроники вызывают исследования двумерных (2D) материалов [1]. Одним из перспективных направлений развития оптоэлектроники является использование топологических изоляторов (ТИ), которые позволят увеличить быстродействие [2 – 5]. ТИ – это материалы, способные проводить спин-поляризованный ток на своей поверхности и практически не проводить внутри, в объеме, оставаясь изолятором. ТИ на основе Bi привлекают внимание благодаря своим исключительным электрическим и оптическим свойствам. В частности, пленки Bi обладают различными сочетаниями свойств, от сверхпроводимости [6] до магнитотранспорта [7]. Исследование на примере поверхности кристалла Bi_2Te_3 показало, что ускоренные электроны способны перемещаться по поверхности ТИ практически без рассеивания – в отличие от движения в обычном кристалле – а значит, они проводят ток гораздо быстрее, без потерь на нагрев [8].

Латеральный фотовольтаический эффект (ЛФЭ), при котором разность поверхностных потенциалов некоторой системы материалов линейно изменяется в зависимости от положения падающего лазерного луча, является одним из популярных эффектов, встречающихся в оптоэлектронике [1, 9]. Как правило, в фотовольтаических элементах на основе кремния латеральное фотонапряжение генерируется в области пространственного заряда кремния. Однако, поскольку в структуре $\text{SiO}_2/\text{TeO}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{n-Si}(111)$ поглощается в видимом спектре как Si , так и Bi_2Te_3 , представляет интерес изучение происхождения ЛФЭ в этой структуре. Из-за спинового расщепления в Bi_2Te_3 при поглощении света в нем генерируется циркулярный фотогальванический эффект (ЦФЭ). Поэтому, если области генерации ЛФЭ и ЦФЭ будут разделены, то фотоэлектрические элементы на основе структуры $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Si}$ расширят функциональные возможности оптоэлектронных приборов.

В данной работе исследовался ЛФЭ в структуре $\text{SiO}_2/\text{TeO}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{n-Si}$ путем варьирования параметров длины волны и мощности лазерного излучения, а также толщины Bi_2Te_3 при непрерывном и импульсном освещении с целью выявления локализации генерации ЛФЭ.

Рост тонких пленок методом молекулярно-лучевой эпитаксии проводился в камере сверхвысокого вакуума (СВВ) с базовым давлением менее $5,0 \cdot 10^{-10}$ Торр. В качестве подложек использовались пластины $\text{Si}(111)$ n-типа (40–70 Ом·см). Атомно-чистая поверхность $\text{Si}(111)7 \times 7$ была подготовлена *in situ* путем мгновенного испарения до 1280 °C после того, как пластина была предварительно дегазирована при 600 °C в течение 6 часов. Висмут и теллур испарялись из эффузионных ячеек со встроенными затворами. Слои Bi_2Te_3 выращивались при более высокой температуре около 240 °C, при которой пленка росла в режиме пошагового потока. Для уменьшения количества вакансий Te соотношение потоков Bi к Te было выбрано близким к 1:14 при скорости роста около 0,3 нм/мин [4].

Для предотвращения окисления функционального слоя Bi_2Te_3 , после охлаждения до комнатной температуры пленки Bi_2Te_3 покрывались 2 нм Te и 1 нм Si . После того, как образцы были выдержаны на воздухе, верхние слои кремния и теллура были окислены, что привело к образованию защитных прозрачных слоев.

Латеральный фотогальванический эффект исследовался с помощью лазера Ti:sapphire , выдающего импульсы длительностью 60 фемтосекунд с частотой повторения 80 МГц (диаметр пятна 50 мкм), и мультиметра Keithley 2000. Время отклика исследовалось с помощью цифрового осциллографа (Tektronix TDS 2012B) с частотой 150 МГц. Расстояние между зондами составляло 1 мм.

На рис.1 представлена зависимость латерального фотонапряжения от положения лазерного пятна для фотовольтаических ячеек с толщиной слоя Bi_2Te_3 3, 5 и 10 нм. Зависимость латерального

фотонапряжения от положения пятна лазера параметризуется чувствительностью (κ), которая определяется по первой производной линейного участка между контактами. По этому параметру структура с толщиной слоя Bi_2Te_3 5 нм является наиболее перспективной для оптоэлектронных измерителей. Следует обратить внимание на изменение последовательности зависимостей $\text{LPV}(x)$ и $I(U)$ с ростом толщины буферного слоя Bi_2Te_3 . Этот факт свидетельствует о том, что в гетероструктуре $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{n-Si}(111)$ в генерации латерального фотонапряжения играет роль не только изменение сопротивления этой системы [9], но и изменение энергетической структуры слоя Bi_2Te_3 . Для понимания этого результата были проведены исследования с варьированием параметров лазерного освещения, таких как длина волны и мощность.

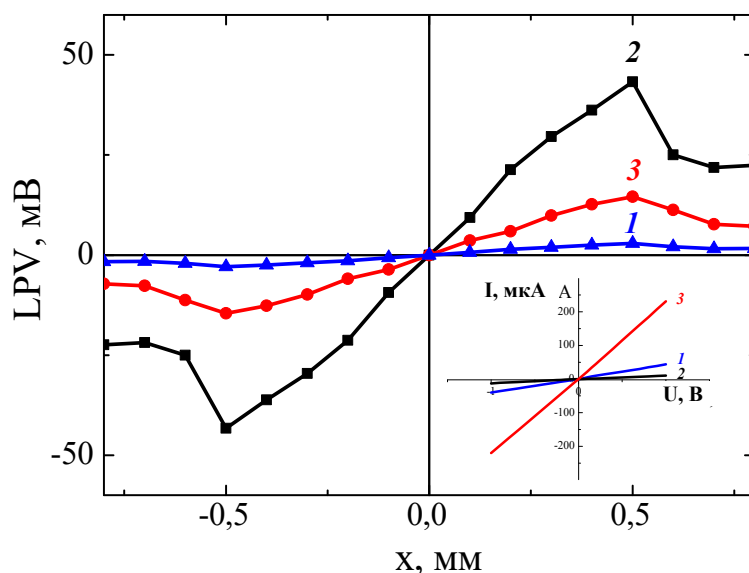


Рис. 1. Зависимость латерального фотонапряжения от положения пятна лазера в структуре $\text{SiO}_2/\text{TeO}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{n-Si}(111)$ с толщиной слоя Bi_2Te_3 : 1 – 3 нм, 2 – 5 нм, 3 – 10 нм. На вставке показаны вольт-амперные характеристики.

Как видно на рис. 2, зависимость фоточувствительности гетероструктур со слоем Bi_2Te_3 толщиной 5 нм и более коррелирует с хорошо известным спектром поглощения кремния [10,11], что явно указывает на генерацию неравновесных фотонесителей в приповерхностном слое кремния. Тогда как при толщине слоя Bi_2Te_3 3 нм спектральная зависимость фоточувствительности, скорее, согласуется с представленным в работе спектром поглощения тонких слоев теллурида висмута, имеющих щель на спектрах ARPES [12]. Данный переход объясняется кинетикой электронной структуры теллурида висмута [12], согласно которой электронная структура развивается при увеличении толщины до 5 нм, что сопровождается увеличением проводимости [13]. Известно [14], что пленки при 5 нм уже имеют дисперсионные соотношения объемной структуры Bi_2Te_3 . Тогда как для пленок толщиной 1 – 3 нм характерно наличие поверхностных состояний в запрещенной зоне [13, 14].

Таким образом, в структуре $\text{SiO}_2/\text{TeO}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{n-Si}(111)$ с толщиной теллурида висмута 5 нм и более поглощающим слоем является область пространственного заряда кремния, буферным слоем является слой теллурида висмута, а слои диоксида теллура и диоксида кремния являются защитными прозрачными покрытиями, так называемыми оконными слоями. Тогда как, при толщине слоя Bi_2Te_3 3 нм поглотителем является слой теллурида висмута, что существенно ухудшает фотовольтаические свойства.

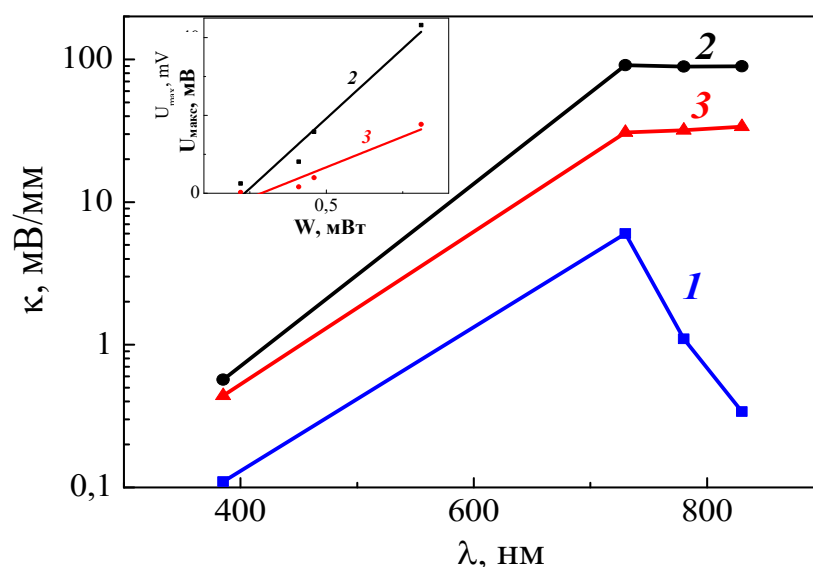


Рис. 2. Зависимость латерального фотонапряжения в структуре $\text{SiO}_2/\text{TeO}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{n-Si}(111)$ от длины волны лазерного освещения. На вставке зависимость фоточувствительности от мощности лазерного освещения, падающего на поверхность. 1 – 3 нм Bi_2Te_3 , 2 – 5 нм Bi_2Te_3 , 3 – 10 нм Bi_2Te_3 .

В ходе исследования была выявлена роль слоев теллурида висмута и области пространственного заряда кремния, поглощающих видимый спектр, при латеральном фотовольтаическом эффекте. Установлено, что толщина топологического изолятора Bi_2Te_3 является критическим параметром для процесса фотогенерации. Для оптоэлектроники представляют интерес структуры с толщиной топологического изолятора 5 нм и более, в которых латеральное фотонапряжение генерируется в слое кремния на границе раздела $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Si}$, а слой теллурида висмута является буферным слоем, индуцирующим гетеропереход в структуре.

1. Yang, Y. Progress of lateral photovoltaic effect: theoretical models and materials //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – V. 2044. – No. 1. – P. 012151.

2. Chae, J., Hong, S. B., Kim, D., Kim, D. K., Kim, J., Jeong, K., ... & Cho, M. H. Enhancement of photoresponse in $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{graphene}$ heterostructures by effective electron–hole separation through internal band bending //Applied Surface Science. – 2021. – V. 554. – P. 149623.

3. Hasegawa, S. Surface and interface physics driven by quantum materials //Applied Physics Express. – 2024. – V. 17. – No. 5. – P. 050101.

4. Matetskiy, A. V., Kibirev, I. A., Hirahara, T., Hasegawa, S., Zotov, A. V., & Saranin, A. A. Direct observation of a gap opening in topological interface states of $\text{MnSe}/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ heterostructure //Applied Physics Letters. – 2015. – V. 107. – No. 9. – P. 091604.

5. Hong, S. B., Kim, D. K., Chae, J., Kim, K., Jeong, K., Kim, J., ... & Cho, M. H. Enhanced photoinduced carrier generation efficiency through surface band bending in topological insulator Bi_2Se_3 thin films by the oxidized layer //ACS applied materials & interfaces. – 2020. – V. 12. – No. 23. – P. 26649-26658.

6. Granqvist, C. G., Claesson, T. Superconductivity in ultrathin films I. Transition temperatures of amorphous Bi and Ga //Physics of condensed matter. – 1974. – V. 18. – No. 2. – P. 79-97.

7. Aitani, M., Hirahara, T., Ichinokura, S., Hanaduka, M., Shin, D., & Hasegawa, S. In situ magnetotransport measurements in ultrathin Bi films: evidence for surface-bulk coherent transport //Physical Review Letters. – 2014. – V. 113. – No. 20. – P. 206802.

8. Chen, Y. L., Analytis, J. G., Chu, J. H., Liu, Z. K., Mo, S. K., Qi, X. L., ... & Shen, Z. X. Experimental realization of a three-dimensional topological insulator, Bi_2Te_3 //science. – 2009. – V. 325. – No. 5937. – P. 178-181.

9. Yu, C., Wang, H. Large lateral photovoltaic effect in metal-(oxide-) semiconductor structures //Sensors. – 2010. – V. 10. – No. 11. – P. 10155-10180.
10. Zhou, Z. Q., Hu, F., Zhou, W. J., Chen, H. Y., Ma, L., Zhang, C., & Lu, M. An investigation on a crystalline-silicon solar cell with black silicon layer at the rear //Nanoscale research letters. – 2017. – V. 12. – P. 1-6.
11. Wu, C., Crouch, C. H., Zhao, L., Carey, J. E., Younkin, R., Levinson, J. A., ... & Karger, A. Near-unity below-band-gap absorption by microstructured silicon //Applied Physics Letters. – 2001. – V. 78. – No. 13. – P.1850-1852.
12. Gupta, B. K., Sultana, R., Singh, S., Singh, V., Awana, G., Gupta, A., ... & Awana, V. P. S. Unexplored photoluminescence from bulk and mechanically exfoliated few layers of Bi₂Te₃ //Scientific Reports. – 2018. – V. 8. – No. 1. – P. 9205.
13. Hatta, S., Obayashi, K., Okuyama, H., & Aruga, T. Metallic conduction through van der Waals interfaces in ultrathin Bi₂Te₃ films //Scientific Reports. – 2021. – V. 11. – No. 1. – P. 5742.
14. Li, Y. Y., Wang, G., Zhu, X. G., Liu, M. H., Ye, C., Chen, X., ... & Xue, Q. K. Intrinsic topological insulator Bi₂Te₃ thin films on Si and their thickness limit //Adv. Mater. – 2010. – V. 22. – No. 36. – P. 4002-4007.

Секция «Физическое образование (школьное и вузовское)»

УДК 372.853

ИНТЕРАКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБУЧЕНИЯ В АСТРОНОМИИ: ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИКУМА ДЛЯ 7-8 КЛАССОВ

С.А. Бобрышева, Л.В. Горбанева

Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

2021101291@togudv.ru, 009608@togudv.ru

В статье рассматривается применение интерактивных методов обучения на внеурочных занятиях по астрономии для учащихся 7-8 классов. Подчеркивается важность практического применения знаний и создания комфортных условий для успешного обучения. Описываются цели и задачи практикума, направленные на повышение интереса к астрономии, формирование базовых знаний, развитие наблюдательности и навыков командной работы. Предлагаются примеры интерактивных методов, включая моделирование астрономических явлений, игры и викторины, проектную деятельность, использование VR/AR технологий и анализ астрономических данных. Приводится примерная структура практикума и критерии оценки результатов. Делается вывод о значительной эффективности интерактивного подхода в обучении астрономии, позволяющего вовлечь учеников в активное познание тайн Вселенной и открывающего возможности для практического применения знаний и участия в астрономических проектах.

В современном мире образования особое внимание уделяется практическому применению знаний. Астрономия, захватывающая и многогранная наука, не является исключением. Использование интерактивных методов обучения на внеурочных занятиях по астрономии в 7-8 классах позволяет не только углубить знания учащихся, но и значительно повысить их интерес к предмету.

Интерактивное обучение – это специальная форма организации познавательной деятельности. Она имеет в виду вполне конкретные и прогнозируемые цели. Одна из таких целей состоит в создании комфортных условий обучения, таких, при которых обучаемый чувствует свою успешность, свою интеллектуальную состоятельность, что делает продуктивным сам процесс обучения [1].

Суть интерактивного обучения состоит в том, что учебный процесс организован таким образом, что практически все учащиеся оказываются вовлеченными в процесс познания, они имеют возможность понимать и рефлексировать по поводу того, что они знают и думают.

Преимуществами интерактивных методик обучения являются – способность эффективно усвоению учебно-методического материала; побуждения интереса к науке; плодотворная реализация технологий моделирования и метода проектирования; использование ролевых и деловых игр.

Опыт проведения практикума по астрономии с применением интерактивных методик демонстрирует значительные преимущества этого подхода. Интерактивные упражнения, такие как виртуальные экскурсии по солнечной системе, моделирование астрономических явлений и работа с интерактивными картами звездного неба, не только стимулируют активное участие учеников, но и способ

ствуют лучшему усвоению материала. Эти методы делают сложные астрономические концепции более доступными и понятными для школьников.

При подготовке практикума по астрономии для учащихся 7-8 классов необходимо уделить особое внимание цели и задачам практикума. Практикум может иметь следующую цель: повышение интереса к астрономии и формирование базовых астрономических знаний через активное участие в интерактивных мероприятиях. Для реализации поставленной цели рекомендуется следующие задачи практикума: познакомить с основными астрономическими понятиями и явлениями (Солнечная система, звезды, созвездия, движение небесных тел); способствовать развитию наблюдательности и умению анализировать небесные явления; формировать навыки работы в команде и публичной презентации результатов; прививать интерес к научным исследованиям и самостоятельному изучению астрономии.

Когда цель и задачи практикума поставлены, необходимо определить на то, какие именно интерактивные методы обучения будут использоваться в практикуме. В качестве примера, можно использовать такие методы как: моделирование; игры и викторины; работа в группах над проектами; использование возможностей виртуальной реальности (VR) и дополненной реальности (AR); анализ данных и работа с астрономическим программным обеспечением (при наличии).

Имеет смысл привести конкретные примеры мероприятий по каждому представленному выше интерактивному методу.

Моделирование.

1. Создание модели Солнечной системы. Создание физической модели Солнечной системы из различных материалов (мячи, шары, пенопласт). Ученики занимаются распределением планет, определением их размеров и расстояний, а также демонстрируют вращение планет вокруг Солнца. Интерактивность: физическая активность, визуализация, обсуждение относительных размеров и расстояний.

2. Создание модели фаз Луны. Используя освещенный шар и мяч, ученики демонстрируют и объясняют смену фаз Луны в зависимости от ее положения относительно Земли и Солнца. Интерактивность: объяснение процессов, работа с моделью, визуализация.

3. Создание модели затмений. С помощью тех же инструментов, что и для фаз Луны, моделируются солнечные и лунные затмения. Интерактивность: моделирование процесса, обсуждение условий возникновения затмений, решение проблемных ситуаций (например, почему затмения происходят не каждый месяц).

Игры и викторины.

Игра "Астрономическое лото". Для проведения игры готовятся карточки. На карточках изображены небесные тела, созвездия, научные инструменты. Ведущий называет определение или факт, а ученики ищут соответствующую картинку на своей карточке. Интерактивность: соревнование, повторение материала, расширение словарного запаса.

Игра "Космический крокодил". Ученики делятся на команды, и один из участников команды пытается жестами и мимикой изобразить астрономический термин, который должна отгадать его команда. Интерактивность: командная работа, творческое мышление, ассоциативное запоминание.

Работа в группах над проектами.

Создание плаката "Созвездия моего знака зодиака". Каждая группа выбирает созвездие зодиака и готовит информацию о нем: мифология, яркие звезды, легкость обнаружения на небе. Затем, группа представляет свой проект остальным участникам. Интерактивность: исследование, работа с информацией, командная работа, публичная презентация.

"Космическое путешествие". Ученики разрабатывают сценарий космического путешествия к определенной планете или экзопланете, описывая условия на планете, необходимые инструменты и

оборудования для выживания. Интерактивность: креативное мышление, применение полученных знаний, моделирование ситуаций.

Исследование фотографий небесных объектов. Предоставление ученикам фотографий туманностей, галактик и других объектов, полученных с телескопов. Задача – описать объект, используя полученные знания, попытаться определить его тип и особенности. Интерактивность: развитие наблюдательности, анализ информации, интерпретация изображений.

Использование возможностей виртуальной реальности (VR) и дополненной реальности (AR).

Виртуальное путешествие по Солнечной системе. Существуют VR-приложения, позволяющие погрузиться в виртуальное пространство и "облететь" планеты Солнечной системы, рассматривая их вблизи. Интерактивность: визуальное погружение, изучение объектов в интерактивном формате [2].

Приложения AR для изучения созвездий. При наличии на смартфоне определенной программы позволяет при наведении смартфона на небо определить созвездия и узнать о них дополнительную информацию. Интерактивность: использование технологий для наблюдения за небом, получение информации в реальном времени [2].

Анализ данных и работа с астрономическим программным обеспечением (при наличии).

Определение расстояний до звезд методом годичного параллакса (упрощенная версия). Используя данные наблюдений с разных точек Земли, ученики рассчитывают расстояние до близлежащих звезд (с использованием упрощенных математических моделей). Интерактивность: применение математических знаний в астрономии, анализ данных, решение задач.

Использование планетариев (программных или аппаратно-программных комплексов) для моделирования звездного неба. Наблюдение за движением небесных тел, изучение созвездий в разное время года. Интерактивность: визуализация, моделирование, эксперименты с изменением параметров.

Используя предложенные интерактивные методы обучения и конкретные примеры мероприятий можно смоделировать примерную структуру практикума.

Тема 1. Вводное занятие. Обсуждение основных понятий (Вселенная, галактики, Солнечная система). Презентация программы практикума и правил работы. Занятие проводится в форме лекции с элементами дискуссии и мозгового штурма.

Тема 2. Солнечная система. Моделирование Солнечной системы, изучение характеристик планет. На занятиях этой темы интерактивность достигается за счет использования моделирования, работы в группах и презентации полученного результата.

Тема 3. Луна и затмения. Моделирование фаз Луны и затмений. Используемые методы: моделирование, демонстрация, объяснение.

Тема 4. Звезды и созвездия. Изучение созвездий, истории и мифологии, связанных с ними. Работа с картами звездного неба, викторина, создание плакатов создаст интерактивность занятиям.

Тема 5. Космические путешествия (проектное занятие). Разработка сценария космического путешествия. Интерактивность на данном занятии достигается за счет работа в группах и презентации полученного результата.

Тема 6. Анализ изображений небесных тел. Изучение фотографий туманностей и галактик, определение их типа и особенностей. Методы обучения на занятиях этой темы: групповая работа, анализ данных, презентация результатов.

Заключительное занятие. Подведение итогов, обсуждение результатов, рефлексия. Заключительные занятия целесообразно использовать метод дискуссий. Для подведения общих итогов возможно проведение викторины.

В качестве оценки результатов рассматриваются результаты викторин и тестов, активность участия школьников на занятиях, качество выполнения проектных заданий, умение работать в команде и презентовать результаты, демонстрация понимания основных астрономических понятий.

Применение интерактивных методов в обучении астрономии для 7-8 классов значительно повышает эффективность обучения, делает процесс интересным и увлекательным, и способствует формированию устойчивого интереса к этому удивительному предмету. Акцент на интерактивности позволяет уйти от пассивного восприятия информации и вовлечь учеников в активное познание тайн Вселенной. Это откроет перед учениками возможность на практике применять теоретические знания, обсуждать результаты наблюдений в режиме реального времени и участвовать в международных проектах и соревнованиях по астрономии.

1. Куприян А. В. Интерактивное обучение // ИСОМ. 2015. № Приложение 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/interaktivnoe-obuchenie-2> (дата обращения: 17.07.2025).

2. Варламова К.С. Использование мультимедиа технологий, программно-аппаратных средств виртуальной реальности и дополненной реальности в преподавании астрономии / К.С. Варламова, Д.А. Глечик, А.В. Рыбаков // Перспективы и возможности использования информационных технологий в науке, образовании и управлении. 2019. С. 50-53.

3. Емец Н.П. Использование электронных интерактивных учебных материалов в лабораторном практикуме по астрономии // Журнал «Современные проблемы науки и образования». – 2018. – № 4.

4. Малахова Г.И. Дидактический материал по астрономии // Г.И. Малахова, Е.К. Страут. – М.: Просвещение, 2003.

5. Федеральный государственный образовательный стандарт среднего общего образования [Электронный ресурс] // Федеральные государственные образовательные стандарты: [официальный сайт]. – URL: <https://fgos.ru>.

УДК 533.6.011

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

И.В. Верхотурова

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

В данной работе представлены результаты применения средств COMSOL Multiphysics для демонстрации в лабораторном эксперименте процесса обтекания ламинарным и турбулентными потоками тел различной геометрии. Полученные результаты моделирования позволяют значительно дополнить теоретический материал некоторых тем модуля «Аэродинамика» в рамках дисциплины Гидрогазоаэродинамика, изучаемый обучающимися.

В настоящее время компьютерное моделирование различных физических процессов и явлений, конечно не являясь альтернативой реальному эксперименту, все чаще применяется в учебном процессе. Так, например, компьютерное моделирование физических процессов средствами Ansys, COMSOL Multiphysics или другими программными продуктами, предназначенными для инженерного анализа и численного моде-

лирования, позволяет визуализировать и изучать недоступные или труднодоступные для реальных опытов физические процессы или явления, делая их наглядными в лабораторном практикуме [1, 2].

В данной работе представлены результаты применения средств программного продукта COMSOL Multiphysics при выполнении лабораторных работ модуля «Аэродинамика» дисциплины Гидрогазоаэродинамика. Выполнение в рамках лабораторных работ моделирования процесса обтекания тел различной геометрической формы ламинарным и турбулентным потоками вязкой жидкости при различных числах Рейнольдса прекрасно дополняет теоретический материал некоторых тем модуля «Аэродинамика». Моделирование процесса обтекания тел позволяет наглядно визуализировать пограничный слой на поверхности обтекаемого тела, зоны его отрыва от поверхности тела, зоны максимальных скоростей, образование вихревых структур и др.

Моделирование предлагается проводить обучающимся с использованием интерфейса *Fluid Flow* → *Single – Phase Flow*. Моделирование можно проводить как в 3D, так и в 2D размерности пространства. Последнее используется для моделирования обтекания аэродинамического профиля. Для решения задачи предлагается выбирать в выше указанном интерфейсе раздел *Laminar Flow* при моделировании процесса обтекания тела ламинарным потоком или *Turbulent Flow* – турбулентным потоком. В последнем случае можно использовать несколько моделей турбулизации, например, *k-ε*-модель и *k-ω*. Построение и задание геометрических параметров неудобнообтекаемого тела (сфера, цилиндр) и удобнообтекаемого (аэродинамический профиль), а также расчетного домена (в виде прямоугольного параллелепипеда или прямоугольника), внутри которого находится обтекаемое тело, производится с помощью функции *Geometry*. Для построения аэродинамических профилей различного вида (симметричных и несимметричных) как под нулевым, так и под другими углами атаки можно воспользоваться разделом *Airfoil plotter* на странице сайта <http://airfoiltools.com/>.

Процесс обтекания твердого тела жидкостью описывается системой дифференциальных уравнений, состоящей из уравнения Навье-Стокса и уравнения неразрывности, а также дополняющими их начальными и граничными условиями. При моделировании обучающимся предлагается проследить как меняется вид уравнения Навье-Стокса для ламинарного и турбулентного потоков, какими новыми параметрами оно дополняется при использовании разных моделей турбулизации (*k-ε*- и *k-ω* модели) и какой смысл они несут. Таким образом, посредством применения программного продукта COMSOL Multiphysics обучающимся в рамках модуля «Аэродинамика» дисциплины Гидрогазоаэродинамика предложено выполнение следующих лабораторных работ: моделирование процесса обтекания неудобнообтекаемых тел ламинарным и турбулентным потоками; моделирование процесса обтекания аэродинамических профилей ламинарным и турбулентным потоками. В последней работе обучающимся предстоит моделировать процесс обтекания аэродинамического профиля (симметричного и несимметричного) под разными углами атаки. В результате моделирования, обучающиеся получают картины распределения скоростей (линии тока потока и цветовая гамма, определяющая изменение скорости потока) и давления по поверхности обтекаемых тел при определенных условиях (по заданию преподавателя).

Опираясь на теоретические знания тем модуля «Аэродинамика» обучающиеся по полученным результатам моделирования должны дать полное развернутое описание наблюдаемых зон и структур, возникающих в процессе обтекания потоком тел разной геометрической формы, а также процессов, приводящих к формированию этих структур. Для примера, обучающиеся могут описать, наблюдаемую зону торможения вблизи передней точки соприкосновения потока с обтекаемым телом, в которой происходит снижение скорости потока до нуля и повышение давления в потоке до полного значения. Описать пограничный слой, прилегающий к поверхности обтекаемого тела, и как в нем меняется скорость потока. Выделить зону максимальных скоростей и описать причины ее формирования и изменения в зависимости от симметрии тела и изменения угла атаки. Описать и обосновать изменение давления по

поверхности обтекаемого тела. Особенно важным является описание обучающимся аэродинамического следа в кормовой части обтекаемого тела: описание его формирования, условия его распада и отрыва, изменения в нем скорости и давления, зависимость формы аэродинамического следа от формы обтекаемого тела и режима течения потока. Обучающимся предлагается провести сравнительный анализ результатов моделирования процесса обтекания турбулентным потоком (в рамках двух моделей турбулизации $k-\omega$ и $k-\epsilon$) аэродинамических профилей как под нулевым углом атаки, так и отличным от нуля. Данное сравнение позволяет обучающимся понять какая из двух моделей турбулизации дает полную картину визуализации пограничного слоя и вихревых структур, а также их изменение с углом атаки.

Таким образом, в статье показано, что применения средств программного продукта COMSOL Multiphysics для реализации некоторых работ в лабораторном эксперименте по модулю «Аэродинамика» дисциплины Гидрогазоаэродинамика, весьма продуктивно. Поскольку ввиду отсутствия необходимого оборудования прекрасно дополняет теоретический материал изучаемого модуля, позволяя реализовывать различные условия обтекания тел разнообразной геометрической формы. наглядной визуализации пограничного слоя и его отрыва от поверхности обтекаемого тела. Полученные знания и навыки работы в данном программном продукте могут быть также полезны для обучающихся в дальнейшем, при прохождении различных видов практик и написании выпускной квалификационной работы.

1. Поляков К. А. Моделирование обтекания шара вязкой средой при наличии скольжения на поверхности в пакете ANSYS/CFX: электронное пособие для дистанционного обучения/ К. А. Поляков, В. Н. Калабухов. – М: СГУ. – 2013. – 67 с. – Режим доступа: http://mmm_samgu.samsu.ru/posob.html.

2. Малюга В.С. Численное моделирование обтекания сферы потоком вязкой несжимаемой жидкости: В.С. Малюга // Прикладная гидромеханика – 2013. – Том 15. – № 3. – С.43 – 67. – Режим доступа: [http://hydromech.org.ua/content/pdf/ph/ph-15-3\(43-67\).pdf](http://hydromech.org.ua/content/pdf/ph/ph-15-3(43-67).pdf).

3. Comsol.ru руководство пользователя. – 2014. – Режим доступа: www.comsol.ru/support/knowledgebase/.

УДК 372.853

ЗНАЧИМОСТЬ И СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ СМЫСЛОВОГО ЧТЕНИЯ НА УРОКАХ ФИЗИКИ

С.Е. Галушко

МАОУ «Школа №26 г. Благовещенск» (г. Благовещенск)

lana.galushko.82@mail.ru

Смысловое чтение – это сложный когнитивный процесс, направленный на глубокое понимание, анализ и интерпретацию текста. В контексте преподавания физики оно приобретает особую значимость, поскольку учебный материал содержит не только теоретические положения, но и задачи, требующие точного восприятия условий, выделения ключевых данных и их последующего применения. Формирование навыков смыслового чтения у учащихся способствует не только усвоению предметных знаний, но и развитию критического мышления, умения работать с информацией, что соответствует требованиям современных образовательных стандартов.

По данным международного исследования PISA (2000, 2003, 2006, 2009 г.г.), где оценивалась грамотность чтения, наши обучающиеся устойчиво демонстрируют результаты ниже средних международных показателей. В связи с этим Федеральные стандарты включают в метапредметные результаты освоения ООП в качестве обязательного компонента "овладение навыками смыслового чтения текстов различных стилей и жанров в соответствии с целями и задачами" [1].

На уроках физики в той или иной степени учащиеся участвуют в процессах передачи, получения, обработки, представления, использования и хранения информации. Представляется, что именно физика, может претендовать на дисциплину, более чем другие развивающую общеучебные навыки по работе с информацией. Она опирается на точные формулировки законов, принципов и экспериментальных данных. Учебные тексты по данной дисциплине насыщены терминами, символическими обозначениями, графическими зависимостями и математическими выражениями. Непонимание или поверхностное восприятие текста приводит к ошибкам в решении задач, неверным выводам при проведении экспериментов и, как следствие, к снижению успеваемости.

Смысловое чтение при изучении данной науки выполняет ряд ключевых функций: познавательную – позволяет учащимся осознанно усваивать новые понятия и законы. Аналитическую – способствует выделению главного в тексте, установлению причинно – следственных связей. Прикладную обеспечивает корректное понимание условия задачи и выбор оптимального способа её решения. Таким образом, формирование навыков смыслового чтения является неотъемлемой частью эффективного обучения физике.

Для развития смыслового чтения прибегают к методическим подходам: активное использование вопросно - ответных техник в которых постановка вопросов к тексту использует разные стратегии: Вопросы на понимание («Что описывает данный закон?», «Какие величины входят в формулу?»). Вопросы на анализ («Почему в этом опыте используется именно такой метод измерений?»). Вопросы на прогнозирование («Как изменится результат, если увеличить силу тока?»). Подобные приёмы стимулируют вдумчивое чтение и помогают учащимся осознавать логику научного текста.

Сущность стратегии смыслового чтения состоит в том, что она имеет отношение к выбору, функционирует автоматически на бессознательном уровне и формируется в ходе развития познавательной деятельности. Овладение стратегиями происходит преимущественно в группах или парах, что позволяет выработать у учеников не только речевую, но и коммуникативную компетентность. К стратегиям смыслового чтения относятся технологии, направленные на развитие критического мышления учеников. Критическое мышление означает процесс соотнесения внешней информации с имеющимися у человека знаниями, выработка решений о том, что можно предпринять, что необходимо дополнить, а что – отвергнуть. При этом возникают ситуации, когда приходится корректировать собственные убеждения или даже отказываться от них. Технология развития критического мышления, как и стратегии развития смыслового чтения, направлены на формирование вдумчивого ученика, который анализирует, сравнивает, сопоставляет и оценивает знакомую и новую информацию.

Научить современных школьников вдумчиво читать, извлекать из прочитанного нужную информацию, соотносить ее с имеющимися знаниями, интерпретировать и оценивать – важные задачи всех школьных предметов.

Не все учащиеся интуитивно владеют эффективными стратегиями работы с научной литературой. Целесообразно обучать их приёмам: предварительный просмотр (беглый просмотр заголовков, выделенных терминов, иллюстраций перед углублённым чтением); выделение ключевых идей (подчёркивание главных тезисов, составление кратких конспектов); рефлексия (обсуждение прочитанного, переформулирование своими словами). Эти методы способствуют осознанному восприятию материала и снижают когнитивную нагрузку.

Еще одним способом развития смыслового чтения является работа с научными терминами и символикой. Физика изобилует специальной лексикой (например, «индуктивность», «диффузия», «квантование»), а также математическими обозначениями ($F = ma$, $E = mc^2$). Для успешного понимания текста прибегают к систематическому разбору новых терминов, объясняя их происхождение и значение. Учат сопоставлять словесные и символические формулировки законов (например, вербальное описание второго закона Ньютона и его математическую запись). Использовать визуализацию (схемы, графики), чтобы закрепить связь между термином и его физическим смыслом.

Научить современных школьников вдумчиво читать, извлекать из прочитанного нужную информацию, соотносить ее с имеющимися знаниями, интерпретировать и оценивать – важные задачи всех школьных предметов в том числе и физики. Немаловажную роль в данном процессе играют средства развития смыслового чтения. К урокам физики больше подходят физические задачи – это особый вид текста, где важна не только математическая составляющая, но и точное понимание условия. Для формирования навыков работы с такими текстами продельывают ряд действий: переформулирование условия задачи (учащиеся излагают суть задачи своими словами, что помогает выявить непонимание), выделение известных и неизвестных величин (составление списка данных перед решением), анализ возможных ошибок (разбор типичных недочётов в интерпретации условий), подобная практика развивает внимательность и способность к логическому анализу. Интеграция межпредметных связей. Понимание физических текстов часто требует знаний из математики, химии, биологии. Учитель может сравнивать термины из разных дисциплин (например, «работа» в физике и в обыденной речи), использовать контекстные задания, где необходимо применить знания из смежных наук. Это расширяет кругозор учащихся и улучшает их способность к смысловому чтению комплексных текстов.

Развивать смысловое чтение можно через составление кластера (смыслового блока). «Кластеры» («грозди»), выделение смысловых единиц текста и графическое их оформление в определённом порядке в виде «грозди». Кластеры могут стать как ведущим приёмом на стадии вызова, рефлексии, так и стратегией урока в целом. Делая какие-то записи, зарисовки для памяти, мы часто интуитивно распределяем их особым образом, komponуем по категориям. «Грозди» – графический приём систематизации материала. Наши мысли уже не громоздятся, а «гроздятся», т. е. располагаются в определённом порядке. Правила очень простые. Рисуем модель Солнечной системы: звезду, планеты и их спутники. Звезда в центре – это наша тема, вокруг неё планеты – крупные смысловые единицы. Соединяем их прямой линией со звездой. У каждой планеты – спутники, у них – свои спутники [2].

Кластер – графический приём систематизации материала, который позволяет: выделить смысловые единицы текста и графически оформить их в определённом порядке в виде грозди. Систематизировать знания по теме, показать смысловые поля того или иного понятия. Использовать кластер можно на разных стадиях урока: на стадии вызова – для стимулирования мыслительной деятельности; на стадии осмысления – для структурирования учебного материала; на стадии рефлексии – при подведении итогов того, что учащиеся изучили.

Пример использования приёма при изучении темы «Высота и тембр звука. Распространение звука». Ситуация вызова: учитель задаёт вопрос «каким может быть звук?» (учащиеся предлагают: высоким, низким, тихим, громким и т. д.). Затем по ключевым словам (заготовка кластера на доске) задаёт вопрос: «Как вы думаете, от чего зависит громкость, частота звука?». Учащиеся читают тексты параграфов, поделившись на группы или парами, после чего обсуждают между собой, затем коллективно. После обсуждения заполняют кластер. Конечный продукт урока можно изобразить в виде схемы.

В работе по развитию смыслового чтения необходимо применять постепенное усложнение текстов – начинать с адаптированных материалов, затем переходить к оригинальным научным статьям. Использовать групповые обсуждения – коллективный разбор текста, который помогает выявить разные интерпретации и углубить понимание; применять цифровые инструменты – интерактивные задания и онлайн-тесты на понимание прочитанного. Важное значение имеет обратная связь — регулярное оценивание уровня осмысления текста через устные и письменные работы.

Формирование смыслового чтения на уроках физики — это длительный процесс, требующий систематической работы. Однако его значимость невозможно переоценить: он не только повышает качество усвоения предмета, но и развивает общеучебные навыки, необходимые для дальнейшего образования. Применение рассмотренных методик позволит учителям сделать процесс обучения более эффективным, а учащимся — увереннее работать с научной информацией.

Таким образом, смысловое чтение выступает ключевым элементом успешного изучения физики, связывая теоретические знания с практическим применением.

1. Семененко Н. М. Смысловое чтение и работа с текстом на уроках физики в условиях введения ФГОС // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2016. – Т. 15. – С. 521–525.

2. С.И. Заир – бек, И.В. Муштавинская Развитие критического мышления на уроке: Пособие для учителя. – М.: Просвещение, 2004 – 27с.

УДК 372.853

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ ЛЕКЦИЯ КАК СРЕДСТВО ИНТЕГРАЦИИ ФИЗИКИ И БИОЛОГИИ В РАМКАХ ВНЕУРОЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Л.В. Горбанева¹, А.С. Тюканов², Н.В. Горбанева²

¹Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

²Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена (г. Санкт-Петербург)
009608@togudv.ru

В статье исследуются межпредметные связи физики и биологии на примере звукообразования в головном аппарате человека. Рассматривается проблема низкой мотивации школьников к изучению физики и предлагается практико-ориентированный подход через интеграцию естественнонаучных дисциплин. Представлена методика разработки научно-популярной лекции, демонстрирующей взаимосвязь физики и биологии. Описаны критерии отбора материала, структура лекции и примеры наглядных экспериментов. Материал охватывает анатомию голосового аппарата, физику звука и прикладные аспекты в логопедии и вокале. Результаты подчеркивают важность междисциплинарного подхода, позволяющего учащимся увидеть практическое применение физических законов.

Физика является одним из важнейших естественнонаучных предметов, изучение которого закладывает основу для понимания окружающего мира и развития критического мышления. Многие школьники считают физику скучной, непонятной и ненужной, и часто при изучении физики учащиеся спрашивают себя, зачем им нужна эта наука, что полезного в жизни она может дать. Однако физика призвана помочь школьникам понять реальный мир. Ничто не может находиться вне физики, физика – это всеобъемлющая наука. Физика, ее явления и законы действуют в мире живой и неживой природы.

Так изучением человека занимаются различные науки: биология, антропология, психология и другие, но целостного представления о человеке невозможно без физики. Для создания оптимальных условий существования человека, важное значение имеют физические знания. К сожалению, многие ученики решают для себя, что физика им вовсе не нужна и никакой пользы в дальнейшей жизни она не принесет. И тогда учитель может столкнуться не только с тем, что ученики не понимают его объяснений, но, как правило, и с тем, что они даже не пытаются что-либо понять. В такой ситуации перед преподавателем, желающим приобщить детей к миру физических явлений, открытий и законов, возникает задача – пробудить интерес к предмету.

В ФГОС ООО среди новшеств можно выделить нацеленность на практико-ориентированный подход в обучении. Такой подход реализуется в развитии естественнонаучной грамотности, которая заключается в способности понимать и применять знания естественнонаучных дисциплин в повседневной жизни.

В школьном курсе естественнонаучную грамотность возможно развивать при реализации межпредметных связей физики и химии, физики и географии, физики и биологии (хотя и биология, и физика относятся к естественным дисциплинам, но биологи, как правило, считают себя гуманитариями).

Межпредметные связи физики и биологии особенно ярко проявляются и вызывают интерес у учащихся при изучении «физики человека». Применять на уроках биологии (анатомии) законы физики практически невозможно, так как многие элементы физики изучаются гораздо позже, чем рассматриваются на уроках биологии. Поэтому на уроках физики необходимо приводить примеры, иллюстрирующие связь физики и биологии. Конечно же, такие примеры можно найти в разнообразных книгах и в журналах, но они, как правило, разрознены, что значительно затрудняет поиск необходимого материала к конкретному уроку.

Поскольку исследование межпредметных связей физики со всеми науками является слишком обширной задачей, то предмет исследования в работе конкретизирован. Для исследования были выбраны межпредметные связи физики с биологией, а именно анатомией. Также была выбрана более узкая тема для изучения: «Межпредметные связи физики и биологии (анатомии человека) при изучении темы звуковых колебаний». Многие учащиеся увлечены биологией из-за интереса к строению и функциям человеческого организма, но они не всегда понимают как (на каких закономерностях) устроен этот организм, например, извлечение звуков. В основе звука лежат законы физики, такие как колебания и волновые процессы, которые напрямую связаны с биологическими структурами, например, с голосовыми связками и дыхательной системой. Изучение того, как воздух, проходя через гортань, приводит в движение голосовые связки, даёт понимание того, что биология и физика тесно взаимосвязаны. Это помогает обучающимся, увлеченным биологией, осознать важность физических процессов в жизнедеятельности человека и может значительно повысить их интерес к изучению физики через прикладные примеры. Реализацию межпредметных знаний по физике и биологии возможно проводить на уроках физики (при объяснении нового материала, при решении задач). Интересен способ проведения интегрированных уроков по физике и биологии, но изучение соответствующих тем по указанным предметам не совпадает по времени. Кроме того, подготовка интегрированных уроков вызывает определенные сложности.

Дополнительные возможности по реализации межпредметных связей физики и биологии дает внеурочная деятельность. Одним из видов внеурочной деятельности является научно-популярная лекция. Для составления научно-популярной лекции, которая бы включала в себя знания из школьных предметов физики и биологии, необходимо рассмотреть критерии, по которым составляется научно-популярная лекция и предмет лекции с точки зрения физики и биологии.

Научно-популярная лекция – это изложение научных истин для аудитории, которая не подготовлена к их восприятию. Разработку научно-популярной лекции надо начинать с уяснения темы. Она должна быть актуальной, интересной, конкретной и доступной для понимания. Ее следует четко сформулировать.

Работу над текстом выступления лучше начать с предварительного плана, который будет уточняться, изменяться.

При подготовке важно опираться на основные принципы дидактики.

Основные правила для подготовки и чтения научно-популярных лекций.

1. Определение тематики лекции.
2. Составление плана лекции и порядка изложения материала.
3. Подготовка конспекта лекции. Чем подробнее составлен конспект, тем проще затем читать лекцию.
4. Подбор демонстрационных экспериментов и иллюстративного материала.
5. Подбор наиболее важных и интересных научных фактов, примеров, описаний научных открытий и т.п.
6. Подбор наиболее ярких примеров применения получаемых знаний на практике.
7. Хронометрирование лекции и корректировка ее плана.
8. Подготовка презентации (при необходимости). При подготовке презентации нужно учитывать следующие обстоятельства:

- показ презентации не должен являться основным содержанием лекции;
- презентация не должна быть очень большой;
- не следует включать в презентацию большой объем текста;
- презентации нужно оформлять как можно более понятно, не злоупотреблять различными спецэффектами, тенями, бегущей строкой, мультипликацией и т.п.;
- при оформлении презентаций нужно использовать как можно более крупный шрифт, а также яркие цвета и нейтральный фон; например, не следует писать желтыми буквами на зеленом фоне и т.п.

9. Репетиция, апробация. Важно опробовать демонстрационное оборудование, проверить необходимое программное обеспечение и т.п.

10. Ответственное исполнение обязанностей лектора.

Следуя этим рекомендациям, была разработана лекция для обучающихся по теме «Физические основы звукоизвлечения».

Научно-популярная лекция была составлена на основе отобранного и проанализированного материала по физике и биологии 8 и 9 классов [1, 2]. В рамках лекции представлен материал, выходящий за рамки школьных учебников. Лекция рассчитана на учащихся 9-11 классов, но ее можно модернизировать и на другой возраст.

Основная цель подготовленной лекции: показать взаимосвязь знаний по физике и биологии, важность учета физических знаний в логопедии и вокале [3].

План научно-популярной лекции:

1. Анатомия голосового аппарата человека.
2. Строение голосового аппарата.
3. Отделы голосового аппарата.
4. Роль дыхательной системы в звукообразовании.
5. Голосовой отдел. Строение и функции голосовых связок.
6. Голосовые связки.
7. Резонаторы: ротовая, носовая полости и их влияние на тембр.
8. Звук и его характеристики.
9. Единицы измерения звука.
10. Голосообразование (физиология речи).
11. Физика для вокалистов и логопедов.

Одним из принципов, на которые важно опираться во время подготовки и проведения научно-популярной лекции – наглядность. Поэтому в ходе чтения лекции важно предусмотреть опыты, помогающие лучше понять и воспринять материал. Например: самодельный переговорный аппарат (из двух стаканчиков и нитки), демонстрация голосового аппарата человека (шарик, свисток и резонатор из картонной коробки), дребезжащая на столе железная линейка. Также лекцию сопроводить множеством картинок, помогающих визуализировать данный материал. Для изучения анатомии человека иллюстрации играют важную роль.

План научно-популярной лекции не является окончательным вариантом. В зависимости от возраста учащихся, для которых будет представлена лекция материал может быть изменен и добавлен. Считаем, что материал такой лекции вызовет интерес к изучению физики и покажет взаимосвязь школьных предметов.

Составленная лекция призвана продемонстрировать обучающимся, что физика – это не только теоретическая наука, но и основа множества процессов, которые окружают нас в повседневной жизни. Она демонстрирует, как работают физические законы в самых разных областях – от биологии и медицины до искусства и технологий, подчеркивая, что физика присутствует практически везде. Данная лекция может значительно повысить интерес обучающихся к изучению физики через прикладные примеры.

1. Драгомиров А. Г. Биология 8 класс: учебник /А.Г. Драгомилов, Р.Д. Маш. – М.: Вентана-Граф, 2019.

2. Перышкин А.В. Физика. Базовый уровень. 9 класс: учебное пособие / А. В. Перышкин, Е. М. Гутник, А. И. Иванов. – М: Просвещение, 2023.

3. Цветков А. П., Туманова Л. Н. Голосовые связки как колебательная система /А.П. Цветков, Л.Н. Туманова //Научные исследования XXI века. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2020.

УДК 372.853

ИГРОВОЙ УРОК ФИЗИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ «МАШИНЫ ГОЛБЕРГА»

Ю.А. Закирова¹, И.В. Верхотурова²

¹*Дальневосточный государственный аграрный университет (г. Благовещенск)*

²*Амурский государственный университет (г. Благовещенск)*

ckai@mail.ru

В работе представлены результаты проведения уроков физики в игровой форме с применением «Машины Голдберга», проводимых с обучающимися 5 – 11 классов Лицея АмГУ. На основном этапе урока обучающимся было предложено создать примитивную «Машину Голдберга», применяя для этого как выданный материал, так и любые подручные средства. Создание такой машины позволило обучающимся выйти за рамки стандартного урока и проявить свой творческий и инженерный потенциал, что способствовало учителю заметить и оценить склонности обучающихся к тому или иному виду деятельности в командной работе. Один и тот же игровой урок для каждого конкретного класса нес свой формат обучения.

Особенностью современного педагогического процесса является то, что центр тяжести при проведении занятий по предмету постепенно переносится на обучающегося, в отличие от традицион-

ного образования, где центральной фигурой является учитель. Учитель должен вовлечь и заинтересовать обучающегося своим предметом [1]. И здесь учителю может помочь «игровой урок», который сделает образовательный процесс более эффективным и интересным для обучающегося, если он основан на принципах и механиках игры и соревнованиях. Игровые методы, с одной стороны, интенсивно способствуют приобретению новых знаний и умений, с другой компенсируют информационную перегрузку психологическим, эмоциональным и физиологическим отдыхом [2].

В данной работе представлены результаты проведения уроков физики в игровой форме с применением «Машины Голдберга», проводимых с обучающимися 5 – 11 классов Лицея АмГУ.

«Машина Голдберга» – это сложное устройство, созданное для выполнения простой задачи с помощью множества не прямых и зачастую комичных шагов. Она названа в честь американского художника и изобретателя Рубена Голдберга, который стал известен своими карикатурами на сложные механизмы, выполняющие элементарные действия (рис. 1). В 1931 году он получил Пулитцеровскую премию за свои карикатуры, а его имя стало синонимом изобретений, которые делают простые вещи чрезмерно сложными, но представляют собой удивительное сочетание инженерного искусства, креативности и юмора.

В основу «Машины Голдберга» заложен «принцип домино». Она состоит из множества элементов, которые поэтапно взаимодействуют друг с другом. Каждый отдельный элемент машины выполняет свою функцию, но для достижения конечной цели требуется пройти через все этапы. Например, чтобы включить лампочку, машина может сначала сбросить шарик с определенной высоты, который далее покатится по наклонной плоскости и столкнется с домино, которое упадет на рычаг и так далее. В целом машина может включать в себя различные простые элементы (шестерни, рычаги, пружины и др.), на примере которых физику можно «потрогать руками». В машине можно задействовать простые бытовые предметы, окружающие нас, что позволит показать многогранность физики окружающего мира.

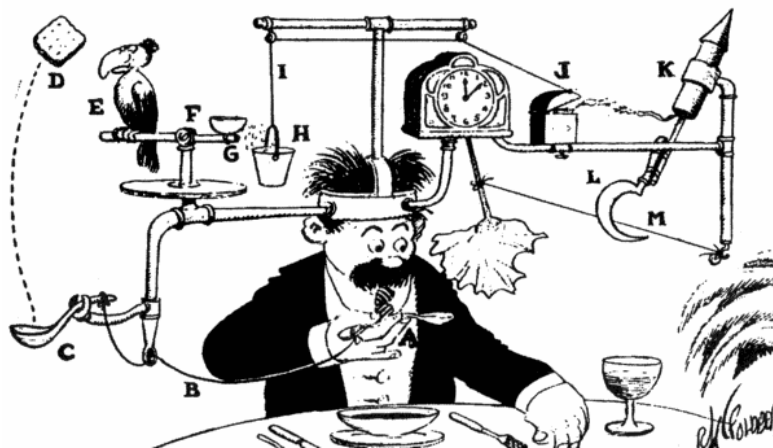


Рис. 1 Машина Руба Голдберга.

Создание такой машины – это увлекательное приключение, позволяющее обучающимся отвлечься, выйти за рамки стандартного урока и проявить свой творческий и инженерный потенциал. В дальнейшем это позволяет учителю заметить и оценить склонность обучающихся к тому или иному виду деятельности в командной работе. Один обучающийся фонтанирует идеями, другой четко их отсортировывает и перенаправляет конкретному исполнителю, а третий готов выстраивать отдельные этапы действия машины и многократно ее тестировать. В процессе над разработкой и созданием «Машины Голдберга» особенно ярко проявляются склонности обучающихся к инженерным наукам, что позволит в дальнейшем предметно работать с такими детьми.

Структура, проводимого игрового урока по физике для обучающихся разных классов (5 – 11 классы) Лицея АмГУ с применением «Машины Голберга» была классической. Урок в данном формате проводился отдельно для каждого класса. На его проведение было отведено два занятия, следующих друг за другом, чтобы обучающимся хватило времени на ознакомление с материалом темы, на разработку простейшей машины по заданию учителя и ее тестирование.

Начальный этап проводимого урока был направлен на заинтересованность обучающихся темой урока. Для этого было продемонстрировано применение «Машины Голберга» на примере двухминутного рекламного ролика «The Cog», выпущенного в 2003 году фирмой Honda. В ролике принцип домино «Машины Голберга» показан в действии с использованием оригинальных деталей Honda. Чтобы самым захватывающим образом продемонстрировать точность инженерных решений Honda без применения компьютерной графики и сокращений, а только ошеломляющее механическое волшебство, понадобилось 605 кропотливо созданных кадров для получения финального этапа ролика [3]. После просмотра рекламного ролика, обучающимся был задан вопрос: «Как вы думаете, что это?». Были бурные обсуждения, в результате которых обучающиеся пришли к выводу, что увидели сложную и долгую цепочку событий, цепную реакцию взаимодействующих механизмов, приведшую к определенному результату. При этом обучающиеся увидели, что если делать все нерационально и непланомерно, то как много усилий будет затрачено для получения простого результата. В завершении начального этапа урока с применением мультимедийных средств было рассказано о «Машинах Голберга», об их создателе Рубене Голдберге и о формальной классификации машин, акцентировав внимание на том, что машины можно разделить по нескольким признакам: по сложности (до 1000 шагов), по используемым элементам (различные предметы, игрушки, бытовая техника, инструменты и многое другое), по решаемой задаче, по стилю.

На основном этапе урока обучающимся разных классов было предложено создать примитивную «Машину Голберга», результатом работы которой было падение шарика в пластиковый стакан без помощи рук. Класс был поделен на четыре команды. Каждая команда получила одинаковый набор материалов – два теннисных мячика, три пластиковых стаканчика, ножницы, набор домино, малярный скотч, нитки. Кроме этого, обучающимся разрешалось использовать любые подручные материалы для творческого процесса. В результате создания машины, обучающиеся для движения шарика, сдвигали парты, ставили стулья один на другой, использовали все что было в своих рюкзаках, из учебников выстраивали наклонные плоскости, использовали вибрирующий телефон для запуска движения шарика, делали из стаканчиков туннели и др. В процессе работы получились очень яркие фотографии о ходе разработки машины. В итоге, у каждой команды получилась своя эксклюзивная машина.

На заключительном этапе урока проходило тестирование работы машин, участвующих команд и финальный их запуск, фиксируемый с помощью видео. По итогам запусков выбиралась команда победитель. Критерий отбора победителя – создание самых необычных и сложных этапов действия машины с применением подручного материала для достижения конечной цели. Выбрать единственную команду победителя оказалось трудно.

Урок физики, проведенный в данном формате, позволил проявить и развить в обучающихся следующие компетенции.

1. Умение предлагать идеи, общаться, доказывать свою точку зрения, договариваться, работать в команде.
2. Вырабатывать системное мышление, необходимое для построения общего сценария работы команды.

3. Проявление лидерских качеств, которые необходимы для грамотного управления проектом в целом и каждым его этапом в отдельности, для того чтобы команда пришла к выполнению поставленной цели.

Необходимо отметить, что проведение урока физики в таком формате идет в условиях высокой неопределенности и быстрой корректировки выполнения условий поставленной задачи. При этом урок легко изменяется под конкретную аудиторию. Для обучающихся 5 классов он получился как вводный урок-демонстрация, увлекающий в предмет физика, на котором они в будущем смогут не только наблюдать за особенностями падения шарика под действием силы тяжести и превращением одного вида механической энергии в другой, но и научиться с помощью физических закономерностей математически рассчитывать его траекторию, скорость, значение определенного вида энергии на каждом этапе движения и др. Для учеников 7-10 классов он получился не только как урок, способствующий приобретению новых знаний и умений по определенной теме, но и как урок-профориентация, на котором поведение и действия, обучающихся очень хорошо отразили их склонности к тому или иному виду деятельности – генератор идей, организатор или кропотливый исполнитель. Для обучающихся 11 классов проведение игрового урока с применением «Машины Голберга» позволило снять психологическую и эмоциональную перегрузку перед важным испытанием и было своеобразным отдыхом.

1. Лис Е. П. Применение игровых элементов на уроке физики //ФПВ. – 2009. – № 1. – С. 52-55.

2. Корнилов, Ю.В. Геймификация и веб- квесты: разработка и применение в образовательном процессе / Ю.В. Корнилов// Современные проблемы науки и образования. - 2017. - № 5.- с. 27-34.

3. <https://mediashower.com/blog/honda-cog-campaign/>.

УДК 372.853

СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ПОНЯТИЯ НА УРОКАХ ФИЗИКИ КАК ЭЛЕМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ УЧАЩИХСЯ О СОВРЕМЕННОЙ НАУЧНОЙ КАРТИНЕ МИРА

О.Е. Кадеева, В.Н. Сырицына

Дальневосточный федеральный университет (г. Владивосток)

kadeeva.oe@dvfu.ru, syricyna.vn@dvfu.ru

Данная работа посвящена проблеме формирования у учащихся средней школы представлений о современной научной картине мира. Перед современным учителем физики стоит задача сформировать у учащихся научное мировоззрение, стимулировать у них самостоятельное размышление о мире и вовлечение их в обсуждение устройства окружающей реальности. Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода от традиционной модели преподавания, в большей степени ориентированной на усвоение конкретных фактов, к модели, реализующейся в развитии критического мышления, исследовательских навыков и умения применять научные знания в нестандартных ситуациях. В рамках работы проведены экспериментальные исследования, направленные на апробацию разработанной методической системы.

Требования образовательного и воспитательного характера, предъявляемые к учебному процессу, непрерывно растут. Преподавание физики в средней школе вносит свой, специфический вклад

в сложный и многосторонний процесс формирования научного мировоззрения учащихся, его представлений о современной научной картине мира и гармонически развитого человека в целом [1]. В связи, с чем перед современным учителем остро встает вопрос преподавания физики в старших классах с упором на современные научные открытия и акцентом на актуальные проблемы и вызовы. Поэтому, от учителя физики требуются не только глубокие знания предмета, но и умения связать учебный материал с современным научным материалом и реальной жизнью. Важным этапом, определяющим успешность осуществления процесса формирования у учащихся научного мировоззрения и представлений о современной научной картине мира, в первую очередь, выступает предварительная, но тщательная подготовка учителя к уроку.

Далее раскроем некоторые этапы логики построения структуры современного урока физики в средней школе. Во-первых, учитель должен сформировать в сознании учащихся мысль о том, что современную физику невозможно отделить от других областей научных знаний. На конкретных примерах следует показать учащимся обусловленность развития физики общественными потребностями, подчеркнуть, что важные открытия в физике появились как ответ на вызов той или иной эпохи, а не как случайности. Так, например, при повторении понятий «поле», «вещество», «материя» можно учащимся показать связь перехода от этих понятий к современным научным понятиям, таким как «плазма», «кварк-глюонная плазма» на основе научных карточек, включающих в себя историческое содержание с конкретными заданиями (рис. 1).

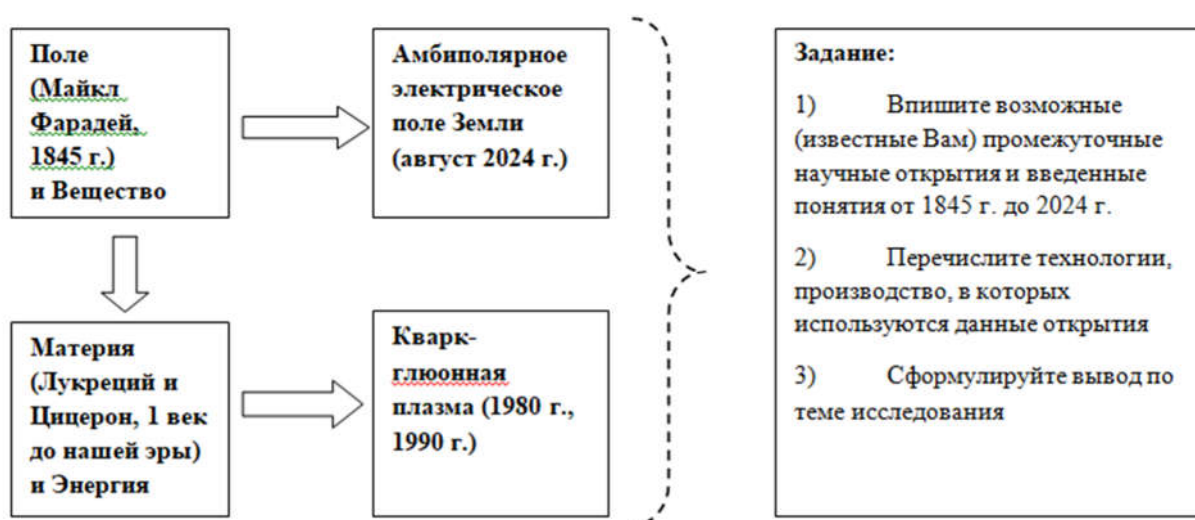


Рис. 1. Дидактическая карточка по теме «Этапы научных открытий в области изучения вещества, поля, материи и энергии».

Во-вторых, учителем должна быть грамотно организована деятельность учащихся по поиску и работе с научным материалом (справочники, научные и научно-популярные статьи и др.). Для этого перед учащимися ставится задача не только изучить современный научный материал, но и выполнить ряд исследовательских заданий. Например, при изучении в 11 классе раздела «Элементарные частицы» как итогового задания, используя текст научной статьи Р.А. Шишкина «Современные и перспективные материалы для термобарьерных покрытий» [2], учащиеся отвечают на следующие вопросы:

- 1) Перечислите физические понятия и явления, описываемые в тексте. К какому разделу физики они относятся? Почему в настоящее время используются термобарьерные покрытия материалов?
- 2) Опишите метод нанесения термобарьерных покрытий. Каким образом данный метод связан с элементарными частицами?
- 3) Изобразите принципиальную схему газотурбинного двигателя и схему изображений известных структур высокоэнтропийных соединений.

4) Изложите суждения в виде эссе о поиске и создании новых материалов, которые могли бы найти применение в российском производстве газовых турбин. Почему они несут в себе современное важное научное и практическое назначение в области элементарных частиц?

5) Подберите из современных научных журналов материал по исследованию современных элементарных частиц, описанных в статье.

При обучении современной физике при использовании такого характера ситуационных заданий учащиеся удовлетворяют свои познавательные интересы, стремятся самостоятельно разрешить описанные проблемы.

В современной школе начинается формирование научного мировоззрения, что представляет собой многоступенчатый и сложный процесс, который неразрывно связан с обучением. Основным объектом мировоззрения является реальный мир, однако оно выделяет из него специфический предмет – отношение человека к окружающей действительности, включая в себя, научные знания, жизненный опыт, убеждения, идеалы и даже эмоциональные оценки. Все эти элементы играют важную роль в формировании целостного представления о современной научной картине мира, а также должны учитываться ряд дополнительных условий. Во-первых, сам процесс обучения все же в первую очередь связан с изучением конкретного материала дисциплины (физики или какой-либо другой), но имплицитно содержащий обобщения и синтез знаний. Формирование у учащихся научного мировоззрения не может выделяться в отдельные уроки, а должно происходить систематически на каждом занятии, поэтому перед учителем стоит серьезная задача интегрирования мировоззренческих элементов в конкретный учебный материал изложения, а также требует от него квалификации и профессионализма в понимании взаимосвязи самого физического материала с элементами философско-мировоззренческих обобщений. Во-вторых, руководствуясь целью формирования у учащихся научного мировоззрения, учителю необходимо уметь на материале урока подводить учащихся к выработке личностных воззрений на значимость тех или иных эмпирических знаний и последующего их обобщения вплоть до самостоятельных теоретических гипотез, а посредством критического мышления и мысленного соединения с предшествующими знаниями способствовать выработке собственной убежденности в истинности полученного знания. Одновременно это характеризует соединение практики и теории, элементов опытно-экспериментальной деятельности учащихся и теоретического обобщения вплоть до мировоззренческих выводов. В-третьих, основы научного мировоззрения формируются всем комплексом учебных дисциплин, а не только школьной физикой и дисциплинами естественнонаучного цикла [3, 4, 5]. Необходимо привлекать к этому процессу и учителей социально-гуманитарных направлений, так как, и история, и обществоведческий курс обогащают знания учащихся. Например, из истории науки у учащихся складываются представления, каким образом менялись знания с течением времени, из основ философского знания учащиеся начинают разбираться в научных методах и областях научного познания.

Дальнейший анализ и практические рекомендации для современного учителя физики позволят разработать методическую систему, позволяющую сформировать у старшеклассников представления о современной научной картине мира и об основных особенностях научного мировоззрения.

1. Усик, Е.С., Кадеева, О.Е. Современные открытия в науке и их применение на уроках физики средней школы / Е.С. Усик, О.Е. Кадеева // Физика в школе. – 2025. – № 3. – С. 14-22.

2. Шишкин, Р. А. Современные и перспективные материалы для термобарьерных покрытий / Р.А. Шишкин // УФН. – 2025. – № 195. – С. 245-259.

3. Белых, К.И., Шаронова, Н.В. Взаимосвязь задач формирования представлений школьников о современной физике и развития их научного мировоззрения / К.И. Белых, Н.В. Шаронова //

В сборнике: Актуальные проблемы теории и практики обучения математике, информатике и физике в современном образовательном пространстве. Сборник статей III Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции. Отв. редактор В.Н. Фрундин. – 2019. – С. 99-101.

4. Кирюхина, Н. В., Варюха, Е. С. Об изучении вопросов современной физики в средней общеобразовательной школе / Н.В. Кирюхина, Е.С. Варюха // Проблемы современного педагогического образования. – 2024. – № 84-3. – С. 232-235.

5. Жакпаев, К.Р. Современная физика для учеников средней школы / К.Р. Жакпаев // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 99-1. – С. 76-78.

УДК 37.011

СЕТЕВАЯ ФОРМА РЕАЛИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ: ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ, РИСКИ

А.В. Казарбин¹, Ю.В. Лунина², К.А. Драчёв¹, С.И. Славгородская¹

¹Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

²Дальневосточный институт ВГУЮ (РПА Минюста России) (г. Хабаровск)

000283@togudv.ru

В статье авторы рассматривают сетевую форму реализации образовательных программ как способ создания единого образовательного пространства и взаимовыгодного сотрудничества в решении вопросов кадрового и ресурсного дефицита, описывают механизм реализации, задачи и возможные риски сетевого взаимодействия в образовательной деятельности.

Одной из важнейших задач государственной политики в сфере образования на современном этапе является организация партнерства образовательных организаций и предприятий промышленности через развитие сетевого взаимодействия на различных уровнях системы образования [1, 2].

Сетевое взаимодействие в образовании – это сложный механизм, благодаря которому происходит вовлечение сразу нескольких организаций в учебный или внеурочный процесс. Это усилия разных образовательных учреждений по централизации ресурсов. Данный алгоритм уже продемонстрировал свою актуальность и состоятельность. Сетевое взаимодействие учреждений образования предполагает особое социальное партнерство, в котором подразумевается «двусторонняя полезность». Между всеми участниками такого взаимодействия возникают неформальные и формальные контакты.

Актуальность создания модели сетевого взаимодействия образовательных организаций в рамках реализации программ профессионального образования связана с решением ряда проблем:

- проблемы повышения качественного уровня оказания образовательных услуг не отдельным учреждением, а системой в целом, что продиктовано, прежде всего, требованиями экономики;
- проблемы дефицита используемых ресурсов и отсутствия технологичных методик управления;
- проблемы интеграции образовательных учреждений с целью создания единого образовательного пространства для воспитания и социализации специалистов в рамках реализации ФГОС;
- проблемы развития и повышения уровня медиакультуры педагогов;
- проблемы развития социального партнерства и др.

Взаимодействие всех уровней образования в образовательной системе РФ имеет хорошо разрабо-

танную теоретическую основу, достаточный практический опыт, базируется и регламентируются ФЗ «Об образовании в РФ» (ФЗ-273), ФГОС по профессиям и специальностям, нормативно-правовой базой региона, локальными нормативно-правовыми актами образовательных организаций.

В основе модели сетевого взаимодействия образовательных организаций в рамках реализации профессиональных программ лежит понятие о сетевом взаимодействии образовательных организаций как совместной деятельности образовательных учреждений, входящих во взаимодействующую сеть и обеспечивающих возможность обучающимся успешно осваивать образовательные программы с эффективным использованием ресурсов нескольких образовательных учреждений. Механизм сотрудничества между высшими и средними профессиональными учебными заведениями основан прежде всего на использовании апробированных практик для внедрения практико-ориентированной модели подготовки будущих специалистов в рамках программ бакалавриата.

В качестве основных задач сетевого взаимодействия [3]:

- разработка эффективной модели профессиональной подготовки будущего инженера на основе сетевого взаимодействия вуза с образовательными организациями СПО;
- совместная реализация основных рамках функционирования научно-педагогического кластера, прикладных квалификаций, обеспечивающих наряду с фундаментальными знаниями в определенной предметной области квалификацию для работы с естественно-научными, гуманитарными и педагогическими технологиями; подготовка и проведение независимой сертификации выпускников;
- разработка общих информационно-методических ресурсов, таких как, базы данных примерных программ дисциплин (модулей) реализуемых в сетевом формате, базы данных контрольно-оценочных материалов по сетевым программам (в т.ч. электронных ресурсов) и др. методической деятельности;
- внедрение инноваций в образовательный процесс, новых технологий метапредметов, новых сетевых учебно-методических и учебно-лабораторных комплексов, форм, методов;
- организация практической подготовки (разработка и апробация программы учебных и производственных педагогических практик по апробируемым модулям и др.);
- развитие кадрового потенциала (привлечение преподавателей из числа работников отраслевых предприятий, стажировки педагогических работников на современных предприятиях, повышение квалификации педагогических работников, трансляция передового педагогического опыта и др.).

В данной статье описывают опыт сетевого взаимодействия двух образовательных организаций г. Хабаровска – ФГОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» (далее ТОГУ, университет) и КГБПОУ «Хабаровский государственный медицинский колледж имени Г.С. Макарова» (далее ХГМК, колледж).

Дадим краткую характеристику обоим образовательным учреждениям. В настоящее время Тихоокеанский государственный университет представляет собой крупный научно-образовательный центр, в котором гармонично сочетаются естественно-научные, гуманитарные и инженерно-технические направления. Университет является одним из опорных высших учебных заведений Дальневосточного федерального округа. Контингент 4 обучающихся по всем уровням образования составляет 13035 человек, в том числе по очной форме обучения – 8142 человека, по заочной – 4187 человек, очно-заочной – 706 человек. В состав университета входят 7 институтов, 25 высших школ и 1 кафедра. В университете сформирован квалифицированный профессорско-преподавательский коллектив, обладающий высоким потенциалом и возможностями решать задачи качественной подготовки специалистов и проведения научных исследований. В университете работает 609 научно-педагогических работников, из них: 529 – на штатной основе, из их числа: 69 докторов наук и 284 кандидатов наук; 28 – на условиях внешнего совместительства, из них: 8 докторов наук и 11 кандидатов наук.

В 2023 году в университете подготовка специалистов осуществлялась по 263 основным профессиональным образовательным программам. В том числе: 12 образовательных программ уровня специалитета, 124 образовательным программам уровня бакалавриата, 71 образовательной программе уровня магистратуры и 56 научным специальностям. В 2023 было подготовлено и выпущено 2613 человек, в том числе по очной форме обучения – 1534 человека, из них: специалистов – 183; бакалавров – 1143; магистров – 208. По очно-заочной форме обучения – 144 человек, из них: бакалавров – 106; магистров – 38. По заочной форме обучения – 935 из них: 5 специалистов – 34; бакалавров – 712; магистров – 189.

В структуру колледжа входят 2 филиала в гг. Комсомольск-на-Амуре и Николаевск-на-Амуре. Колледж реализует программы подготовки специалистов среднего звена в сфере клинической медицины по следующим специальностям: «лечебное дело»; «акушерское дело»; «сестринское дело»; «лабораторная диагностика»; «стоматология ортопедическая»; «стоматология профилактическая».

В настоящее время стратегической задачей развития Хабаровского края является подготовка кадров со средним профессиональным образованием для экономики региона. Острая потребность в квалифицированных кадрах сформирована и в отрасли здравоохранения (Постановлении Правительства Хабаровского края от 13.06.2018 № 215-пр (ред. от 25.11.2022) «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Хабаровского края на период до 2030 года»). В связи с чем, с 2018 года ежегодно планово увеличиваются контрольные цифры приема на 100 человек, к 2026 году КЦП достигнут 1100 человек. По состоянию на 10 сентября 2024 года контингент студентов колледжа составил 2350 человек (с учетом филиалов) и 97 штатных преподавателей. С 2020 года колледж начал испытывать дефицит ресурсов как в зданиях и сооружениях, так и в педагогических кадрах естественно-научной направленности и клинической медицины.

Особо стоит отметить, что в основе подготовки специалистов среднего звена в сфере клинической медицины лежит практико-ориентированный и компетентностный подходы подготовки. Компетентностный подход конкретизирует цель и конечный результат реализации модели – естественно-научную компетентность будущего специалиста в сфере клинической медицины, формируемую в процессе его практико-ориентированной естественно-научной подготовки. Практико-ориентированный и личностно-ориентированный методологические подходы позволяет выбрать эффективные формы, методы, технологии и средства практико-ориентированной естественно-научной подготовки, которые обеспечат эффективную проекцию естественно-научных знаний, умений и навыков в трудовые действия медицинского персонала, значимые для его деятельности профессиональные качества и естественно-научное мировоззрение.

Отправной точкой в подготовке специалистов среднего звена является естественно-научная подготовка, которая обеспечивает не только понимание физико-химических и биохимических процессов, происходящих в организме человека, степень влияния факторов внешней среды на его здоровье, но и лежит в основе выполнения множества трудовых действий в процессе клинической практики, позволяет овладевать новыми медицинскими технологиями и техникой, понимать механизмы действия лекарственных препаратов, осуществлять персонализированный уход и лечение пациентов, выходя за рамки существующих стандартизированных протоколов [4, 5]. Несмотря на значение естественно-научной подготовки в профессиональном становлении будущих специалистов в сфере клинической медицины, отечественные и зарубежные исследователи отмечают заметное снижение объемов часов, отводимых на изучение естественно-научных дисциплин, отсутствие интереса к ним у студентов, что негативно влияет как на освоение фундаментальных и клинических дисциплин, так и практическую деятельность медицинского персонала, которая должна осуществляться на основе внедрения последних

достижений естествознания в медицинскую науку и практику [6]. Вышеназванные проблемы поставили перед руководством колледжа задачу поиска и развития сетевого взаимодействия с образовательными организациями г. Хабаровска.

В настоящее время подписан договор о сетевой форме реализации образовательных программ, который позволяет взаимовыгодно решать такие вопросы как: повышения качества образования; эффективного использования имеющихся организационных условий для освоения образовательной программы; развития базы практик для прохождения учебных и производственных практик студентов педагогических направлений подготовки (как способ решения кадрового дефицита); участия в подборе сотрудников из числа профессорско-преподавательского состава; участия профориентационных мероприятий, мастер-классах, ярмарках вакансий и иных встречах; развития волонтерских движений студентов, а также патриотического воспитания и многое другое.

По мнению авторов, сетевое взаимодействие, позволяет более эффективно перераспределить и использовать ресурсы, поддерживать горизонтальное принятие решений, решать сложные задачи, разделять обязанности, способствовать обмену знаниями и распространению практики, повышать профессиональное развитие педагогов, укрепить имидж образовательной организации. Оно способствует более быстрому и качественному развитию образовательных инноваций, так как позволяет увеличить охват участников, ускорить процесс обмена информацией.

В процессе реализации программы сетевого взаимодействия авторами были выявлены следующие риски, негативно влияющие на развитие программы:

- отсутствие достоверных прогнозных данных о востребованности в специалистах среднего звена. Эти данные могут серьезным образом повлиять на состояние системы профессионального образования, на развитие социального партнерства образовательных учреждений и работодателей, на подготовку кадров и специалистов в необходимом количестве и качестве;

- возможные (или предполагаемые) негативные социальные последствия для работников образовательных организаций, что обосновано усилением конкуренции в системе профессионального образования, изменением отдельных существенных условий деятельности персонала, увеличением нагрузок, связанных с трудоемкими процедурами формирования сетевых образовательных программ и индивидуальных образовательных траекторий;

- неготовность руководителей образовательных организаций к реорганизации (созданию и организации функционирования образовательных комплексов, реализации программ в сетевом формате, транслированию положительного опыта на систему и др.);

- низкое научное обеспечение сетевого взаимодействия (понятийный аппарат, принципы, задачи, модели, показатели, эффекты, программы, технологии), рекомендации по формированию сетевых учебных пособий (сетевой практикоориентированный учебник, контрольно-измерительные материалы для диагностики качества сетевого обучения и др.). В связи с чем необходимо подготовить практических работников, которые будут выполнять инновационные функции (сетевой методист, сетевой преподаватель-тьютор, педагог-библиотекарь, сетевой администратор, сетевой психолог).

Авторы считают, что развитие сетевого взаимодействия позволит создавать образовательные организации профессионального образования нового типа, развивать в регионах новые механизмы взаимодействия образовательных организаций, внедрять новые механизмы финансирования, активнее вовлекать в организацию образовательного процесса работодателей и представителей бизнес-структур, обеспечивать информационную открытость и продвигать на рынок реализуемые образовательные программы.

1. Слинкина И.Н., Устинова Н.Н. Дефиниция сетевого взаимодействия в сфере образования // Проблемы современного педагогического образования. – 2021. – №71-2. – С. 333-335.
2. Указ Президента Российской Федерации «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» от 07.05.2024 № 309 // Официальный интернет-портал правовой информации. – 2024.
3. Самсонова О.В. Организация сетевого взаимодействия с общеобразовательными организациями в рамках реализации приоритетного ведомственного проекта «Образовательная индустрия будущего» // Инновационное развитие профессионального образования. – 2019. – №3(23). – С. 63-66.
4. Байков Н.М., Воронкин М.В. Сетевое взаимодействие организаций среднего профессионального образования региона: возможности и перспективы // Власть и управление на Востоке России. – 2022. – №1(98) – С. 76-90.
5. Вашукова И.С. Особенности сетевого взаимодействия в образовании // Отечественная и зарубежная педагогика. 2022. – Т.1, №1. – С. 141-152.
6. Курбанов А.А., Ланина С.Ю. Сетевое взаимодействие образовательных учреждений в рамках реализации профессионального образования // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 98-1. – С. 157-159. – DOI 10.18411/trnio-06-2023-48.

УДК 52:372.8

МЕТОДИКИ ИЗУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ФИЗИКИ: ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЯХ

Ю.А. Керимова

Благовещенский государственный педагогический университет (г. Благовещенск)

yulia.kerimova.01@mail.ru

В статье рассматриваются современные подходы к изучению солнечной физики в образовательных учреждениях, анализируются методы перехода от теоретических основ к практическим занятиям, а также предлагаются инновационные методики повышения эффективности обучения. Особое внимание уделяется интеграции междисциплинарных методов, использованию современных технологий и практических экспериментов для формирования у студентов системного понимания солнечных процессов и их влияния на Землю.

Солнечная физика занимает важное место в системе естественнонаучного образования, поскольку позволяет понять фундаментальные процессы, происходящие в нашей звезде, а также их влияние на климатические условия, технологические системы и жизнь на Земле. В условиях современного научно-технического прогресса актуально создание эффективных методик обучения, которые бы сочетали теоретические знания с практическими навыками, способствовали развитию критического мышления и самостоятельной исследовательской деятельности студентов.

Цель данной статьи – определить оптимальные подходы к изучению солнечной физики в образовательных учреждениях, обеспечить преемственность между теорией и практикой, а также предложить инновационные методы повышения мотивации и качества обучения.

Изучение солнечной физики включает в себя понимание структуры Солнца (ядро, радиационная зона, конвективная зона, фотосфера, хромосфера и корона), механизмов генерации энергии (ядерный синтез водорода в гелий), процессов солнечных вспышек, корональных выбросов массы (СМЕ), солнечного ветра и их взаимодействия с межпланетной средой.

Основные разделы теоретической базы включают в себя: астрофизику (строение звёзд, процессы внутри Солнца); плазменную физику, а именно свойства солнечной плазмы; электродинамику – магнитные поля и их роль в солнечных явлениях, а также метеорологию космической среды, влияние солнечной активности на земную атмосферу.

Однако без практических занятий эти знания остаются абстрактными и трудноусвояемыми. Поэтому важным аспектом современного обучения является создание условий для активного освоения материала через экспериментальную деятельность.

Эффективное обучение предполагает использование следующих методов.

Моделирование и симуляции, использование компьютерных программ позволяет визуализировать внутренние процессы Солнца. Solar Dynamics Observatory Simulation – моделирование динамики солнечных пятен. Plasma Physics Simulators – визуализация поведения плазменных потоков. Такие инструменты помогают студентам понять сложные процессы через интерактивное взаимодействие с моделями.

Практические эксперименты и лабораторные работы с доступными средствами включают создание спектра солнечного света с помощью дифракционных решёток. Использование фотоприёмников для регистрации интенсивности солнечного излучения. Моделирование магнитных полей с помощью электромагнитных устройств. Эти занятия развивают навыки работы с оборудованием и позволяют закрепить теоретические знания.

Организация наблюдений за солнцем с использованием специально подготовленных фильтров или телескопов способствует развитию практических умений, сюда входит регистрация изменений на поверхности солнца, анализ данных о солнечных пятнах и участие в международных проектах по мониторингу солнечной активности (например, Solar Monitoring Network).

Интеграция междисциплинарных методов, объединение знаний из физики, астрономии, географии и информационных технологий способствует формированию целостного представления о солнечных явлениях.

Инновационные подходы в обучении Современные технологии открывают новые возможности для изучения солнечной физики. Виртуальная реальность (VR) и дополненная реальность (AR) Позволяют моделировать внутренние слои Солнца или динамику магнитных полей в интерактивной форме. Студенты могут "погрузиться" внутрь звезды или наблюдать за процессами в реальном времени. Мобильные приложения разработанные для самостоятельного наблюдения за солнцем (например, Sun Surveyor), анализа данных о солнечной активности и ведения дневников наблюдений. Образовательные интерактивные платформы позволяют обмениваться результатами исследований, участвовать в онлайн-конференциях и конкурсах научных работ.

Инновационные методики требуют значительных ресурсов и подготовки преподавательского состава. Однако их внедрение оправдывает себя за счёт повышения качества образования, формирования у студентов системного мышления и исследовательских компетенций. Важным аспектом является создание условий для постоянного обновления учебных программ с учетом новых технологий и научных достижений.

Эффективное изучение солнечной физики предполагает комплексный подход, сочетающий традиционные методы с инновационными технологиями. Интеграция моделирования, практических экспериментов, полевых наблюдений и современных цифровых решений способствует формированию у студентов глубоких знаний о природе солнца и его влиянии на окружающий мир. Внедрение таких методик позволяет подготовить квалифицированных специалистов будущего — исследователей, инженеров и педагогов – способных анализировать сложные природные явления и применять полученные знания в научной деятельности.

Дальнейшее развитие методик предполагает расширение использования искусственного интеллекта для анализа данных о солнечной активности, создание виртуальных лабораторий с возможностью дистанционного обучения, а также развитие междисциплинарных проектов международного уровня.

-
1. Пшеничнер, Б. Г. Внеурочная работа по астрономии / Б. Г. Пшеничнер, С. С. Войнов. – М.: Просвещение, 1989. – 207 с.
 2. Шаронов, В.В. Солнце и его наблюдения / В. В. Шаронов. – М.: Гостехиздат, 1948. – 219 с.
 3. Левитан, Е.П. Методика преподавания астрономии в средней школе / Е.П. Левитан. – М.: Просвещение, 1965. – 228 с.
 4. Юрков, В.В. Методические рекомендации по проведению учебных астрономических наблюдений / Сост.: В. В. Юрков, Ю. П. Сергиенко. – Благовещенск: Издательство БГПУ, 2020. – 60 с.

УДК 52:372.8

МЕТОДИКА ДИСТАНЦИОННЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ЗВЁЗД И ТУМАННОСТЕЙ

Д.А. Кожин, Т.А. Меределина

*Благовещенский государственный педагогический университет (г. Благовещенск)
dimbaaw@yandex.com*

Статья посвящена обзору современных онлайн-платформ, предоставляющих возможности дистанционного наблюдения и изучения звёзд и туманностей. Рассмотрены ключевые сервисы с анализом их функциональных возможностей, технических характеристик и областей применения. Особое внимание уделено методикам работы с данными, включая фотометрию, спектроскопию и астрометрию, а также их интеграции в образовательный процесс.

Астрономы различного уровня сталкиваются с проблемой ограниченного доступа к профессиональному оборудованию: крупные телескопы требуют значительных финансовых затрат на установку и обслуживание, а географическая удалённость лучших обсерваторий делает их недоступными для большинства исследователей и образовательных учреждений. Особенно остро эта проблема проявляется в регионах, не имеющих собственной наблюдательной инфраструктуры, а также в учебных заведениях с ограниченным бюджетом. Современная астрономия всё чаще использует дистанционные методы наблюдений, позволяющие изучать космические объекты без необходимости прямого доступа к телескопам. Благодаря развитию цифровых технологий и открытых научных архивов, исследователи по всему миру могут анализировать данные, полученные с профессиональных обсерваторий, управлять телескопами онлайн и участвовать в международных проектах. Современные технологии позволяют изучать звёзды и туманности без прямого доступа к профессиональным телескопам. Дистанционные платформы предоставляют данные в различных диапазонах спектра (оптическом, ИК, радио), что расширяет возможности исследований для учёных, студентов и любителей.

Благодаря онлайн-платформам сегодня любой человек – будьто профессиональный астроном,

студент или увлечённый школьник – может управлять телескопами на другом континенте, анализировать данные с космических обсерваторий и участвовать в реальных научных открытиях. Дистанционные площадки устраняют географические и финансовые барьеры, предоставляя доступ к мощным инструментам: от автоматизированных телескопов в чилийских горах до архивов Hubble с миллионами снимков далёких галактик. Эти ресурсы не только меняют методы исследований, но и создают новые возможности для образования, позволяя на практике изучать звёзды, экзопланеты и туманности, используя те же данные, что и учёные NASA или ESO [1]. Ключевые преимущества онлайн-платформ включают: доступ к профессиональному оборудованию из любой точки мира, возможность работы с архивами данных ведущих обсерваторий, автоматизированную обработку наблюдений и интеграцию с научными проектами. Однако существуют и ограничения: зависимость от погодных условий на локации телескопа, очередь на доступ к мощным инструментам, необходимость специальных навыков для обработки данных и, в некоторых случаях, высокая стоимость коммерческих услуг. Ниже будут рассмотрены некоторые онлайн-платформы предоставляющие дистанционный доступ к телескопам или базам снимков астрономических объектов.

Slooh – онлайн-платформа для любительских и образовательных астрономических наблюдений. Платформа представляет собой уникальный сервис удалённого доступа к сети профессиональных телескопов, расположенных в оптимальных для астрономических наблюдений точках Земли. Основная обсерватория находится в Чили, где установлен 0,5-метровый телескоп с высокочувствительной ПЗС-камерой, а дополнительная площадка расположена на Канарских островах. Главное преимущество Slooh – интуитивно понятный веб-интерфейс и мобильное приложение, позволяющее даже новичкам легко управлять телескопами. Платформа предлагает несколько режимов работы: от "быстрых" 5-минутных сеансов за \$9,95 до комплексных пакетов для образовательных учреждений. Особого внимания заслуживает автоматизированная система обработки данных, которая предоставляет готовые FITS и JPEG файлы уже через 15 минут после наблюдения. В научном плане платформа доказала свою эффективность: в 2022 году с её помощью группа школьников открыла новый астероид. Однако сервис имеет и ограничения – максимальная экспозиция составляет всего 5 минут, что затрудняет изучение слабых объектов.

iTelescope – профессиональная сеть роботизированных телескопов для точных астрономических наблюдений. Сервис iTelescope.net представляет собой одну из наиболее технически оснащённых платформ для удалённых астрономических наблюдений, объединяющую 28 телескопов в стратегически важных точках мира – от обсерватории Сайдинг-Спринг в Австралии до высокогорных площадок в Чили и Испании. Основу парка составляют телескопы с апертурой от 0.25 до 0.5 метров, оснащённые прецизионными ПЗС-камерами и набором из 8 стандартных и узкополосных фильтров. Главной отличительной особенностью iTelescope является гибридная система управления, сочетающая предустановленные программы наблюдений с возможностью полной кастомизации параметров съёмки. Платформа предлагает уникальную функцию автоматического гидирования через отдельный 80-мм вспомогательный телескоп, обеспечивающую исключительную точность наведения ($\pm 0,5$ угловых секунд). Особенностью бизнес-модели iTelescope является гибкая поминутная тарификация (от \$0,50/мин), что делает сервис особенно востребованным среди астрофотографов и исследователей, нуждающихся в длительных экспозициях. К ограничениям можно отнести необходимость предварительного бронирования сеансов и достаточно высокий порог вхождения для начинающих пользователей.

LCOGT (Las Cumbres Observatory Global Telescope Network) представляет собой уникальную распределённую сеть из 23 профессиональных телескопов, стратегически расположенных в обоих полушариях Земли, включая мощные 2-метровые инструменты на Гавайях, в Австралии и Чили. Эта ин-

новационная инфраструктура, созданная при поддержке Фонда Мура, обеспечивает непрерывный мониторинг астрономических объектов благодаря уникальной системе ротации наблюдений между разными часовыми поясами. Ключевым преимуществом LCOGT является её научная ориентированность – обсерватория оснащена специализированным оборудованием, включая спектрографы FLOYDS (350-1000 нм) и высокоточный эшелле-спектрограф NRES с разрешением $R \approx 50,000$. Платформа активно используется для изучения транзитов экзопланет, наблюдений за сверхновыми и гравитационными линзами. Однако система имеет строгие квоты на наблюдения и требует научного обоснования запросов, что может ограничивать её использование для любительских целей. Техническая сложность работы с raw-данными и специализированным ПО также создаёт определённый барьер для начинающих пользователей.

MicroObservatory – инновационная образовательная платформа NASA для юных астрономов. Разработанная Гарвард-Смитсоновским центром астрофизики при поддержке NASA, платформа MicroObservatory представляет собой сеть из пяти полностью автоматизированных 15-сантиметровых телескопов, специально созданных для образовательных целей. Эта уникальная система демократизирует доступ к астрономическим наблюдениям, позволяя школьникам и студентам со всего мира проводить собственные исследования космических объектов через простой веб-интерфейс. Главной особенностью MicroObservatory является его ориентированность на учебный процесс. Платформа предлагает готовые методические модули для разных возрастных групп – от изучения лунных кратеров в начальной школе до сложных проектов по фотометрии переменных звёзд для старшеклассников. Все наблюдения автоматически обрабатываются системой (включая коррекцию атмосферных искажений и калибровку снимков), а результаты предоставляются в двух форматах – JPEG для быстрого просмотра и профессиональные FITS-файлы для углублённого анализа. Основным ограничением платформы является очередь на наблюдения (до 72 часов) и относительно скромные технические возможности телескопов по сравнению с профессиональными инструментами, что компенсируется продуманной методической поддержкой и полной бесплатностью сервиса [2].

Gaia – космический телескоп, запущенный ESA в 2013 году, представляет собой самый масштабный астрометрический проект в истории астрономии. Этот ультрасовременный 1,5-метровый телескоп, работающий в точке Лагранжа L2, создал беспрецедентно точный трёхмерный каталог более 1,8 миллиарда звёзд Млечного Пути с точностью измерений позиций до 10 микросекунд дуги (для ярких объектов). Основное отличие Gaia от других платформ заключается в его уникальной научной специализации. Телескоп оснащён двумя оптическими телескопами и самым большим ПЗС-детектором из когда-либо созданных для космических миссий (106 ПЗС-матриц общим разрешением 1 миллиард пикселей). Это позволяет ему не только определять положения звёзд с невероятной точностью, но и измерять их параллаксы, собственные движения, фотометрические характеристики в трёх спектральных диапазонах (G, BP, RP), а для ярчайших звёзд – даже лучевые скорости. Открытый доступ к данным Gaia через специальный архив (Gaia Archive) произвёл революцию в современных астрономических исследованиях. Учёные получили возможность изучать структуру и динамику нашей Галактики, обнаруживать редкие классы звёзд, исследовать тёмную материю и проверять фундаментальные физические теории. Например, данные Gaia позволили впервые построить точную карту спиральных рукавов Млечного Пути и обнаружить сотни гиперскоростных звёзд. Для образовательных целей ESA разработало специальные инструменты визуализации данных Gaia (как ESA Sky), позволяющие студентам и преподавателям работать с реальными научными данными. Однако работа с "сырыми" данными Gaia требует серьёзной подготовки и специального программного обеспечения, что может быть

сложным для начинающих пользователей. Кроме того, телескоп не предназначен для наблюдения конкретных объектов по запросу – это обзорный инструмент, собирающий данные по заранее определённой программе [3].

Онлайн-обсерватории предоставляют комплексный инструментарий для изучения космических объектов, превращая любую учебную аудиторию в полноценную исследовательскую лабораторию. Для звёздных исследований особенно ценны платформы с возможностью фотометрии – такие как Slooh или iTelescope. Через серию снимков в разных фильтрах (UBVRI) студенты могут построить кривые блеска переменных звёзд, определяя их периодичность и амплитуду изменений. Например, наблюдения за цефеидами позволяют не только изучить механизмы пульсаций, но и продемонстрировать фундаментальный метод определения межгалактических расстояний. Анализ данных Gaia даёт ещё более глубокие возможности – точные параллаксы миллиардов звёзд позволяют строить трёхмерные карты окрестностей Солнца, вычислять пространственные скорости и выявлять редкие объекты вроде гиперскоростных звёзд.

Исследование туманностей требует иного подхода – здесь ключевую роль играют многодиапазонные наблюдения. Платформы типа LCOGT с узкополосными фильтрами позволяют изучать структуру газовых облаков, определять температуру и плотность вещества. Студенческие проекты часто фокусируются на сравнении оптических снимков Hubble Legacy Archive с инфракрасными данными Spitzer – такой анализ выявляет скрытые пылевые структуры и области звездообразования. Особенно впечатляют образовательные кейсы по Крабовидной туманности, где можно сопоставить исторические наблюдения с современными данными рентгеновских телескопов, наглядно демонстрируя эволюцию остатков сверхновой.

Спектроскопические возможности (например, через спектрографы LCOGT) открывают ещё более тонкие методы исследования. Температура и давление (плотность) звезды может определяться по интенсивности и ширине линий различных элементов. Химический состав звезды определяется по интенсивности линий с учетом температуры. Светимость по ширине линий (обычно водородных) и сравнительной интенсивности некоторых линий. Движение звезды в пространстве: направление и относительная скорость по эффекту Доплера. Наличие и характеристики (индукцию) магнитного поля по эффекту Зеемана-Штарка, приводящего к расщеплению спектральных линий. Анализ эмиссионных линий в туманностях позволяет определить химический состав, температуру, плотность по относительной интенсивности линий отдельных элементов, электронную концентрацию и массу газа по яркости туманности в непрерывном спектре, внутренние движения вещества и движение туманности как единого целого (направление, скорость) по эффекту Доплера, в то время как абсорбционные линии в звёздных спектрах рассказывают о температуре, гравитации и металличности.

Современные онлайн-платформы коренным образом изменили ландшафт астрономических исследований и образования, стерев границы между профессиональными обсерваториями и учебными аудиториями. Как мы показали, от фотометрического анализа переменных звёзд до спектроскопии далёких туманностей – каждый этап исследования теперь доступен через интернет. Формулы, которые раньше существовали лишь в учебниках, сегодня оживают в руках студентов, работающих с реальными данными Gaia или управляющих телескопами LCOGT. Особую ценность представляет синтез различных методов: комбинируя астрометрию, фотометрию и спектроскопию, можно решать комплексные задачи – от определения возраста звёздных скоплений до изучения химической эволюции галактик.

2. Micro Observatory Robotic Telescope Network Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. Доступно по ссылке: <https://mo-www.cfa.harvard.edu/cgi-bin/OWN/Own.pl> (дата обращения 26.07.2025).
3. Gaia ESA Archive. Доступно по ссылке: <https://gea.esac.esa.int/archive/> (дата обращения 27.07.2025).

УДК 53.087

РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ ПИЛОТНОГО ПРОЕКТА РЕФОРМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

И.Б. Копылова

Амурский государственный университет (Благовещенск)
kopylovaib@mail.ru

С 1 сентября 2026 года планируется постепенный переход на новую систему высшего образования вузов России. Планируется постепенный переход всех вузов до 2030 года. С 2023 года осуществляется пилотный проект перехода, в котором участвуют 6 вузов страны. Данный проект выявил на сегодняшний момент преимущества новой системы, недостатки и проблемы.

Необходимость реформы высшего образования обусловлена несколькими причинами: выход из Болонской системы, необходимость дальнейшего обучения выпускника, сделать образовательные траектории более понятными для студентов. Двадцать лет обучения по Болонской системе показали, что она не обеспечивает подготовку высококвалифицированных специалистов, которые должны обеспечивать работу современной промышленности, развитие технологий и экономики. Дипломы вузов страны не принимались в странах Евросоюза [1].

Качество подготовки выпускников, за редким исключением, не удовлетворяло работодателей. Работодатели были вынуждены осуществлять переподготовку вчерашних выпускников. Магистратура не всегда могла решить задачу обучения уже готового к работе на предприятии специалиста. В таких условиях у выпускников возникали серьезные проблемы с трудоустройством. Что касается системы подготовки, то студенты порой не представляли где и на каких должностях они будут работать, а, главное, что же необходимо знать и как практически выполнять свою работу. Сокращенный срок подготовки в бакалавриате привел к тому, что выпускникам не хватало как теоретических знаний, так и практических навыков.

Что же предполагает новая система образования? Новая система предполагает три уровня образования: базовое, специальное и профессиональное. Базовый уровень предполагает обучение в течение 4-6 лет и является по сути полным высшим образованием. При этом предполагается получение теоретических знаний в течение 2-4 года по дисциплинам, необходимым для освоения основной специальности. Затем обучение 1-3 года для получения специальных и практических знаний. Подготовка по некоторым направлениям таким как инженер-исследователь по различным дисциплинам (химик, физик) требует более длительного обучения.

Специализированный уровень предполагает еще и получения дополнительных или более расширенных знаний по конкретной специальности, что приводит к увеличению срока обучения. Это еще и получение знаний по более узкой специализации. В каком-то смысле это соответствует современной магистратуре. Профессиональный уровень фактически соответствует аспирантуре. Поступить на этот

уровень можно только имея базовый уровень подготовки. Кроме того, можно прервать обучение после получения базового уровня, а затем получить специализированный или профессиональный уровень. Также возможен выбор между академической и прикладной специализацией. Предполагается, что выпускники с профессиональным уровнем могут работать в научной сфере, в качестве преподавателей высшей школы.

При разработке новых стандартов сохранится компетентностный подход с практико-ориентированным направлением обучения. Это означает, что образовательные программы делают акцент на практических навыках необходимых в профессии. Проектная работа значительно расширяется и направлена на решение практических задач, что подразумевает тесное взаимодействие с работодателями, предусмотрены стажировки для студентов. Оценка за освоение дисциплины будет учитывать не только результаты экзамена, но и проектов, выполненных в процессе освоения дисциплины, а также результатов портфолио.

Таким образом, выпускник, имея подготовку по требованиям работодателя, будет готов сразу приступить к работе по специальности. Это освободит работодателя от переподготовки выпускника, закрытию вакансий и кадрового дефицита.

Введение трехуровневой системы образования предполагает еще и отказ от прежних терминов и понятий. Полностью исчезнут понятия бакалавриат и магистратура после полного перехода на новые стандарты. Пока же студенты, осваивающие программы бакалавриата и магистратуры будут продолжать обучение и дипломы, полученные в конце обучения, будут, по-прежнему, иметь вес диплома о высшем образовании. Время обучения увеличивается, изменятся цифры приема, число бюджетных мест, финансирование обучения. Единый государственный экзамен (ЕГЭ) сохранит свою значимость и будет являться основанием для поступления в высшие учебные заведения. Большое значение будет иметь портфолио абитуриента, в котором отмечается участие в олимпиадах, конкурсах, проектах, стажировки, волонтерство с ориентацией на выбранную профессию (пример: в сфере улучшения экологии окружающей среды), а также наличие сертификатов о прохождении различных онлайн курсов. Форма диплома также изменится, в дипломе будет указываться специальность выпускника.

К недостаткам отказа от бакалавриата относится прежде всего увеличение сроков обучения и усложнение обучающих программ.

Для тестирования новой системы образования в 2023 году в России был введен пилотный проект, в котором приняли участие 6 вузов страны: Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»; Московский авиационный институт (МАИ); Национальный исследовательский Томский государственный университет; Московский педагогический государственный университет (МПГУ); Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (БФУ); Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (СПГУ) [2].

Вышеперечисленные вузы начали подготовку по новым стандартам, на обучение поступили около 12 тысяч студентов. В вузах также продолжается обучение по системе бакалавриата. Студенты, которые обучались на бакалавриате имеют возможность перейти на новую систему обучения. В общем система подготовки в настоящее время выглядит следующим образом (таблица) [3]. Кроме того, данным вуза предоставлено право на разработку и реализацию собственных образовательных стандартов.

Пилотный проект призван не только протестировать новые образовательные стандарты, улучшить подготовку выпускников, но ввести в образование новые методы и методики обучения с использованием современных информационных технологий. Это особенно важно для развития современной промышленности, науки, системы управления.

Можно привести только некоторые основные подходы в этом направлении. Прежде всего – это цифротизация, то есть внедрение цифровых технологий в учебный процесс, создание образовательных

платформ для освоения учебных дисциплин, создание цифровых тренажеров, использование гибридных форм обучения. Наличие таких средств обучения позволит студентам осваивать примерно 50% дисциплин дистанционно. При этом необходимо индивидуально контролировать качество усвоения материала преподавателем, что приведет к персонализации и доступности обучения. Практические же навыки будут осваиваться только в аудитории или во время практики на профильных предприятиях. Но здесь возникает проблема технической оснащенности вузов и наличие преподавателей практиков.

Система подготовки в 2025-2029 учебных годах

Уровень образования	Срок обучения, годы	Условие поступления	Результат обучения	Трудоустройство	Дальнейшее обучение
Базовый уровень	2-4	После сдачи ЕГЭ	Общетеоретическая подготовка. Практика, рабочие навыки	Рабочие позиции (специалист, техник)	Специализированный уровень
Бакалавриат	4	После сдачи ЕГЭ	Теория и базовая специализация	Более широкие возможности	Магистратура
Специализированный уровень	1-2	Базовый уровень	Практика, узкая специализация	Более высокие позиции (руководитель, эксперт,)	Аспирантура, МВА (магистр делового администрирования)
Магистратура	2-3	Только бакалавриат	Теория, наука или управление	Наука, гос. сектор	Аспирантура

Следующее направление – это разработка интерактивных методик таких как симуляции, задачи, которые решаются в команде, выполнение проектов, введение рейтингов и бальной системы. Все эти методики направлены на лучшее усвоение материала. Развитие надпрофессиональных навыков, не связанных с выбранной профессией, но влияющих на карьеру, так они в связаны с навыками коммуникации и поведение в социуме – это так называемые софт-скилы, также является важным аспектом подготовки современного выпускника.

Междисциплинарность, то есть интеграция знаний и методов различных дисциплин для решения конкретных задач необходима для подготовки по многим специальностям. Многие профессии в настоящее время требуют освоение дисциплин на стыке наук. Этот подход приводит к выработке критического мышления, способности осваивать смежные специальности или совершенствовать выбранную специальность.

Лидером реализации пилотного проекта является Санкт-Петербургский горный университет, где уже реализуется 81 программа. Усилена теоретическая подготовка, особенно на инженерных направлениях. Расширена также практическая подготовка, устанавливаются связи с работодателями для расширения баз практики.

Итоги двух лет развития пилотного проекта были приведены на информационных сайтах ректорами всех шести вузов. Все руководители отметили, что у студентов пилотного проекта более высокий балл ЕГЭ, более высокая успеваемость, заинтересованность в обучении и успешном завершении проекта. Расширение образовательных программ, формирование новой образовательной среды, усиленная теоретическая подготовка, расширение связей с работодателями, модернизация аспирантуры с ориентацией на обязательную защиту и подготовку преподавателей высшей школы.

Студенты, которые участвуют в проекте отмечают, что информации о проекте практически не было и они получили информацию при поступлении. При этом была возможность поступить на бакалавриат. Студенты, поступившие ранее, могли принять участие в проекте, написав заявление о пере-

воде. Таким студентам были перезачтены некоторые дисциплины, изученные ранее.

По истечении двух лет обучения студенты констатируют, что пока не видят особых отличий от бакалавриата. Однако, отличия все же есть: больший объем информации по изучаемой дисциплине, больше семинаров и практических занятий. Сессии проходят также как на бакалавриате, но количество зачетов и экзаменов увеличилось, это связано с тем, что дисциплина может изучаться в течение нескольких семестров. Дисциплины общетеоретической подготовки преподаются для нескольких специальностей или курса. Участие в эксперименте стимулирует интерес к учебе.

Преподаватели, участвующие в проекте, отмечают значительное увеличение нагрузки, связанное с необходимостью переработки программ, освоением новых подходов и технологий. Многие преподаватели оказались неподготовленными к стремительному изменению подходов к обучению студентов. Программы переподготовки преподавателей и курсы повышения квалификации практически не затрагивают направления развития высшего образования такие как цифротизация, разработка интерактивных методик для освоения междисциплинарных дисциплин и др. Нехватка квалифицированных преподавателей практиков. Кроме того, отмечается, что переход на новую систему подготовки легче проходит в ведущих вузах, региональные вузы испытывают большие затруднения, связанные прежде всего с техническим оснащением учебного процесса.

Все вышеперечисленные проблемы кадров и технического оснащения для осуществления реформы образования затрудняют участие многих вузов в пилотном проекте. Именно поэтому намечается постепенный переход на новые стандарты, которые будут обновляться и совершенствоваться довольно длительное время в соответствии с потребностями рынка труда. Разработка новых образовательных программ с акцентом на практическую ориентированность обучения.

В текущем учебном году набор осуществляется по старым стандартам на бакалавриат и в магистратуру. Массовый набор студентов ожидается в 2026 году.

Предстоящая реформа высшего образования в России имеет своей целью создание собственной системы образования, которая будет нацелена на улучшение качества выпускников, закрытие кадрового дефицита, повышение конкурентноспособности российских вузов, развитие региональных вузов.

1. Богданова И.И. Отмена Болонской системы: проблемы и перспективы высшего образования в России. // Актуальные проблемы педагогики и психологии. - 2022. - № 8. - С. 11-16.

2. Команда сайта Vuzopedia.ru. Базовое высшее образование: как прошел первый учебный год пилотного проекта? // <https://vuzopedia.ru/articles/7469>

3. Хромова А. Изменение в высшем образовании России в 2025 году // <https://media.foxford.ru/articles/izmeneniya-v-vyshhem-obrazovanii-rossii-2025>

ВНЕДРЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ОБРАЗОВАТЕЛЬНУЮ СРЕДУ**Т.Н. Корнеевко, И.А. Коростелева***Дальневосточный государственный университет путей сообщения (г. Хабаровск)**tnkorn77@gmail.com*

Авторы рассмотрели виды практик, которые могут быть использованы в образовании сегодня. Представлены общая схема использования, именно данных практик: цели и задачи развития образования, общие принципы построения и возможные педагогические подходы к решению главной задачи образования – целостного развития человека. По мнению авторов, практики с ИИ должны играть не ключевую, а вспомогательную роль.

Новые технологии стремительно входят в жизнь человека, делая его зависимым от них [1]. Эта зависимость проявляется в сфере безопасности, производства товаров и услуг, скорости информационного обеспечения и ее объема, наконец психологических взаимоотношений между людьми, области образования и самообразования, влияет на возможности саморазвития человека.

Наиболее остро данный вопрос проявляется в сфере образования. Можно отметить существенное расхождение позиций ученых по этому поводу. Одни из них настроены скептически относительно ИИ в образовательной среде. В частности, психологическое исследование выпускников школ [2] показало, что они не умеют перерабатывать (анализировать) большие тексты, осуществлять глубинную рефлексию, у них присутствует клиповизация мышления, а само мышление является блочным, разорванным, несистемным. Кроме того, обучение через Интернет затрудняет развитие эмоционального интеллекта человека (по данным ВШЭ), а именно его умение вступать и поддерживать разговор, дискуссию с другим, умение сопереживать, рефлексировать и т.п. В целом, сама способность к жизнеосуществлению, про-активной деятельности как возможности профессионального и человеческого саморазвития существенно тормозится.

Между тем, образование человека, не отвечающее современным вызовам, не может быть полноценным. Стремительность информационных технологий, а значит видоизменение по содержанию многих профессий, а в некоторых случаях их постепенный отход в прошлое, увеличивает «растерянность» человека перед «техническим миром машин», его неумение найти свое достойное место в мире технологий [3].

В этой связи важно не полное отрицание информационных технологий в образовании, а поиск разумного компромисса в применении их. Тем более, что применение информационных технологий уже хорошо зарекомендовало себя среди педагогического сообщества. Например, (1) использование дистанционного обучения (прохождение онлайн курсов в рамках самостоятельного обучения для студентов, повышение квалификации как самими педагогами, так и студентами, получение дополнительной специальности или родственной профессии), (2) самостоятельная разработка курсов педагогами, проведение занятий с использованием виртуальных лабораторных работ, проведение онлайн консультаций, разработка тестов и заданий для студентов, проведение экзамена или зачета по теме, (3) возможность консорциума с университетами, находящимися за пределами региона, ведущими НИИ. Эти и другие возможности существенно расширяют перспективы высшего образования. Отсюда, резюмировать разногласия в образовании среди ученых можно следующим образом: «...развитие когнитивной лени происходит при слепом копировании ответов студентами (например, при использовании

ChatGPT): они хуже запоминают материал, теряют навыки глубокого предметного анализа. Если ИИ всегда “думает за них” студенты перестают оценивать достоверность информации, свои пробелы в знаниях. Такая эрозия особенно влияет на разрушение высших психических функций, в частности креативности и оригинальности: студенты выдают шаблонные решения... Однако, если ИИ использовать как инструмент, а не в качестве замены интеллекта, то повышается скорость решения рутинных задач, качество идей растет...» (по данным ВШЭ, 2025). Следовательно, разумное сочетание новых технологий в образовании может значительно обогатить его.

Поэтому, в первую очередь необходимо определить (1) задачи, стоящие перед образованием нового человека; (2) принципы образовательного процесса, на которых эти задачи могут быть реализованы; (3) подходы к содержанию образования [4]. На рис. 1 представлена схема возможного изменения процесса образования.

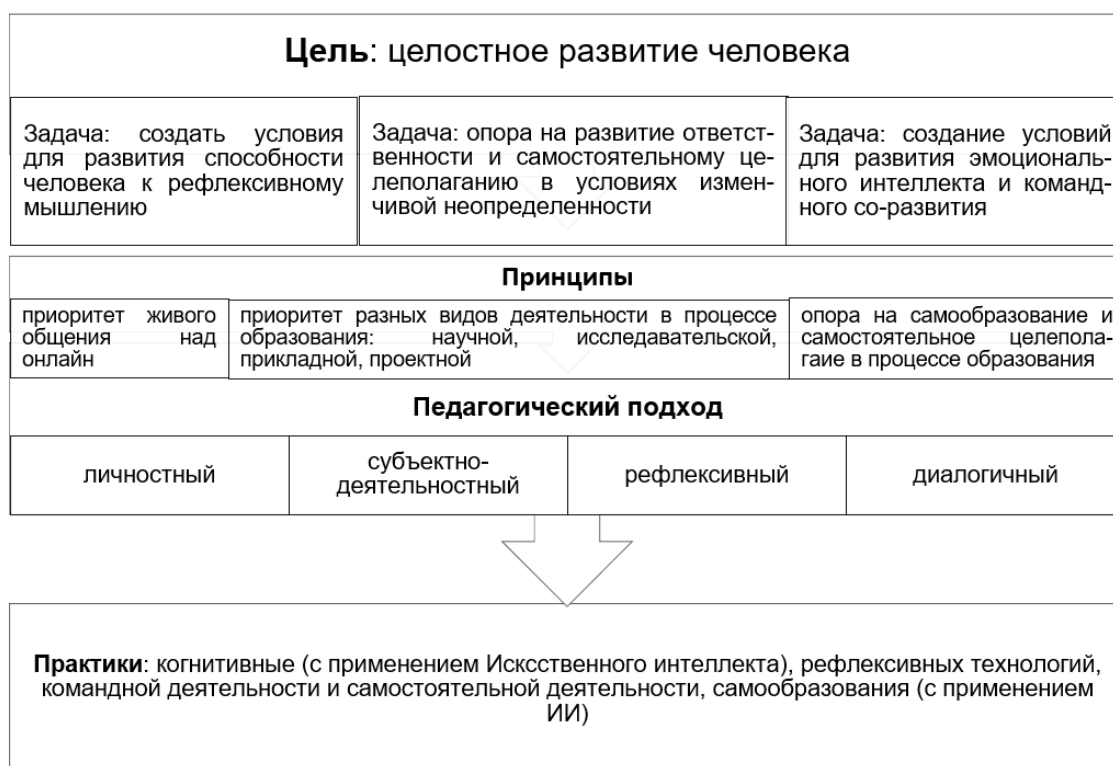


Рис. 1. Схема возможного изменения процесса образования.

Краткое представление сути. Наиболее сенситивным развитию является юношеский возраст. Поэтому, цель развития в университете не может быть частной. Целостное развитие человека означает развитие его не только когнитивных способностей, но и способности к глобальному (не логического, конкретного в условиях данной задачи, а скорее творческого, стратегического в силу быстрой изменчивости жизни), субъектности (самодетельности), диалогу и эмоциональному интеллекту, наконец, способам саморазвития и самообразования.

Принципы являются важнейшей опорой педагогического сообщества в университете, на которую необходимо опираться при построении и модернизации образовательного процесса. Первое, принцип живого общения со студентами, удельный вес которого значительно больше, чем взаимодействие с ИИ. Второй принцип - свободной самодетельности (субъектности) - означает возможность самостоятельного выбора студентом познавательной активности и команды развития (выбор может быть и индивидуальной деятельности, под руководством наставника), ее выполнение и анализ результата [5, 6]. Невыполнение или пренебрежение каким-либо пунктом не дает полноценного субъектного разви-

тия, такому выпускнику будет трудно встраиваться в действительность жизни. Кроме того, безответственность или отсутствие подведения итогов благоприятствуют халатности в дальнейшем. Третий принцип касается навыков самообразования, которые полноценно могут развиваться в университете. Причем самостоятельное развитие означает как индивидуальную стратегию (например, с ИИ, командой, полностью индивидуальную), так групповую. Например, даже если сам студент является капитаном команды, - то он ищет проект, распределяет роли, связывается с наставником, по поводу консультации и т.п.

Соответственно, принципы предопределяют педагогические подходы к содержанию образования. Педагогический подход показывает теоретическое, практическое наполнение принципа, его реализацию. Выделено три педагогических подхода: личностный, деятельностный (субъектный), рефлексивный, диалогический. Суть первого заключается в том, что во главе процесса образования поставлен сам человек, у которого есть свои предпочтения, соответственно, он может совершать выбор, есть цели и задачи, особенности характера. Кроме того, существуют внешние условия, - они также могут тормозить процесс обучения. Например, человек учиться вдали от дома, не знаком с группой, городским пространством. Период адаптации иногда занимает много времени, если не брать в расчет условия пребывания. Суть второго принципа подчеркивает деятельностный характер обучения. Когда обучение построено от студента, его активности. Чем больше таких образовательных ситуаций, тем лучше он усваивает материал. Это же подход определяет степень самостоятельности студента. Соответственно, самодеятельность с выходом на самообразование и саморазвитие является неотъемлемым условием успешности применения деятельностного подхода. Третий педагогический подход – рефлексивный – относится к одному из главных. Так, выполнение деятельности без осмысления, причем осмысления на разных уровнях, начиная от когнитивного, заканчивая ценностным. Именно последний уровень переживания и проживания деятельности выступает условием успешности самой деятельности для человека, поскольку она меняет человека, входит в структуры его поведения (А.К. Осницкий). Рефлексия возможна только с живым человеком, не с ИИ – педагогом, наставником, консультантом. Такие практики основаны на равноправном, уважительном диалоге (Г.П. Звенигородская). Они обязательны в университете. Наконец, диалоговый подход подчеркивает саму суть образования, которое может быть построено толк через диалог. Поскольку диалог выступает условием развития человека, а значит развития его эмоционального интеллекта, способности со-переживать, способности к творческому мышлению, ценностной сферы, способности к самообразованию.

Соответственно, педагогические практики [7], которые могут быть использованы, должны быть построены на диалоге, рефлексии, самодеятельности, элементах самообразования. Формы работы могут быть как групповые, так и индивидуальные. Например, практика развития и закрепления когнитивных навыков совместно с ИИ, по окончании должна сопровождаться рефлексией на личностном уровне, которая возможна только в диалоге с преподавателем, или с командой студентов, занятых общей задачей. Научно-исследовательские практики априори проводятся с научным консультантом, который направляет и организует работу студента. Исследование может быть, как учебным, прикладным, так и фундаментальным. Если это фундаментальное исследование, то университет может заключён специальный договор сотрудничества с НИИ. Тогда команда может выбирать консультацию онлайн – с учеными НИИ. Практики прикладного исследования, или проектной работы также занимают определенное место в образовании сегодня. Итогом проектной работы выступает конкретный произведенный в Инжиниринговом центре материальный продукт. Отдельные самообразовательные практики по самостоятельному изучению какого-либо курса или специальности также обязательны в современном образовании. Итогом их служат практики диалога – рефлексивной работы с наставником. Практики решения инженерных творческих задач или кейсов занимают определенное место в образовании. Возможны как групповые, так и индивидуальные формы. Поиск и анализ дополнительной информации,

дискуссия, диалог, защита совместного решения (продукта) перед всей аудиторией, с ответом на вопросы других команд и экспертов являются необходимыми составляющими такого вида практики.

Перечисленные практики и сегодня частично используются университетами. Однако, ИИ, развиваясь стремительным образом, входит в жизнь университета. Примером могут быть практики виртуальной и дополнительной реальности. Обратим внимание на то, что они полностью не удовлетворяют требованиям образовательной практики, как таковой. Поэтому использование их небезопасно, поскольку на выходе можно получить неврастенника, с надломленной ценностной сферой, а поэтому неспособного планомерно работать в команде, ставить и выполнять вертикальные цели развития в жизни.

Рассмотренные в статье элементы практик с возможной теоретической интерпретацией являются частным научным мнением авторов, а поэтому не претендуют на целостность. Между тем, авторами показаны цели и задачи развития образования, представлены общие принципы построения и даны возможные педагогические подходы к решению главной задачи образования – целостное развитие человека.

-
1. Теслинов А. Г. О двух классах трендов в образовании цифровой эпохи // Качество открытого дистанционного образования: концепции, проблемы, решения (DEQ-2017). Молодежь и наука. Материалы XIX международной научно-практической конференции и научно-практической конференции студентов. – 2018. – С. 183.
 2. Кузьминов Я. И., Юдкевич М. М. Университеты в России: как это работает. М.: НИУ ВШЭ, 2021. 616 с.
 3. Куренной В. А. Философия либерального образования: принципы // Вопросы образования. 2020. № 1. С. 8–39.
 4. Корнеев Т. Н. Современная модель образовательной среды университета с учетом исторического контекста его развития // Сибирский педагогический журнал. 2021. № 5. С. 17–29.
 5. Исаев Е. И., Слободчиков В. И. Психология развития человека: становление субъектности в образовательных процессах. СПб.: Свято-тихвинский православный университет, 2014. С. 432.
 6. Звенигородская Г.П. Понимание в контексте образования: феноменологическая оптика // Социальные и гуманитарные науки на Дальнем Востоке. – 2012. – №. 2. – С. 26-30.
 7. Сидоркин А. М., Кулаков А. М. Проблема невидимого в образовании // Практики развития: новые отношения в образовании, их реализация и возможности управления. – 2016. – С. 32-37.

УДК 378.1

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ ПРЕПОДАВАНИЯ ФИЗИКИ В ВУЗАХ

Ю.О. Коткина¹, В.И. Римлянд¹, Т.В. Хаас²

¹ Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

² Woscim PartG (Лейпциг)

000292@togudv.ru

В работе исследовались возможности использования общедоступных в интернете чат-ботов с искусственным интеллектом при преподавании курса «Общая физика» в вузе. Оценены возможности чат-ботов при решении различных математических задач. Выполнен анализ решения чат-ботами задач по физике различной сложности и составления тестов для контроля знаний студентов.

Нейросети и искусственный интеллект (ИИ) оказывают существенное влияние на учебный процесс, как в школе, так и в вузах. Это относится и к преподаванию физики. Возможны различные варианты применения ИИ в учебном процессе, при этом возможности чат-ботов постоянно расширяются [1, 2]. ИИ фактически изменяет подход к образованию. В 2024 года 16 % преподавателей российских вузов использовали технологии искусственного интеллекта [3]. При этом ИИ представляет возможности для совершенствования процесса обучения, а также возникает и спектр угроз, связанных с процессами использования ИИ недобросовестными студентами в процессе выполнения заданий и контроля знаний студентов [4].

В данной работе, рассматриваются возможности общедоступных в РФ чат-ботов: ChatGPT, DeepSeek, Всезнайка Турботекст, YandexGPT и других по решению различных задач по математике и физике, и составлению тестов. Чат-ботам задавались различные математические задания (промты), составленные авторами статьи:

- 1) арифметические выражения типа: «сложить цифры от 2 до 9 все в кубе» или « $(106780+83660084) \times (3847586 \times 2 + 345) - 56805 \times 764954$ »;
- 2) системы линейных уравнений с 2-3 неизвестными;
- 3) операции с векторами и матрицами;
- 4) задания на дифференцирование и интегрирования;
- 5) дифференциальные уравнения типа $y' - y \cos x = 2x \sin x$, $y(\pi/2) = 0$.

Все чат боты давали правильные ответы, приводя развернутое решение. При этом надо отметить, что в сентябре 2024 года первое задание часть чат-ботов выполняли неправильно. Соответственно на сегодняшний день все тестируемые чат-боты успешно решают математические выражения, которые встречаются в задачах по общей физике.

Для изучения возможности чат-ботов в решении по курсу Общей физики были предложены задачи на различные темы из сборников задач В.С. Волькенштейн [5] и А.Г Чертова [6]. Задачи предлагались в следующих различных вариантах.

1. Задачи из сборников.
2. Задачи из сборников с изменёнными цифровыми условиями.
3. Задача из сборника с изменёнными не корректными условиями.
4. Несколько оригинальных задач на разделы «Механика», «Электромагнетизм», «Оптика», «Квантовая теория».

Примеры двух подобных промтов: «Три заряда 5 Кл, 5 Кл и – 6 Кл находятся в вершинах прямоугольного треугольника с катетами 10 см и 12 см. Заряд – 6 Кл в вершине прямого угла. Найти напряженность электрического поля в центре гипотенузы, сделать чертеж».

«Чистый кремний освещают синим цветом, будет ли внутренний фотоэффект?».

5. Оригинальная задача повышенной сложности – промт «Записать уравнение напряженности электрического поля в электромагнитной волне и определить волновой вектор k по величине и направлению. Условия: волна сферическая, в источнике напряженность поля $E = 50$ В/м, частота колебаний в источнике 10000 Гц, начальная фаза 3, источник находится в начале координат, уравнения волны надо записать в точке с координатами $x = 20$, $y = 30$, $z = 0$. Поляризация вектора E в источнике перпендикулярна плоскости xz . Показать вектор E на чертеже. Расчеты проводить до конца.»

Варианты 1 и 2 чат-боты успешно решали, приводя полное решение. При этом нельзя было определить решал ИИ задачу или решение находилось в готовом виде в интернете. Некорректную задачу (вариант 3) чат-боты также решали и сообщали: или о недостатке данных, или указывали, что полученный ответ некорректен (например, определенная длина волны не соответствует области спек-

тра видимого света из условия). Однако, не смогли определить каких данных не хватает. Таким образом, можно сделать вывод, что без точных исходных данных ИИ не может дать однозначный правильный ответ [7]. Задачи варианта 4 решались некоторыми чат-ботами с ошибками: ChatGPT, Всезнайка Турботекст допускали ошибки на разных стадиях решения и при операциях с большими числами (момент инерции Земли). При этом все чат-боты самостоятельно находили необходимые справочные данные. Правильные ответы давали DeepSeek и Gemini.

Оригинальную задачу повышенной сложности все чат-боты решали и методически грамотно приводя развернутое решение. Однако часть из них допускали ошибки в вычислениях. На рис. 1 приведён скриншот одного из четырёх экранов данного решения.

1. Определение угловой частоты ω и длины волны λ :

Сначала найдем угловую частоту ω из заданной частоты $\nu = 10000$ Гц:

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi \cdot 10000 \text{ рад/с} = 20000\pi \text{ рад/с}$$

Затем определим длину волны λ , используя скорость света в вакууме $c \approx 3 \times 10^8$ м/с:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^8 \text{ м/с}}{10000 \text{ Гц}} = 30000 \text{ м} = 3 \times 10^4 \text{ м}$$

2. Определение волнового числа k :

Волновое число k связано с длиной волны следующим образом:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{3 \times 10^4 \text{ м}} = \frac{\pi}{1.5 \times 10^4} \text{ м}^{-1} \approx 2.09 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}$$

Поскольку волна сферическая и источник находится в начале координат, в точке наблюдения с координатами $(x, y, z) = (20, 30, 0)$, расстояние r от источника до точки наблюдения будет:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{20^2 + 30^2 + 0^2} = \sqrt{400 + 900} = \sqrt{1300} \approx 36.06 \text{ м}$$

Направление волнового вектора $\mathbf{k}$ будет радиальным от источника к точке наблюдения. Вектор $\mathbf{r}$ к точке наблюдения равен $\mathbf{r} = (20, 30, 0)$. Единичный вектор в этом направлении будет $\mathbf{n} = \frac{\mathbf{r}}{r} = \left(\frac{20,30,0}{\sqrt{1300}}\right) = \left(\frac{20}{\sqrt{1300}}, \frac{30}{\sqrt{1300}}, 0\right) \approx (0.555, 0.832, 0)$.

Таким образом, волновой вектор $\mathbf{k}$ будет:

$$\mathbf{k} = k\mathbf{n} = \frac{\pi}{1.5 \times 10^4} \left(\frac{20}{\sqrt{1300}}, \frac{30}{\sqrt{1300}}, 0\right) \approx (1.16 \times 10^{-4}, 1.74 \times 10^{-4}, 0) \text{ м}^{-1}$$

Величина волнового вектора $|\mathbf{k}| = k \approx 2.09 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}$.

Рис. 1. Скриншот одного из четырёх экранов решения.

Второй задачей данной работы было оценить возможности ИИ в составлении тестов по курсу Общей физики различного уровня. Для тестов, предназначенных студентам инженерных направлений, заданием являлся промт по составлению теста по разделу «Электромагнетизм». Промт состоял из двух частей. Первая часть – «Составь тесты к разделу курса общей физики для инженерных специальностей. Тема – электромагнетизм. Четыре варианта по 20 вопросов. Вопрос должен содержать четыре варианта ответа, лишь один из которых – правильный. Выдели его жирным шрифтом». Вторая часть промта включала 26 вопросов по данной теме из рабочей программы для данного курса. На рис. 2 приведен скриншот с экрана трех вопросов типичного теста.

Чат-боты составляли тесты значительно более простые, чем стандартные для тестирования студентов (например, в системах внешнего тестирования i-exam.ru). В тестах отсутствовали вопросы, связанные с вычислениями и рисунками.

Чат-боту DeepSeek для контроля студентов направления «Физика» по разделу «Колебания и волны. Оптика. Тепловое излучение» был задан промт: «Составь тесты. Тема – Колебания и волны. Оптика. Тепловое излучение. Четыре варианта по 20 вопросов. Вопрос должен содержать четыре варианта ответа, лишь один из которых – правильный. Выдели его жирным шрифтом. Тесты должны содержать вопросы, подразумевающие необходимость численных расчетов». Составленные тесты были значительно сложнее, чем в первом случае, содержали вопросы, требующие вычислений. Однако, уровень сложности оказался опять ниже требований, отсутствовали рисунки и графики. Было много повторяющихся вопросов в вариантах. Данные тесты были использованы для тестирования студентов после переборки примерно 20 % тестов преподавателем.

1. Какой формулой определяется сила Ампера?
 - а) $F = qv \cdot B$
 - б) $F = -IB \sin \alpha$
 - в) $F = -ma$
 - г) $F = kq_1 q_2 / r^2$
2. В каком случае магнитное поле не совершает работы над зарядом?
 - а) Если заряд неподвижен
 - б) Всегда
 - в) Если заряд движется вдоль линий поля
 - г) Если заряд движется перпендикулярно полю
3. Какой закон описывает распределение токов в разветвленной цепи?
 - а) Закон Ома
 - б) Правила Кирхгофа
 - в) Закон Ампера
 - г) Закон Фарадея

Рис.2. Скриншот с экрана трех вопросов типичного теста.

Из проведенного анализа следует, что общедоступные чат-боты:

- 1) эффективно решают математические примеры, вычисляют громоздкие арифметические выражения, решают уравнения, выполняют дифференцирование и интегрирование;
- 2) по физике решают задачи на уровне задачников для вузов по Общей физике, решения отличаются последовательностью алгоритма, подробными пояснениями;
- 3) при решении различных задач некоторые чат-боты допускают ошибки, как в вычислениях, так и непосредственно в логике решения;
- 4) данные чат-боты могут составлять тесты по физике различного уровня сложности, но формируемые тесты требуют доработки со стороны преподавателя.

Таким образом, применение чат-ботов с ИИ и доступом в интернет в преподавании физики в вузе открывает широкие возможности для повышения эффективности обучения и улучшения образовательного процесса. В частности повторять объяснение другими словами задачи, учитывая индивидуальные трудности студентов. Чат-боты могут проверять простые задачи, громоздкие вычисления или решения уравнений, оставляя преподавателю больше времени на анализ более сложных работ и взаимодействия со студентами. Чат-боты могут создавать различные виды тестов и выполнять тестирование и оценку знаний, а также оказывать помощь в ряде других методических вопросах и организации учебного процесса.

1. Mahligawati F. et al. Artificial intelligence in Physics Education: a comprehensive literature review. Journal of Physics: Conference Series 2596 (2023) 012080, 12th International Physics Seminar 2023. doi:10.1088/1742-6596/2596/1/012080.
2. Баланов А. Н. Искусственный интеллект. Понимание, применение и перспективы: Учебник для вузов. – 2-е изд. – СПб. : Лань, 2025. – 312 с.
3. Технологический суверенитет Искусственный интеллект. 7 октября, 2024 – 09:44. Опрос. <https://technosuveren.ru/opros-16-prepodavatelej-rossijskih-vuzov-ispolzujut-ii-pri-podgotovke-k-zanjatijam/> (дата обращения: 8.07.2025).
4. Yeadon W., m Hardy T. The Impact of AI in Physics Education: A Comprehensive Review from GCSE to University Levels. Physics Education, Volume 59, Number 2, 2024. Pp 1-22. DOI 10.1088/1361-6552/ad1fa2.
5. Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики. // 11-е изд., перераб. – М.: Наука. 1985. 383 с.
6. Чертов А. Г., Воробьев А. А. Задачник по физике. // 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1981. 496 с.
7. Антохина Ю. А., Татарникова Т. М. Методы и алгоритмы искусственного интеллекта: учебник для вузов. СПб. : Лань, 2025. 304 с.

УДК 378.147

ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПОДГОТОВКИ БУДУЩИХ УЧИТЕЛЕЙ ФИЗИКИ К РЕШЕНИЮ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ЗАДАЧ

И.А. Ледовских

*Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)
010399@togudv.ru*

Статья посвящена вопросам формирования педагогических условий, обеспечивающих эффективное профессиональное становление будущих учителей физики. Рассматриваются ключевые аспекты организации учебно-воспитательной деятельности, направленные на развитие профессиональных компетенций, повышение мотивации и стимулов к активной самостоятельной работе. Особое внимание уделено роли наставничества и педагогической практики в формировании профессиональных навыков. Обосновывается важность сочетания традиционных и инновационных подходов в обучении будущих педагогов. Результаты исследования демонстрируют значимость комплексного подхода к процессу подготовки учителей физики, ориентированного на реальные запросы современности и потребности образовательной сферы.

Сегодня мир стремительно меняется, и профессия учителя также претерпевает значительные трансформации. Вместе с развитием технологий и образовательных стандартов меняются и требования к педагогам. Современное общество предъявляет высокие требования к уровню подготовки педагогов, особенно в области естественнонаучных дисциплин, таких как физика, где технологические изменения требуют новых подходов к обучению. Учитель физики – профессия особенная. Это специалист, способный увлечь детей миром науки, научить разбираться в сложных физических законах и явлениях, сформировать понимание устройства мира вокруг себя. Чтобы соответствовать ожиданиям общества и успешно справляться с современными образовательными вызовами, учитель физики должен развивать свою профессиональную мобильность – способность быстро адаптироваться к изменениям в профессии, оперативно реагировать на потребности рынка труда и развития отрасли, легко осваивать новые методы и подходы к работе. Для учителей физики эта способность особенно важна ввиду пос-

тоянных изменений в методиках преподавания, появления инновационных учебных материалов и технических новинок.

Повышение качества математического и естественнонаучного образования является приоритетом государственной политики в области образования Российской Федерации. Основные аспекты и меры, направленные на достижение высоких стандартов подготовки специалистов в этих областях: Законодательная база и государственные программы – Федеральный закон № 273-ФЗ – регулирует общие принципы образовательной системы, включая развитие математического и естественнонаучного направлений [1]. Национальные проекты: такие как «Образование», включающий комплекс мероприятий по модернизации школьных лабораторий, оснащению школ современной техникой и оборудованием, создание специализированных классов физико-математической направленности. Президентская инициатива «Учителя будущего»: направлена на повышение квалификации педагогов, обучение новым методикам преподавания математики и естественных наук. Использование цифровых платформ («Российская электронная школа», «Фоксфорд»), онлайн-курсов, дистанционных форматов обучения позволяет повысить доступность качественного образования даже в удаленных регионах страны.

Согласно пункту 4 распоряжения Правительства Российской Федерации №3333-р от 19 ноября 2024 года [3] и распоряжению Министерства образования и науки Хабаровского края от 26 февраля 2025 года №182 [4], утверждён комплексный план мероприятий по улучшению качества математического и естественнонаучного образования в Хабаровском крае до 2030 года. Образование в области физики имеет ключевое значение для развития интеллектуальных ресурсов общества. Тем не менее, несмотря на значительную работу педагогов и методистов, подготовка школьников по физике остаётся недостаточно высокой.

Подготовка учителей физики в педагогических вузах напрямую связана с качеством математического и естественнонаучного образования. В педагогическом институте ФГБОУ ВО "Тихоокеанский государственный университет" ведется подготовка будущих учителей физики по УГСН 44.00.00 Образование и педагогические науки (44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями подготовки), профили: Информатика. Физика). Готовность будущих учителей физики к профессиональной деятельности формируется в процессе теоретического и практического обучения, что способствует формированию общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций, заложенных в Федеральных государственных образовательных стандартах высшего образования (ФГОС ВО) [2]. Поступление на первый курс университета на данное направление лишь косвенно свидетельствует о наличии у студентов способностей к физическому мышлению. Раскрытие потенциала способностей возможно при условии наличия благоприятной внешней среды, в которой данные способности могут проявиться в полной мере.

Подготовка квалифицированных учителей физики является одной из приоритетных задач высшего педагогического образования. От качества подготовки зависит успешность дальнейшего осуществления профессиональной деятельности, удовлетворенность трудом и востребованность специалиста на рынке труда. Основные направления реализации педагогически значимых условий включают организацию учебно-воспитательного процесса, формирование профессиональных компетенций и стимулирование личностного роста студентов.

Цель подготовки заключается в обеспечении готовности студента к осуществлению полноценной профессиональной деятельности учителя физики. Реализация цели предполагает решение следующих задач: формирование прочных знаний по выбранному профилю подготовки; овладение профессиональными умениями и навыками; развитие личностных качеств, обеспечивающих эффективную педагогическую деятельность. Для решения поставленных задач применяются различные организацион-

ные формы, методы и средства обучения. Среди них выделяются лекции, семинарские занятия, лабораторные практикумы, индивидуальные консультации, научно-практические конференции, педагогическая практика.

Будущие учителя физики обязаны иметь прочные знания фундаментальных основ своей дисциплины. Для достижения высоких стандартов профессиональной подготовки в программы обучения включен широкий спектр курсов и семинаров, направленных на развитие научно-методической компетенции будущих учителей. Физико-математическая подготовка играет ключевую роль в формировании профессиональных качеств будущих преподавателей физики. Эффективное освоение студентами педагогических вузов дисциплин профессионального блока и методического цикла создает крепкий фундамент для дальнейшей практической деятельности.

В соответствии с учебным планом, студенты, будущие учителя физики, изучают основы классической и квантовой механики, электродинамики, термодинамики, оптики, фундаментальные основы школьного курса физики. Важное внимание уделяется вопросам методики преподавания физики в школе, разработке учебно-методических комплексов и использованию инновационных образовательных технологий. Наряду с теоретической подготовкой, важно умение применять полученные знания на практике. Ведь физика – наука экспериментальная, именно опыт помогает ученикам лучше усвоить материал и развить интерес к предмету. Поэтому современный учитель физики часто организует лабораторные занятия, проводит опыты, демонстрирует эксперименты, делает акцент на наглядности учебного процесса. Мобильный учитель физики готов рискнуть и попробовать новые подходы к обучению. Проектная деятельность, групповая работа, активные формы занятий становятся частью повседневной практики современных педагогов. Методика критического мышления, игровые элементы, соревнования способствуют развитию творческих способностей и вовлеченности студентов.

Подготовка студентов включает изучение теории и методики преподавания физики, формирование навыков организации урока, планирования учебной деятельности, выбора оптимальных форм и способов подачи материала. Дисциплины методического блока обеспечивают подготовку будущих учителей к решению практических задач: разработке учебно-методических комплексов, проведению лабораторных работ, подготовке демонстрационных экспериментов. Одной из основных составляющих обучения будущих учителей физики являются научно-исследовательские проекты и самостоятельные исследования. Выполнение таких проектов способствует формированию аналитических навыков, развитию способности к постановке проблем и поиску решений, осознанию значимости научного подхода в обучении физике.

Важнейшей формой закрепления полученных знаний является прохождение педагогической практики. В рамках педагогической практики студенты получают реальный опыт ведения уроков, общения с классом, диагностики уровня освоения материала учащимися. Во время прохождения педагогической практики будущие специалисты применяют на практике изученные ранее методы и приемы обучения, оценивают эффективность применяемых методик. Дисциплины профессионального и методического циклов играют важнейшую роль в развитии профессиональных компетенций будущих учителей физики. Совершенствование содержания и структуры учебных планов, внедрение активных форм обучения, интеграция цифровой среды позволят обеспечить качественную подготовку кадров, готовых решать актуальные задачи современной школы.

Помимо глубоких профессиональных знаний, учитель физики должен владеть методами психологии и педагогики, необходимыми для эффективного взаимодействия с учениками. Это включает понимание возрастных особенностей детей, умение организовывать учебную деятельность, способность решать конфликтные ситуации и поддерживать высокий уровень мотивации обучающихся.

Организация учебного процесса направлена на обеспечение качественной подготовки будущих учителей физики. Она включает следующие компоненты: определение целей и задач обучения; выбор эффективных методов и приемов обучения; создание благоприятных условий для самореализации студентов; контроль и оценка результатов обучения. Эффективность учебного процесса обеспечивается соблюдением принципов дидактики, применением инновационных технологий обучения, созданием атмосферы творчества и партнерства между преподавателем и студентом. Активизация учебной деятельности студентов достигается путем внедрения различных форм и методов обучения, направленных на развитие интеллектуального потенциала студентов, формирование общей культуры и эрудиции. Использование данных форм и методов способствует повышению мотивации студентов к учебе, формированию профессиональных компетенций.

В процессе подготовки будущих учителей физики важную роль играет наставничество. Оно обеспечивает поддержку и помощь в преодолении трудностей, возникающих в ходе учебы и последующей профессиональной деятельности. Наставники оказывают содействие в профессиональном становлении студентов, формируют у них необходимые знания, умения и навыки. Педагогическая практика представляет собой одну из главных форм приобретения реального опыта будущей профессиональной деятельности. Педагогическая практика проходит под руководством учителей-предметников. Они помогают студентам освоить методы преподавания, познакомиться с особенностями школьной жизни, подготовить материалы для уроков, провести диагностику знаний учащихся.

Оценка эффективности подготовки осуществляется на основании анализа успеваемости студентов, оценки сформированности профессиональных компетенций, мониторинга удовлетворенности обучающихся качеством предоставляемых услуг, социологических исследований общественного мнения относительно качества подготовки специалистов. Таким образом, педагогические условия подготовки будущих учителей физики к решению профессиональных задач представляют собой систему взаимосвязанных мероприятий, направляемых на достижение высокого уровня профессиональной подготовки, соответствия квалификационным стандартам и общественным потребностям.

1. Федеральный закон от 29.12.2012 № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»[Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/36698> (дата обращения: 24.07.2025).

2. Федеральный Государственный Образовательный Стандарт Высшего Образования (приказ Министерства образования и науки Российской Федерации от 22.02.2018 №125 (ред. от 08.02.2021) «Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования», зарегистрирован 15.03.2018 №50358) - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fgos.ru/fgos/fgos-44-03-05-pedagogicheskoe-obrazovanie-sdvumya-profiluyami-podgotovki-125/> Дата обращения: 25.07.2025г.

3. Распоряжение Правительства Российской Федерации №3333-р от 19 ноября 2024 года.

4. Распоряжение Министерства образования и науки Хабаровского края от 26 февраля 2025 года № 182 Комплексный план мероприятий по повышению качества математического и естественнонаучного образования в Хабаровском крае на период до 2030 года.

ПОЗНАВАТЕЛЬНЫЙ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ФОТОГРАФИИ НА УРОКЕ ФИЗИКИ

И.В. Литовко

МАОУ «Школа № 26 г. Благовещенск» (г. Благовещенск)

livirina@mail.ru

В статье представлены приемы использования фотографий на уроках физики для активизации познавательной и исследовательской деятельности обучающихся.

Одна из главных задач физического образования в структуре общего образования состоит в формировании естественнонаучной грамотности и интереса к науке у обучающихся. Изучение физики на базовом уровне предполагает овладение следующими компетентностями, характеризующими естественнонаучную грамотность: научно объяснять явления, оценивать и интерпретировать данные, использовать научные доказательства для получения выводов [1].

В 7 классе, когда обучающиеся начинают знакомиться с новым учебным предметом, фотография рассматривается как источник информации, с помощью нее школьники могут воспроизвести знакомые картины природы или объектов, поделиться своими наблюдениями. На этапе актуализации или первичного усвоения знаний используется прием «Хочу рассказать...». Например, после изучения темы «Физические явления» предлагается фотография, обучающимся нужно перечислить наблюдаемые физические явления и объяснить их.

Вместо сообщений можно предложить школьникам представить несколько подобранных фотографий на слайде презентации на предложенную тему, за одну минуту объяснить их выбор.

Рассматривая фотографии одного и того же объекта (например, фотографии разных мензурок или часов), школьникам необходимо выделить общие или отличительные особенности (прием «Общее-разное»), исключить лишнее (прием «Третий лишний»). При выполнении таких заданий активизируется мыслительная деятельность обучающихся, происходит анализ и сравнение данных.

На уроках при изучении измерительных приборов обучающиеся знакомятся с устройством, принципом действия, определяют цену деления шкалы и показания. По фотографиям приборов составляются их Паспорта. Проблемным является задание, если на фотографии изображен не весь прибор, а только его шкала, или две шкалы. Учениками выдвигается гипотеза, для измерения какой величины может быть использован данный прибор, как пользоваться «двойной» шкалой.

На этапе закрепления усвоенного материала предлагается несколько фотографий, например, различных движений тел. Используя приемы «Выбери нужное» или «Одно слово», школьникам предлагается выбрать фотографии, на которых изображено равноускоренное или равномерное движение тел, прокомментировать свой выбор. К любой фотографии по пройденной теме можно сформулировать проблемный вопрос (приемы «Задай вопрос», «Хочу спросить...»), начинающийся со слова «Почему».

При изучении истории открытия явлений, изготовления первых приборов фотография помогает совершить «Экскурсию в музей». Например, увидеть, как выглядел первый радиопередатчик А.С. Попова, из каких основных частей состоял, сравнить со схемой радиоприемника, размещенной в учебнике. Или познакомиться, как выглядела первая электрическая лампочка А.Н. Лодыгина, выделить общее с современной лампочкой накаливания.

Работу с одной и той же фотографией можно организовать по группам. Например, на фотографии изображен опрокинутый стакан с пролитой водой. Группам предлагается следующие четыре вопроса по выбору (прием «1/4»).

- Пролитая на стол вода или такое же количество воды в стакане испаряется быстрее?
- Сравните быстроту испарения воды, пролитой на стол, и такого же количества воды в стакане.
- В стакан налита вода. Что нужно сделать, чтобы ускорить испарение?
- На чаши весов поставили два разных сосуда с одинаковым количеством воды одной температуры. Весы уравнились. Почему через некоторое время равновесие нарушилось?

Для ответа на первый вопрос нужно вспомнить зависимость скорости испарения жидкости от площади поверхности. При работе над вторым или третьим вопросом провести анализ предложенной ситуации, выдвинуть предположения, сравнить результаты. Четвертый вопрос заставит школьников «мысленно» провести опыт, объяснить результат.

Использование фотографии на уроке можно рассматривать как элемент исследования. Действительно, в процессе научного исследования происходит наблюдение за объектом или явлением, обобщаются полученные результаты, выполняется постановка проблемы, выдвигаются гипотезы, обобщаются научные факты, доказываются правильность гипотез и суждений, сравнение и анализ результатов эксперимента [2]. Данные этапы исследования возможны при использовании фотографий на всех этапах современного урока: при изучении физических явлений и процессов, решении расчетных и экспериментальных задач, качественных задач, выполнении домашнего эксперимента.

Как объект исследования фотографию можно использовать на любом этапе урока. «Вопросный» метод позволяет создавать проблемные ситуации, над решением которых работают обучающиеся при внимательном изучении фотографии. Например, предлагается две фотографии капелек воды на поверхности листьев растений. Почему форма капелек неодинакова? Или на фотографии изображен океанский туристический корабль. Почему корабль не тонет? Известно, что масса бронзовой фигуры Петра I составляет 8 тонн (рассматривается фотография памятника). Почему фигура памятника устойчива?

Для ознакомления с результатами экспериментов используются фотографии – «фокусы». Обучающимся нужно высказать свое мнение, возможно такое или нет. Например, можно ли с помощью спички уравновесить вилку и ложку? Для проверки правильности суждений проводится опыт на уроке.

Для развития экспериментальных навыков предлагаются домашние экспериментальные задания. Результат выполнения заданий представляется с помощью выполненной фотографии и представленной на мультимедийной презентации. Обучающийся может сам рассказать, как проводился эксперимент, какое оборудование использовалось, какие получены результаты, или учитель может предложить по данной фотографии рассказать другого ученика (прием «Составь рассказ»).

При изучении разделов «Физика атомного ядра», «Элементарные частицы» используются фотографии движения заряженных частиц. Обучающиеся, ознакомившись с экспериментальными методами изучения заряженных частиц, по фотографиям треков частиц могут узнать, в каком направлении двигалась частица, что происходило со скоростью ее движения, вычислить по радиусу траектории движения, какая именно частица двигалась [3].

Фотозадача – это задача, условие которой представлено в виде фотоснимка (или нескольких фотоснимков) физического явления или процесса. Применение таких задач позволяет сформировать умения анализировать физические явления и процессы по фотографии, развивать умения решать расчетные и экспериментальные задачи.

Например, школьникам предлагается фотография современных часов с боем на Спасской башне Кремля. Сообщается, что часы изготовлены в 1851 году, а длина часовой стрелки равна 2 метра

97 сантиметров. Как найти скорость и ускорение движения стрелки часов? Школьники предлагают свои варианты расчета скорости и ускорения стрелки, проводится расчет. Правильность полученного ответа проверяется с помощью справочных данных. А потом выдается фотография циферблата детских часов в натуральном масштабе и предлагается вычислить скорость секундной стрелки данных часов.

С помощью фотографий, полученных стробоскопическим способом, обучающимся можно предложить:

- доказать, что движение шарика по наклонному желобу является равноускоренным;
- рассчитать ускорение свободного падения шарика.

В астрономии с помощью фотографии получают информацию об астрономических объектах. С помощью фотографии Солнца предлагается определить размер солнечных пятен и сравнить и, например, с размером Луны.

Фотография, на которой изображено положение Солнца через каждый час, поставит школьников перед проблемой определения места и даты фотосъемки.

По фотографии спутника Ио, который отличается своей вулканической деятельностью, можно определить скорость выброса вещества одного из вулканов, сравнить со скоростью выброса вулканов на Земле. Школьникам нужно разработать план следующих работ.

- Определение масштаба.
- Вычисление высоты выброса.
- Расчет ускорения свободного падения на Ио.
- Вычисление скорости выброса вещества.

Фотографии включают в качестве оформления учебников, рабочих тетрадей и дидактических материалов. В контрольно-измерительные материалы ОГЭ, ЕГЭ по физике включены задания, выполнение которых связано с анализом информации, представленной на фотографии. Открытый банк заданий для оценки естественнонаучной грамотности обучающихся 7-9 классов содержит задания, сопровождающиеся фотографиями приборов, явлений, технических устройств и т.п.

Применение фотографий на уроке способствует формированию следующих компетенций школьников:

- когнитивные (любопытность, заинтересованность, наблюдательность, самостоятельность, умение описывать явление);
- методологические (осмысленность, умение анализировать, задавать вопросы, находить аналогии, выдвигать и доказывать гипотезы);
- креативные (генерирование идей, способность к обнаружению проблем, ассоциативность);
- личностные (тактичность, чувство уверенности, умение логично доказывать свою точку зрения, умение вести диалог). Среди данных компетенций те, которые позволяют сформировать познавательные и исследовательские навыки обучающихся.

1. Федеральная рабочая программа основного общего образования. Физика (базовый уровень) (для 7–9 классов образовательных организаций). – Москва: Просвещение, 2023. – 65 с.

2. Леонтович, А.В. Исследовательская деятельность учащихся / А.В. Леонтович. – Москва: Наука, 2003. – 96 с.

3. Чечель И.Д. Управление исследовательской деятельностью педагога и учащегося в современной школе. / И.Д. Чечель. – Москва: Сентябрь, 2008. – 140 с.

КОМПЛЕКСНАЯ ПРОГРАММА ВЫЯВЛЕНИЯ И МНОГОУРОВНЕВОЙ ПОДДЕРЖКИ УЧАЩИХСЯ, МОТИВИРОВАННЫХ НА ГЛУБОКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКИ

П.В. Логачев, Б.Г. Вайнер, М.Ф. Блинов

*Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Институт физики полупроводников им. А.В.Ржана-
нова СО РАН, Новосибирский государственный университет (г. Новосибирск)
boris-stmt@yandex.ru*

Предложена комплексная образовательная Программа, направленная на выявление и дальнейшую интеллектуальную и профессиональную поддержку глубоко увлеченных физикой учащихся. Ее реализация рассчитана на период от школы до окончания университета включительно. Актуальность Программы обусловлена высокой потребностью в обеспечении передовых российских научно-технических центров, в первую очередь, расположенных в Сибири, высококвалифицированными, инициативными и талантливыми специалистами физического профиля. Программа включает следующие основные этапы: 1) очное выявление мотивированных к физическим знаниям школьников, проживающих преимущественно в отдаленных районах России, где неподдельный интерес учащихся к вопросам, связанным с современной физикой, не всегда может быть удовлетворен уровнем компетентности или возможностями местных учителей и преподавателей; 2) систематическое онлайн-взаимодействие таких учеников с опытными педагогами, активно занимающимися научно-исследовательской и преподавательской деятельностью в современном научно-образовательном центре – Новосибирском Академгородке; 3) поднятие уровня физико-математической подготовки этих учащихся до беспрепятственного поступления на физические специальности Новосибирского государственного университета и Новосибирского государственного технического университета; 4) курирование вышеупомянутых студентов в период их обучения в вузе (помощь в выборе курсовых и дипломных работ, поиске научных руководителей и др.); 5) по окончании университета – надежное обеспечение названных выпускников интересным, высокоперспективным и высокооплачиваемым рабочим местом на одном из ведущих научно-технических объектов Новосибирского научного центра. Подобная Программа, задающая учебно-профессиональную траекторию от школы и непосредственно до места будущей работы, организуется в стране впервые.

Трудно смириться с нынешней обстановкой, сложившейся с выявлением и дальнейшей интеллектуальной поддержкой учащихся-старшеклассников, неподдельно увлеченных физикой, проживающих в "отдаленных районах" – Сибирь [1], Республика Саха (Якутия), Дальний Восток и др. В прежние времена таких одержимых физикой учеников удавалось систематически обнаруживать на очных собраниях, сопровождавших Всесоюзную олимпиаду школьников. Конечной целью при этом было дать таким ребятам путёвку в жизнь, которую, навряд ли, им удалось бы получить без подобной помощи.

Сегодня по разнообразным причинам ситуация в этой сфере кардинально ухудшилась. В Новосибирском научном центре (далее – ННЦ) традиционные выезды представителей СО РАН для проведения региональных олимпиад практически не осуществляются. Поиск учащихся по их научным интересам проводится, как правило, заочно, да и то, лишь с целью привлечь к обучению в СУНЦ НГУ, где акцент на физику, к сожалению, последнее время заметно ослаб по сравнению с тем, что было в ФМШ в ранние годы ее существования. Не отрицая того, что СУНЦ НГУ дает хорошее среднее образование, имеет место такое явление, что ряд его выпускников испытывает неопределенность, находясь на распутье: "В какой ВУЗ поступать?" Иногда даже встает вопрос: "Кем быть?" (математиком, информатиком, химиком, экономистом, ...).

Физика, бесспорно, является одним из важнейших школьных предметов, поскольку эта наука о природе сопровождает человека на протяжении всей его жизни, оберегая зачастую от фатальных событий. Это не “наука о формулах”, как считают некоторые учащиеся и, что прискорбно, некоторые учителя. Это то, без чего невозможно себе представить разумную систему общего образования цивилизованного человека как на уровне средней, так и высшей школ.

Соответственно, тем старшеклассникам, кто в силу своей природной одаренности или сформировавшихся еще в юношеском возрасте пристрастий сумел оценить красоту и уникальность физики, *необходимо* предоставить максимально широкие возможности для полноценного удовлетворения их научного интереса, чтобы такие ребята не потерялись в жизненной суете с массой отвлекающих и уведящих в сторону факторов. Необходимо настойчиво продолжать поиск мотивированных на физику детей, кто в будущем вполне может стать цветом Российской и мировой физико-технической науки, взяв старт в Новосибирске. Ключевыми помощниками в этом процессе являются учителя физики, поскольку именно они ближе всего находятся к детям, о которых идет речь, и лучше любого способны распознать кому требуется всё то, что составляет основное содержание настоящей работы, подробно раскрытое ниже.

Следует уточнить, что обсуждаемый поиск и отбор школьников вовсе не ориентирован на отличников или участников физических олимпиад, хотя эти качества и не противопоказаны. Главенствует здесь лишь неподдельный интерес ребят к предмету!

Целью, разработанной нами и уже испытанной в пилотном варианте оригинальной учебно-образовательной программы (далее – Программа) служит выявление и дальнейшая многоуровневая поддержка ориентированных на физику детей, не имеющих сегодня по разным причинам возможности полноценно и всесторонне удовлетворить свою мотивацию. Другой, не менее важной, конечной целью является обогащение ННЦ свежим контингентом толковых сотрудников, способных с творческой отдачей работать на современном экспериментальном оборудовании, получая на нем научные результаты мирового уровня.

В силу последнего, неременным условием включения претендента в Программу служит следующее требование: номинант-одиннадцатиклассник с полной ответственностью обязуется по окончании школы (лицея, гимназии и др.) подать документы для поступления на физфак НГУ или физтех НГТУ, отдав этим вузам абсолютный приоритет в своих предпочтениях. Нарушение этого правила остается на совести участника.

Алгоритм реализации Программы состоит в следующем.

Предпочтительно в сентябре каждого года осуществляются выезды специалистов ННЦ, подключенных к Программе, в отдаленные от Новосибирска регионы, для начала – в крупные города, где по предварительной договоренности с директорами средних учебных заведений организуются встречи с молодежью и местными преподавателями. Приглашенные из разных школ (лицеев, гимназий) старшеклассники и учителя физики собираются в большом (актовом) зале одного из учебных заведений (возможно проводить встречи и на разных площадках). Прибывший специалист читает “для затравки” научно-популярную лекцию о последних достижениях современной науки. Затем доводит до присутствующих подробную информацию о Программе и призывает к участию в ней. После лекции в отдельном кабинете проводится собеседование с теми, кто рассматривает для себя возможность (или необходимость) принять в этой Программе участие.

После отъезда представителя решившие откликнуться направляют в адрес организаторов запросы, на основании которых организуются первые онлайн-встречи учеников с преподавателями и по итогам – отбор участников.

До завершения учебного года прошедшие отбор проживают дома, продолжая учиться в своей

школе вплоть до выдачи им аттестата зрелости. Каждый при этом в режиме онлайн по обоюдному согласованному расписанию работает со своим персональным Новосибирским преподавателем физики высокой квалификации, повышая свой уровень знаний и расширяя физический кругозор. На таких занятиях осуществляется подготовка к поступлению на физический факультет НГУ или физико-технический факультет Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) для беспроblemного там последующего обучения. Помимо прочего, ученики выполняют контрольные работы по пройденному материалу. "Неуспевающие" исключаются из состава участников за утрату интереса к Программе.

Важно отметить, что все мероприятия в рамках Программы обходятся учащимся бесплатно.

Следует обратить внимание на то, что стиль, форма и даже тематика проводимых онлайн-занятий могут существенно отличаться от того, что предлагает и реализует стандартная школа и, соответственно, что привычно и знакомо ученикам. Акценты в процессе обучения могут расставляться даже не так, как принято в профильных физико-математических классах. Учителя физики, реализующие Программу, проводят занятия, опираясь на свой личный преподавательский опыт, дающий, как правило, высокий образовательный эффект. К слову, следует сказать, что к разделению учащихся на профильные классы не всегда стоит относиться, как к бесспорному достижению отечественной системы образования, свободному от критики [2].

Одним из достоинств реализуемой по Программе схемы обучения и общения учеников с преподавателями является персонализированный подход к каждому учащемуся. Учебная программа при этом становится весьма гибкой и предварительно намечается лишь ориентировочно. Часто бывает, что ученики сами инициируют тему очередных занятий, которую они, как правило, недостаточно хорошо усвоили в школе или она просто им интересна.

Кроме того, одним из преимуществ занятий по Программе можно назвать то, что здесь ребята не только глубже и точнее познают теоретические основы физики, но, что особенно важно, знакомятся с общими методологическими подходами и принципами познания мира – по сути, с главным, что будущему студенту необходимо вынести со школьной скамьи [3].

На зимних каникулах наиболее отличившимся ученикам и помогшим их выявить учителям физики предполагается предоставить возможность посетить Новосибирский Академгородок (финансирование – за счёт Новосибирска или местной администрации). Здесь дети смогут напрямую познакомиться с достижениями передовой физической науки. В том числе, увидеть своими глазами источник синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ – Сибирский кольцевой источник фотонов – новейший объект мирового и даже сверхмирового уровня, созданный Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН [4, 5]. Учителям также планируется дать возможность бесплатно пройти курсы повышения квалификации и получить об этом соответствующий сертификат.

Одной из уникальных особенностей Программы является то, что после поступления в вуз организаторы не бросают своих подопечных, а продолжают их курировать также и в период студенчества. Это реализуется в форме привлечения ребят к увлекательным научным исследованиям под руководством учёных высокого класса, оказания помощи при выборе тем курсовых и дипломных работ, консультирования по изучаемому материалу и др. Такое персональное сопровождение осуществляется вплоть до защиты диплома.

Но, пожалуй, самой важной и необычной стороной обсуждаемой Программы служит такая, которую сегодня пока еще не предусматривают никакие российские вузы и средние учебные заведения, включая СУНЦ НГУ. Это систематическая *целевая* персонализированная подготовка отобранной молодежи для послевузовской высокоперспективной, интересной и высокооплачиваемой работы на кон-

кретных передовых исследовательских объектах ННЦ. Иначе говоря, отобранным для участия в Программе ученикам ещё в школе задается траектория и планируются конечные перспективы профессионального становления, развития и роста в предстоящей жизни! Попасть в такую Программу – это несомненная удача и, надо прямо сказать, везение.

В заключение заметим, что поиск и выявление высокоперспективных мотивированных учеников для участия в Программе кардинально отличается от популярной сегодня “охоты за абитуриентами”, предпринимаемой многими отечественными вузами. Прежде всего, число таких “находок” согласно сущности самой идеи, изложенной в настоящей работе, на порядки меньше, чем ежегодно “выявляемое” количество абитуриентов, и потому в масштабах потребностей вузов в новых первокурсниках участники Программы погоды не делают. Во-вторых, надо понимать и ясно осознавать, что не Программа нуждается в участниках, а участники могут считать для себя большой удачей, попав в нее. Ни один вуз сегодня, будь он в Москве или Санкт-Петербурге, подобных благ им не предоставит. Поэтому, чтобы удержаться в Программе, воспользовавшись ее преимуществами до конца, и не быть отчисленным, необходимо исполнять все ее требования с неизменным желанием и полной творческой отдачей.

1. Диденко, Л.А., Кирко, В.И., Лукьянова, А.А., Саволайнен, Г.С. Факторы развития системы образования отдаленных северных территорий Красноярского края // Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. В.П. Астафьева. – 2019 – Т. 50(4) – С. 14–28.

2. Вайнер, Б.Г. Новые концепции обучения на старшей ступени общего образования в средней школе, включая СУНЦ // Профильное образование и специализированное обучение: перспективы развития в цифровом пространстве: Сб. мат-лов Всер. научно-метод. конф. (г. Новосибирск, СУНЦ НГУ, 10-11 декабря 2022 г.) / Отв. ред. В.В. Петров. Новосибирск: ИПЦ НГУ. – 2022. С. 11–18.

3. Вайнер Б.Г. Развитие логического и доказательного мышления у школьников на уроках права // Профильное образование и специализированное обучение: стратегия, тактика и технология развития в поликультурном пространстве: Сб. мат-лов Всер. научно-метод. конф. с междуна. уч-ем (г. Новосибирск, СУНЦ НГУ, 09-10 декабря 2023 г.) / Отв. ред. В.В.Петров. Новосиб. гос. ун-т; СУНЦ НГУ; ИФПР СО РАН. – Новосибирск: ИПЦ НГУ. – 2023. С. 27–32.

4. Булавченко, О.А., Винокуров, З.С., Селютин, А.Г., Мищенко, Д.Д., Сараев, А.А., Гольденберг, Б.Г., Цыбуля, С.В., Зубавичус, Я.В. Концептуальный дизайн экспериментальной станции 1-7 SKIF-НГУ "Базовые методы синхротронной диагностики для образовательной, исследовательской и инновационной деятельности студентов" // Журнал структурной химии. – 2023 – Т. 64 – С. 113304:1-11.

5. Nazmov, V.P., Goldenberg, B.G. The SKIF X-Techno Beamline Project // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2023 – V. 17 – P. 1273–1277.

РЕШЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ЗАДАЧ КАК ОДИН ИЗ МЕТОДОВ ПОДГОТОВКИ ОБУЧАЮЩИХСЯ К ИТОГОВОЙ АТТЕСТАЦИИ НА УРОКАХ ФИЗИКИ

Е.Н. Масленникова

МАОУ «Школа № 14 г. Благовещенска» (г. Благовещенск)

elena1964maslen@mail.ru

В статье рассматриваются некоторые качественные задания, которые можно использовать на уроках физики при изучении определённых тем курса физики 7-9 и 10-11 классов для успешной подготовки обучающихся к итоговой аттестации.

В современном мире всё большую значимость приобретают технические специальности. Наш регион - не исключение. На такие значимые объекты, как космодром «Восточный», газоперерабатывающий комплекс, ГЭС и другие предприятия, необходимы хорошо подготовленные инженерные кадры. Для поступления в высшее учебное заведение и получения нужной специальности выпускникам необходимо успешно сдать ЕГЭ по физике. На уроках физики, начиная с 7 класса, для подготовки обучающихся к государственной итоговой аттестации можно использовать качественные задачи, предлагаемые в сборниках типовых экзаменационных вариантов ОГЭ, при изучении различных тем.

Изучение предмета «Физика» в 7 классе начинается с главы «Первоначальные сведения о строении вещества». При рассмотрении данной темы с обучающимися предлагается задача «Два сухих листа бумаги не слипаются при соприкосновении. Будут ли слипаться листы бумаги, если один из листов смочить водой, а другой – растительным маслом? Ответ поясните» [1]. В ходе эвристической беседы анализируется условие задачи и физические явления, описанные в задаче, обсуждается правильное оформление ответа в соответствии с критериями проверки и оценивания предметными комиссиями развернутых ответов на задания КИМ.

При рассмотрении главы «Взаимодействие тел» рассматривается задача «Массивный груз подвешен на тонкой нити 1. Снизу к грузу прикреплена такая же нить 2. Какая нить скорее оборвётся, если резко дернуть за нить 2? Ответ поясните» [1]. Найти правильное решение задачи помогают наводящие вопросы, которые задает учитель ученикам.

Много качественных задач можно рассмотреть при изучении главы «Давление твёрдых тел, жидкостей и газов». Например,

Удастся ли измерить давление воздуха внутри совершающего полёт космического корабля с помощью ртутного барометра? Ответ поясните [1].

В какое время года (летом или поздней осенью) ветер одинаковой силы с большей вероятностью повалит лиственное дерева? Ответ поясните [1].

Два одинаковых стальных шара уравновешены на рычажных весах. Нарушится ли (и если нарушится, то как) равновесие весов, если один шар опустить в машинное масло, а другой – в бензин? Ответ поясните [1].

Под герметично закрытым стеклянным колпаком находится завязанный надутый резиновый шарик. Изменится ли (и если изменится, то как) объём шарика, если откачать частично воздух из-под колпака? [1]

На двух чашах рычажных весов находятся в равновесии два одинаковых сосуда, доверху напол-

ненных водой. В один сосуд опускают деревянный брусок. Изменится ли при этом (и если изменится, то как) равновесие весов? [1]

Использование вопросно-ответного метода (ученики сами задают вопрос и сами отвечают на него) способствует развитию навыка решения качественных задач. Ученик начинает выполнять роль активного участника в данном процессе.

В главе «Работа, мощность. Энергия» можно рассмотреть следующую задачу «Три сплошных шара одинаковых размеров – свинцовый, медный и деревянный – подняты на одну и ту же высоту над горизонтальной поверхностью стола. Какой из шаров обладает наибольшей потенциальной энергией относительно поверхности стола? Ответ поясните [1].

В сборниках типовых экзаменационных вариантов ОГЭ содержится много задач, относящихся к главе «Тепловые явления», изучаемой в 8 классе. Например,

Ольга покупает зимние сапоги. Сапоги 37 размера немного тесноваты, а сапоги 38 размера кажутся ей немного просторными. В какой обуви – просторной или тесной – будут больше мёрзнуть ноги зимой? Ответ поясните [1].

Стакан с водой комнатной температуры помещён под колокол воздушного вакуумного насоса. Можно ли заставить воду закипеть, не нагревая её? Ответ поясните [1].

В какую погоду – тихую или ветреную – человек переносит мороз легче? Ответ поясните [1].

При каком климате (влажном или сухом) человек легче переносит жару? Ответ поясните [1].

При изучении главы «Электрические явления» на уроках можно предложить задачи:

На текстильных фабриках нередко нити прилипают к гребням чесальных машин, путаются и рвутся. Влияет ли (и если влияет, то как) на этот процесс влажность воздуха? Ответ поясните [1].

Положительно заряженную стеклянную палочку поднесли, не касаясь, к шару незаряженного электроскопа. Какой заряд приобрели лепестки электроскопа? Ответ поясните [1].

Подобные задачи гораздо эффективнее решать, используя демонстрации на уроке.

При рассмотрении главы «Оптические явления» подбираются задачи межпредметного характера, например, «Человек, рассматривая предмет, приближает его к глазам. Изменяется ли при этом (и если изменяется, то как) кривизна хрусталика? Ответ поясните.» [1].

В 9 классе при изучении главы «Законы взаимодействия и движения тел» рассматриваются следующие задачи.

Будут ли отличаться (и если будут, то как) показания пружинных весов при взвешивании одного и того же тела в разных точках Земли – на экваторе и на полюсе? Ответ поясните [1].

С лодки, движущейся равномерно и прямолинейно по реке, бросают камень противоположно направлению движения лодки. Изменится ли (и если изменится, то как) скорость лодки? [1]

В главе «Механические колебания и волны. Звук» разбираются следующие задачи.

Саша поместил свой мобильный телефон под колокол воздушного насоса и откачал весь воздух. Горизонтальная площадка, на которой лежит телефон, покрыта толстым слоем воздуха. Услышит ли в этом случае Саша звонок от друга? Ответ обоснуйте [1].

По одному концу достаточно длинной металлической трубы один раз ударили молотком. Человек, стоящий у противоположного конца трубы, сказал, что услышал двойной удар. Возможно ли такое? Ответ поясните [1].

В 10 классе при изучении главы «Молекулярная физика. Термодинамика» решаем графические качественные задачи, используя основные законы.

В главе «Электродинамика» есть достаточно много качественных задач. Пример: Плоский воздушный конденсатор подключили к источнику постоянного напряжения, а затем отключили от источника. После этого уменьшили расстояние между его пластинами в 1,5 раза. Во сколько раз при этом

изменилась энергия электрического поля, накопленная конденсатором? Ответ поясните, указав, какие физические закономерности Вы использовали для объяснения [2].

В 10-11 классах с обучающимися разбираются качественные задачи из сборников типовых экзаменационных вариантов ЕГЭ. Данные задачи требуют более серьезной подготовки, так как предусматривают не только понимание и анализ процесса, но и при формулировке ответа на вопрос использование законов из разных разделов физики. Например,

Маленький незаряженный шарик, подвешенный на непроводящей нити, помещён над горизонтальной диэлектрической пластиной, равномерно заряженной положительным зарядом. Размеры пластины во много раз превышают длину нити. Опираясь на законы механики и электродинамики, объясните, как изменится период малых свободных колебаний, если ему сообщить отрицательный заряд [2].

На полу неподвижного лифта стоит теплоизолированный сосуд, открытый сверху. В сосуде под тяжёлым подвижным поршнем находится одноатомный идеальный газ. Поршень находится в равновесии. Лифт начинает равноускоренно опускаться вниз. Опираясь на законы механики и молекулярной физики, объясните, куда сдвинется поршень относительно сосуда после начала движения лифта и как при этом изменится температура газа в сосуде. Трением между поршнем и стенками сосуда, а также утечкой газа из сосуда пренебречь [3].

В цилиндрическом сосуде под поршнем длительное время находятся вода и её пар. Поршень начинают выдвигать из сосуда. При этом температура воды и пара остаётся неизменной. Как будет меняться масса жидкости в сосуде? Ответ поясните, указав, какие физические закономерности вы использовали для объяснения [3].

Качественных задач, предлагаемых в сборниках типовых экзаменационных вариантов ОГЭ и ЕГЭ, сайте <https://fipi.ru/> (раздел ОГЭ, ЕГЭ – Открытый банк заданий) по различным разделам физики, достаточно много. Использовать качественные задачи на уроках можно при объяснении, закреплении, оценивании знаний обучающихся. Такая работа помогает детям понять суть происходящих процессов с точки зрения физики и, как следствие, лучше справиться с выполнением заданий государственной итоговой аттестации.

1. ОГЭ. Физика: типовые экзаменационные варианты: 30 вариантов / под ред. Е.Е. Камзеевой. – Москва: Издательство «Национальное образование», 2025. – 288 с.

2. Демидова, М.Ю. Физика. 1000 задач / М.Ю. Демидова, В.А. Грибов, А.И. Гиголо. - Москва: «Экзамен», 2020. - 430 с.

3. ЕГЭ. Физика: типовые экзаменационные варианты: 30 вариантов / под ред. М.Ю. Демидовой. – Москва: Издательство «Национальное образование», 2025. – 336 с.

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ СТУДЕНТОВ-МЕДИКОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОГО ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА

А.С. Стукалова

Дальневосточный государственный медицинский университет (г. Хабаровск)

stukalovaanna@mail.ru

Современный мир предъявляет жесткие требования к профессиональным качествам молодых специалистов. Вхождение в профессию и осознание своей профессиональной идентичности должно происходить на самых ранних этапах становления будущих выпускников. Политехническая направленность физики предоставляет возможность студентам-медикам через изучение и решение задач биофизической направленности анализировать свои профессиональные предпочтения и формировать профидентичность. Осознанное понимание физических явлений и закономерностей, выполнение экспериментальных задач, близких к медицинской сфере, способствуют вовлеченности обучающихся в образовательный процесс и развивают их мотивационный потенциал.

Профессиональные знания и умения медицинского специалиста, его глубокое профессиональное самосознание и высокая компетентность всегда имели актуальный характер. Выстраивание образовательной траектории будущего врача должно происходить с учётом методически обоснованной и целенаправленной работы по формированию его профидентичности во время всего процесса обучения.

В современной действительности наблюдается смещение ценностей социальных систем и культуры в утилитарно-прагматическую сторону. Гуманистическая суть медицины, общечеловеческая миссия врачебной практики сталкивается с реалиями общества потребления, где доминируют прагматическое установление и создан культ материального благосостояния. Нарушение ценностно-нормативного консенсуса мешает полноценному вхождению студента в медицинскую профессию и профессиональное сообщество. Комплекс выверенных личностных качеств (ответственность, человечность, честность) и профессиональных обеспечивают направленность и успешное функционирование специалиста в медицинской области.

Система подготовки к врачебной деятельности предполагает на начальном этапе обучения изучение ряда дисциплин естественнонаучного профиля – физики, биологии, химии. Благодаря своей традиционной фундаментальности и универсальности, они успешно формируют учебно-познавательные и общекультурные компетенции у обучающихся: знания о законах существования и взаимодействия живой и неживой природы, методах ее изучения и использования человеком в своей деятельности. В деятельности вуза медицинского профиля, кроме образовательных мотивов обучения, большое значение имеют и профессиональные, т.е. такие мотивы, которые поддерживают студента в реализации его потенциала как врача, дают возможность развиваться в медицинской деятельности и быть уверенным в своих силах и возможностях. Устойчивая профессиональная мотивация студентов как внутренний фактор профессионального роста может быть приобретена и во время выполнения лабораторного практикума по физике при определенном комплексе педагогических условий и приемов.

Медицинская профессия неразрывно связана с колоссальной долей ответственности специалиста за жизнь и здоровье человека. Занимаясь вопросами профилактики, диагностики и терапии населения, врач продолжает непрерывно повышать свою квалификацию, не останавливаясь на том уровне знаний и умений, что были ему заложены еще на студенческой скамье. Медицина – одна из немногих

областей, где требуется непрерывное профессиональное образование и подготовка в течение всей своей жизни.

Для сохранения и приумножения своих компетенций будущему специалисту необходимо удерживать высокий уровень профессиональной мотивации в процессе своей деятельности. Мотивация к профессиональной деятельности является интегральным фактором, который побуждает к труду, влияет на его результативность и уровень удовлетворения от выполненной работы. Интерес к изучению данного вопроса применительно к студентам медицинского вуза отмечен во многих научных работах [1, 2]. Акцентируется значимость внутренних мотивов, вырабатываемых самими студентами, преподаватели только способствуют актуализации данного явления.

Профессиональная мотивация представляет собой действие определенных стимулов, под влиянием которых складывается впечатление о будущей специальности и сохраняется возможность саморегуляции в профессиональной сфере. Мотивация трудовой деятельности имеет сложную иерархическую структуру: от метасистемного (взаимодействие личности с социумом) к элементному (стимулы и потребности конкретного человека). Психологически обогащенные потребности и стимулы задают образ цели и результата деятельности, сами же запускаются внутренним побудителем. Иначе говоря, трудовая мотивация начинается с актуализации потребностей личности, которые могут быть удовлетворены в профессиональной сфере.

Профессиональная идентичность человека находится на стыке его личностного и социального самоопределения [3]. Формирование профидентичности способствует становлению личности в целом и позволяет выработать, скорректировать поведение в данной социальной группе, интегрироваться в определенное профессиональное сообщество.

Осознанное единение с профессиональной группой для осуществления каких-либо творческих, исследовательских или рутинных обязательств происходит не сразу. Человек должен последовательно пройти такие стадии как понимание степени своего профессионального соответствия, накопление знания об оценке своих профессиональных качеств в профессиональной группе, понимание способов самосовершенствования, оптимизации труда в перспективе. Нахождение личностных смыслов в профессиональной идентичности задает условия формирования профессиональному самоопределению в целом.

Источниками формирования профессиональной идентичности могут выступать личностные ценности и убеждения, профессиональные амбиции, образование и трудовой опыт. Время студенчества является самым сензитивным периодом для осознания профессиональных целей, усвоения специализированных знаний и приобретение начального опыта. На этом этапе происходит объединение в единое целое своих ролей и аспектов, строится фундамент личностного и профессионального самоопределения. Человек, входя в профессию, ищет такую область деятельности, в которой будет удерживается его чувство собственной целостности, выполняется конгруэнтность профессии и «Я-концепции».

Процесс становления профессиональной идентичности развивается в ходе получения профессионального образования. Процедура предполагает присвоение индивидуумом общих групповых характеристик, усвоение особых норм и стереотипов поведения выбранной профессиональной когорты, использование их в качестве собственных регуляторов в самоопределении. После отбора новых для себя компонентов в структуру идентичности происходит их ассимиляция, ведущая к переосмыслению личного и профессионального опыта. Процесс «профессионального взросления» проходит стадии сперва неуверенности и сомнений, напряжения предвкушения от будущей деятельности, потом стадию приобретения навыков и укрепления в профессии, и, наконец, этап созидания и консолидации с сообществом [4].

Образ идеального профессионала начинает складываться в стенах вуза или ранее, в школе, например, через систему профориентационной деятельности. Будучи в самом начале своего профессионального пути, школьники или студенты задаются вопросом о значимости тех или иных учебных дисциплин в своей образовательной программе. Начальные представления о будущей специализации зачастую расходятся с практическим направлением обучения: зачем изучать физику, если я буду лечить людей, что мне даст лабораторный практикум, если я хочу быть врачом-педиатром...

Чтобы помочь студентам в развитии их внутренней мотивации, повысить заинтересованность в обучении непрофильным предметам и сформировать у них потребность в обязательном получении всего необходимого объема знаний представляется важным с первых дней поступления в университет проводить работу по формированию и укреплению профессиональной самоидентификации.

Обладание первоначальной профессиональной идентичностью может меняться в негативную сторону при столкновении с реальной учебной деятельностью. Степень адаптации обучающихся к условиям вуза является значимым фактором, влияющим на успешность обучения у студентов, особенно младших курсов. Успешное вхождение в незнакомую среду, преодоление организационных и учебных трудностей, психологическое принятие своих новых обязанностей и нового статуса подкрепляет у студента решимость овладения выбранной специальностью. Для формирования всей системы профессиональной идентичности студента-медика необходимо наполнять содержанием такие компоненты, как его знания и умения в профессиональной деятельности, навыки профессионального общения, принятие профессиональной морали и нравственности.

Актуализация процесса профессиональной идентичности студента возможна путем организации и дальнейшем обогащении педагогических технологий, применяемых в лабораторном физическом практикуме.

В процессе выполнения лабораторных работ обучающиеся большую часть времени действуют самостоятельно, учатся планированию, организации, самоконтролю и оценке своих действий и деятельности в целом. Это позволяет сформировать не только учебно-познавательные, но и коммуникативные и организационные компетенции, овладевать техникой совместной деятельности, формулировать мысли во внутренней и внешней речи, уметь публично защищать свою точку зрения и находить компромиссы.

Усвоение теоретического материала по дисциплине предполагает развитие умения работать с учебной литературой и протоколировать полученные результаты и наблюдения, что является базовым навыком для самоанализа и самоконтроля в будущей деятельности. Создание межпредметных связей с химией (ионные потоки в клетке), физиологией (электрические потенциалы в мембранах), анатомией (рычаги в статике) активизируют мыслительную деятельность студентов и помогают развитию самостоятельного логического мышления, необходимого для становления его профессиональной идентичности.

Тесная связь преподавания физики с профессиональным обучением вызывает не только интерес к изучению данной дисциплины, но и способствует совершенствованию профессиональных навыков. К решению такой типично медицинской задачи относится лабораторная работа «Методы измерения артериального давления», где на основе конкретной врачебной процедуры решаются профессиональные вопросы: практическое осуществление манипуляции, оценка достоверности полученных экспериментальных результатов, навык общения с условным пациентом.

Преподавание физики с учетом профессиональной направленности в медицине положительно влияет на эффективность учебного процесса для студентов-первокурсников в части их мотивации и обеспечивает органическое единство учебного и воспитательного процесса в целом. Личностно ориентированные технологии способствуют формированию профессиональной идентичности будущего

врача за счет актуализации субъектного компонента отношения к обучающимся в образовательном пространстве вуза.

1. Пузырева Л. В. Изучение профессиональной мотивации у студентов медицинского университета / Л. В. Пузырева, Л. В. Лонская // Крымский терапевтический журнал, 2018, №4, с. 51-56.
2. Фомина А. В. Медико-социальные аспекты формирования профессиональной мотивации студентов в процессе обучения в медицинском вузе (обзор литературы) / А. В. Фомина, А. А. Есимханова // Вестник новых медицинских технологий, 2021, №4, с. 59-67.
3. Красникова Ю. В. Профессиональная идентичность как основной элемент профессионального воспитания // Актуальные вопросы современной педагогики: материалы IV Междунар. науч. конф. г. Уфа, 2013, с. 167-169.
4. Руднева Е. Н. Профессиональная идентичность - основа становления профессионала // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Психолого-педагогич. науки. 2007. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/profesionalnaya-identichnost-osnova-stanovleniya-professionala> (дата обращения: 26.06.2025).

УДК 52:372.8

КОНЦЕПЦИЯ И АРХИТЕКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СОЛНЕЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛА ВОЛЬФА В УСЛОВИЯХ СПО

Д.А. Усов

Благовещенский государственный педагогический университет (г. Благовещенск)
usdim757@gmail.com

Представлена концептуальная модель распределённой автоматизированной системы для непрерывного мониторинга солнечной активности и объективного определения числа Вольфа ($W = k(10g + s)$), свободная от субъективного фактора ручного подсчёта. Система спроектирована по принципам иерархической декомпозиции, включает аппаратный уровень (управление телескопом и камерой), алгоритмический уровень (расчёт эфемерид Солнца, обработка изображений, кластеризация пятен) и программный уровень (микросервисная архитектура на Elixir, централизованный сервер для хранения и машинного обучения). Ключевая особенность предлагаемого решения для СПО заключается в его доступности и адаптивности: система обеспечивает высокую точность, значительно превосходящую точность ручных наблюдений и сопоставимую с более дорогими коммерческими аналогами. Открытая архитектура системы позволяет обучающимся и преподавателям СПО не только использовать её как инструмент для исследований, но и глубоко изучать принципы её работы, модифицировать отдельные модули и расширять функциональность, тем самым формируя практические навыки в области автоматизации астрономических наблюдений, программирования распределённых систем, обработки изображений и анализа данных. Это создаёт уникальные возможности для практического обучения и научно-исследовательской деятельности в рамках образовательных программ СПО.

Современное состояние солнечно-земной физики характеризуется возрастающей потребностью в непрерывном мониторинге солнечной активности, что обуславливает актуальность разработки автоматизированных систем наблюдений [1]. Число Вольфа, определяемое по формуле:

$$W = k(10g + s), \tag{1}$$

где g – количество групп солнечных пятен; s – общее количество пятен; k – индивидуальный коэффициент наблюдателя [2, 3], остается основным индексом солнечной активности.

Традиционные методы визуального подсчета характеризуются субъективностью интерпретации и требуют постоянного участия квалифицированных наблюдателей, что создает предпосылки для автоматизации процесса определения данного параметра.

Предлагаемая концептуальная модель базируется на принципах иерархической декомпозиции, представляя систему в виде трех взаимосвязанных уровней абстракции. Принцип модульности архитектуры предполагает проектирование каждого функционального блока как независимого модуля с четко определенными интерфейсами взаимодействия, обеспечивая возможность поэтапной реализации и тестирования компонентов. Принцип отказоустойчивости означает проектирование системы с учетом возможности локальных сбоев и предусматривает механизмы автоматического восстановления и деградации функциональности.

Уровень аппаратного взаимодействия обеспечивает прямое управление физическими устройствами и первичную обработку сигналов. Взаимодействие с телескопической монтировкой осуществляется по протоколу Skywatcher через USB Type-B интерфейс с эмуляцией COM-порта [4, 5]. Протокол характеризуется использованием ASCII команд с префиксом ":" и завершением символом возврата каретки (0x0D), двунаправленной связью с подтверждением получения команд через префиксы "=" (успех) или "!" (ошибка), а также поддержкой 24-битной адресации позиций с передачей данных в формате младший байт первым. Структура команды следует формату ":"[CommandByte][Channel][Data][0x0D], где *CommandByte* представляет одиночный ASCII символ, *Channel* означает '1' для RA/Az оси, '2' для Dec/Alt оси, '3' для обеих осей, *Data* содержит 1-6 HEX символов для 24-битных значений с младшим байтом первым [6].

Камера ASI 6200 Pro интегрируется в систему через специализированные библиотеки производителя с динамической настройкой экспозиции в зависимости от условий наблюдений, синхронизацией процесса съемки с циклом управления монтировкой и буферизацией кадров для обеспечения непрерывности наблюдений. Структура данных изображений представляется в формате, содержащем заголовков с временной меткой *Unix_timestamp*, временем экспозиции в миллисекундах, усилением в децибелах, температурой в градусах Цельсия и координатами в градусах прямого восхождения и склонения, метаданные с параметрами изображения и сжатый двоичный массив данных.

Алгоритмы обработки ошибок коммуникации включают парсинг ответов с проверкой префиксов, где при ответе, начинающемся с "=", выполняется *parseNormalResponse*, при "!" – *handleErrorResponse*, иначе *triggerCommunicationError*. Обработка 24-битных данных позиций осуществляется через конверсию HEX строки в позицию с младшим байтом первым по формуле:

$$\text{position} = \text{parseInt}(\text{data.substring}(4,6) + \text{data.substring}(2,4) + \text{data.substring}(0,2), 16). (2)$$

Тайм-ауты команд с экспоненциальным *backoff* используют базовый тайм-аут 1000 мс для команд движения, короткий тайм-аут 500мс для запросов состояния, максимальное количество попыток 3 и множитель *backoff* 2.0.

Расчет эфемерид Солнца базируется на теории VSOP87 с учетом основных возмущений. Средняя аномалия Солнца вычисляется как:

$$M = M_0 + n(t - t_0), \quad (3)$$

где $M_0 = 357,5291^\circ$; $n = 0,98560028^\circ/\text{день}$.

Уравнение центра с учетом эллиптичности орбиты определяется формулой:

$$C = (1,9148 - 0,004817T - 0,000014T^2)\sin(M) + (0,019993 - 0,000101T)\sin(2M) + 0,000289\sin(3M). \quad (4)$$

Истинная долгота с учетом прецессии рассчитывается как:

$$L = L_0 + M + C + \Delta L, \quad (5)$$

где ΔL представляет поправку на нутацию и аберрацию. Преобразование координат из эклиптических в экваториальные выполняется по формулам:

$$\alpha = \arctan2(\cos(\varepsilon)\sin(\lambda), \cos(\lambda)), \quad (6)$$

$$\delta = \arcsin(\sin(\varepsilon)\sin(\lambda)), \quad (7)$$

где $\varepsilon = 23,43929^\circ$ представляет наклон эклиптики.

Задача автоматического слежения за Солнцем формулируется как система дифференциальных уравнений, описывающих движение небесного объекта в горизонтальной системе координат:

$$dA/dt = f_1(t, \varphi, \lambda, \delta), \quad (8)$$

$$dh/dt = f_2(t, \varphi, \lambda, \delta), \quad (9)$$

где A – азимут; h – высота; φ – географическая широта; λ – долгота; δ – склонение Солнца. Численное решение дифференциальных уравнений движения использует метод Рунге-Кутты 4-го порядка с уравнениями:

$$dA/dt = \omega \cos(\delta)/(\cos(h)), \quad (10)$$

$$dh/dt = \omega \sin(q), \quad (11)$$

где $\omega = 15,04107^\circ/\text{час}$ представляет угловую скорость вращения Земли, а q обозначает параллактический угол.

Автоматическое определение числа Вольфа требует решения комплекса задач компьютерного зрения. Сегментация солнечного диска осуществляется с применением алгоритма Хафа для определения границ диска, коррекцией геометрических искажений оптической системы и нормализацией яркости по лимбу. Для изображения с интенсивностью $I(x,y)$ в точке (x,y) бинарное изображение пятен $S(x,y)$ определяется как $S(x,y) = 1$ при $I(x,y) < T(x,y)$ и $S(x,y) = 0$ в противном случае, где $T(x,y)$ – адаптивный порог, зависящий от локальных характеристик изображения.

Коррекция оптических искажений применяет полиномиальную модель:

$$r_{\text{corr}} = r(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6), \quad (12)$$

где коэффициенты k_1, k_2, k_3 определяются калибровкой системы. Адаптивная пороговая сегментация использует алгоритм Ниблэка:

$$T(x,y) = \mu(x,y) + k \times \sigma(x,y), \quad (13)$$

где $\mu(x,y)$ представляет локальное среднее; $\sigma(x,y)$ обозначает локальное стандартное отклонение, а $k = -0,2$. Морфологическая обработка включает последовательность операций эрозии с структурным элементом 3×3 для устранения шума, дилатации для восстановления размеров объектов, операции "открытие" для разделения слипшихся пятен и заполнения отверстий методом реконструкции.

Кластеризация пятен в группы использует модифицированный алгоритм DBSCAN с минимальным расстоянием между центрами пятен $\varepsilon = 15$ пикселей, минимальным количеством пятен в группе $\text{MinPts} = 2$ и критерием связности через Евклидово расстояние с учетом размеров пятен. Статистические модели оценки точности базируются на анализе остаточных отклонений через среднеквадратичное отклонение позиционирования

$$\sigma_{\text{pos}} = \sqrt{(\sigma^2_{\alpha} + \sigma^2_{\delta})}, \quad (14)$$

систематическую ошибку слежения

$$\varepsilon_{\text{sys}} = \Sigma(r_i - r_{\text{calc}})/n, \quad (15)$$

и доверительный интервал измерений

$$CI = \mu \pm t_{\alpha/2} \times \sigma/\sqrt{n}. \quad (16)$$

Уровень координации и управления реализует логику управления наблюдательным процессом и локальную обработку данных. Серверная часть системы проектируется на базе языка Elixir, обеспечивая реализацию модели акторов для изоляции процессов управления различными подсистемами,

встроенные механизмы обработки ошибок и автоматического восстановления, а также масштабируемость решения под различные конфигурации оборудования. Архитектура предусматривает создание отдельных процессов для управления монтировкой, взаимодействия с камерой, обработки изображений, ведения веб-интерфейса и коммуникации с глобальным сервером.

Микросервисная архитектура организована по принципу доменного разделения. Сервис управления оборудованием обеспечивает изолированное управление монтировкой и камерой, API для получения телеметрии и отправки команд, встроенные механизмы безопасности и диагностики. Сервис обработки изображений реализует конвейерную обработку с возможностью горизонтального масштабирования, кэширование промежуточных результатов и адаптивную балансировку нагрузки. Сервис координации выполняет центральную логику планирования наблюдений, управление жизненным циклом сессий и мониторинг состояния всех компонентов.

Механизмы обеспечения отказоустойчивости включают Circuit Breaker Pattern с автоматическим отключением недоступных сервисов, экспоненциальной задержкой при восстановлении и fallback-механизмами для критических операций. Saga Pattern обеспечивает координацию распределенных транзакций, компенсирующие действия при сбоях и сохранение консистентности данных. Supervision Tree в Elixir реализует иерархическое восстановление процессов, изоляцию ошибок в рамках отдельных узлов и стратегии перезапуска `one_for_one` и `one_for_all`.

Уровень агрегации и анализа осуществляет централизованную обработку, долгосрочное хранение и статистический анализ данных. Глобальный сервер собирает данные от множественных локальных станций, обеспечивает их синхронизацию и контроль качества, реализует алгоритмы продвинутой обработки с использованием методов машинного обучения, поддерживает долгосрочное архивирование результатов наблюдений и предоставляет API для интеграции с внешними системами.

Механизмы синхронизации между компонентами системы реализуются через глобальные часы NTP для временной синхронизации всех узлов, семафоры для координации доступа к критическим ресурсам, очереди сообщений с гарантированной доставкой для асинхронного взаимодействия и двухфазный протокол фиксации для атомарных операций над распределенными данными. Протоколы репликации данных реализуют Master-Slave репликацию с асинхронной репликацией некритических данных, автоматическим переключением при сбое мастера и контролем целостности через контрольные суммы.

Система предусматривает два уровня организации данных: локальное хранение для обеспечения автономности работы станции и репликацию критических данных на централизованный сервер для долгосрочного анализа. Предлагается асинхронная модель взаимодействия между уровнями системы с использованием очередей сообщений, что обеспечивает устойчивость к временным сбоям сетевых соединений, возможность балансировки нагрузки при обработке больших объемов данных и масштабируемость системы при подключении дополнительных наблюдательных станций.

Сравнительный анализ с существующими решениями демонстрирует преимущества предлагаемой системы в контексте образовательного применения. В отличие от дорогостоящих коммерческих систем, наше решение характеризуется доступностью и открытой архитектурой, что способствует эффективной интеграции в учебный процесс. В отличие от академических платформ, зависящих от визуальных наблюдений и субъективных факторов, данная система обеспечивает автоматизацию, объективность и воспроизводимость данных.

Выбор технологических решений обоснован спецификой образовательной среды. Использование Elixir предоставляет возможности для изучения отказоустойчивых распределенных систем, модели акторов, что способствует формированию практических навыков у студентов СПО. Протокол USB Type-B с COM-эмуляцией выбран ввиду его стандартизации, гальванической развязки, простоты реализации и экономической эффективности.

Предлагаемые технические решения направлены на создание масштабируемой платформы для научно-образовательной деятельности, обеспечивающей объективность и воспроизводимость измерений солнечной активности. Это формирует научно-образовательную базу для учреждений СПО. Разработанная концептуальная модель и архитектурные принципы создают основу для практической реализации распределенной системы автоматизированного определения числа Вольфа, адаптированной под условия и задачи СПО, способствуя подготовке квалифицированных специалистов.

-
1. Жизневский А. П. Автоматизация астрономических наблюдений // Астрономический журнал. – 2023. – Т. 45, № 3. – С. 234 – 245.
 2. Wolf R. Mittheilungen über die Sonnenflecken // Astronomische Nachrichten. – 1856. – Vol. 43. – P. 234–248.
 3. Clette F., Lefèvre L. The New Sunspot Number: Assembling All Corrections // Solar Physics. – 2016. – Vol. 291. – P. 2629–2651.
 4. Петров В. И., Сидоров К. Л. Системы управления телескопическими монтировками // Приборы и техника эксперимента. – 2022. – № 4. – С. 89 – 96.
 5. Armstrong J., Thomas J. Real-time Solar Monitoring Systems // Solar Physics Today. – 2023. – Vol. 15. – P. 123–134.
 6. SkyWatcher. Application Development Manual. Доступно по ссылке: <https://skywatcher.com/download/manual/application-development/> (дата обращения: 27.07.2025).

УДК 004.42:621.3

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ СТЕНДОВ MEASLAB ЭЭ-ОЭ

Р.В. Цветков, Я.И. Коваленко, П.Ю. Ванина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург)
tsvetkov_rv@spbstu.ru

В работе разработан программно-аппаратный комплекс (ПАК) для обработки экспериментальных данных, получаемых с лабораторного стенда Measlab ЭЭ-ОЭ для курса «Электроника и схемотехника» по направлению 09.03.01 Информатика и вычислительная техника. Данный курс включает лабораторные работы, посвящённые исследованию характеристик полупроводниковых приборов. В работе реализовано приложение для сбора, обработки и сохранения экспериментальных данных с визуализацией и сравнением теоретических и экспериментальных характеристик (в виде графиков, таблиц и расчётных параметров). Определены параметры, рассчитываемые автоматически: ток насыщения, крутизна, динамическое сопротивление и др. Приложение обладает архитектурой MVC на языке Python благодаря поддержке COM-порта, наличию библиотеки PyQt6 для создания GUI, открытой экосистеме и высокой скорости разработки. Данный подход позволил логически разделить пользовательский интерфейс, бизнес-логику и модель данных, что улучшило читаемость и масштабируемость кода. Разработанная программа прошла тестирование в двух направлениях: проверка корректности расчётов и устойчивости интерфейса к ошибочным действиям пользователя. Полученные результаты демонстрируют практическую применимость разработанного программного обеспечения. Данный ПАК имеет большую вариативность направлений для развития: расширение функциональности приложения путем добавления новых лабораторных работ, пользовательская настройка таблиц или единиц измерения, внедрение клиент-серверной архитектуры, и т.д. Такой подход позволит реализовать авторизацию студентов под своими логинами и паролями, организовать централизованное хранение результатов лабораторных работ на сервере, а также предоставить преподавателям инструменты для мониторинга прогресса студентов.

Современные образовательные стандарты в области инженерных дисциплин требуют внедрения автоматизированных систем для проведения лабораторных работ. В данной работе представлена разработка программно-аппаратного комплекса (ПАК) для обработки данных с лабораторного стенда Measlab ЭЭ-ОЭ (рис. 1, А), используемого в курсе «Электроника и схемотехника» по направлению 09.03.01 Информатика и вычислительная техника, профиль 09.03.01_02 Технологии разработки программного обеспечения. Актуальность исследования обусловлена существенными ограничениями штатного программного обеспечения стенда, включающими неудобный интерфейс визуализации данных, ограниченные возможности обработки результатов и недостаточную точность измерений. Основной целью работы стало создание комплексного решения, обеспечивающего автоматизированный сбор, обработку и анализ экспериментальных данных с возможностью их сравнения с теоретическими характеристиками полупроводниковых приборов. В качестве объекта исследования выступил лабораторный стенд Measlab ЭЭ-ОЭ, оснащенный модулями для изучения диодов, транзисторов, стабилитронов и других электронных компонентов.

Методологическая основа исследования включала несколько ключевых этапов. Первоначально был проведен детальный анализ протокола обмена данными Modbus RTU [1] через интерфейс RS-485 [2] с использованием специализированных утилит мониторинга последовательных портов. Для реализации программной части был выбран язык программирования Python с применением библиотек PyQt6 (графический интерфейс) [3], pyserial (работа с COM-портом), matplotlib (визуализация данных) и SciPy (математические расчеты). Разработка производилась в интегрированной среде разработки PyCharm, а для построения графического интерфейса был использован фреймворк PyQt6, обеспечивающий кроссплатформенную работу, гибкую настройку внешнего вида и широкие возможности взаимодействия с внешними устройствами. Архитектура MVC (Model-View-Controller) обеспечила четкое разделение функциональных компонентов системы. Для небольших, но гибких настольных приложений, взаимодействующих с внешним оборудованием, MVC остаётся наиболее сбалансированным решением, так как позволяет гибко обрабатывать как входящие данные, так и действия пользователя, не перегружая архитектуру [4]. Схема работы приложения согласно принципам архитектуры MVC и файловой структуры проекта представлены на рис. 1, (а) и (б), соответственно.

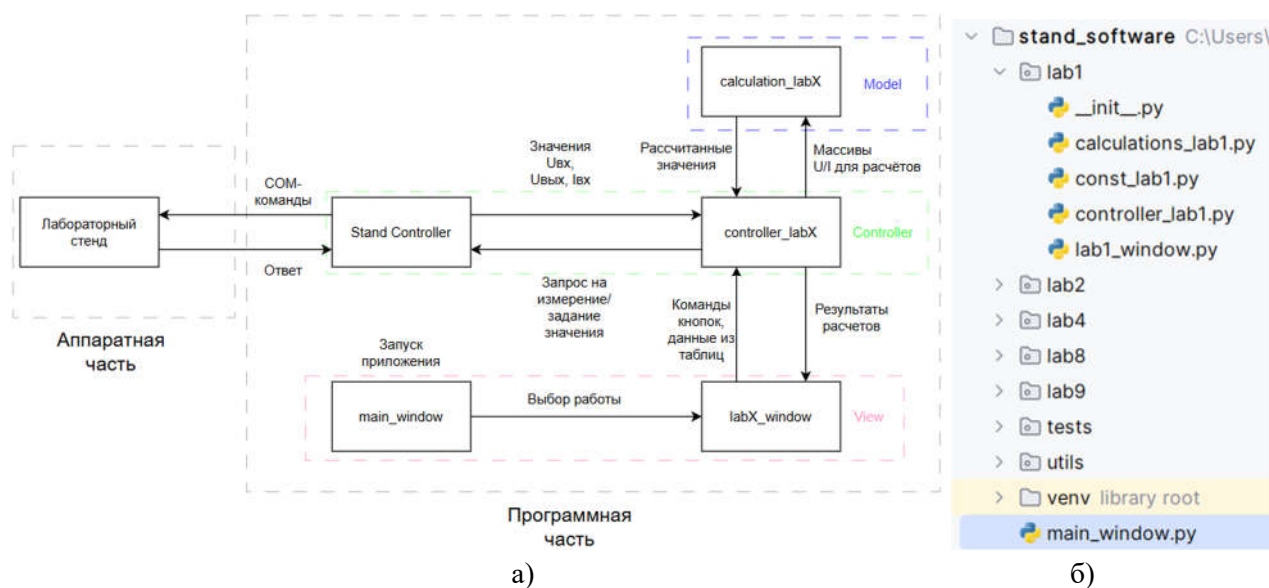


Рис. 1. Структурная схема работы ПАК (а) и архитектура разработанного приложения (б).

Экспериментальная часть работы включала проведение серии лабораторных исследований по снятию вольт-амперных характеристик различных полупроводниковых приборов: кремниевых диодов

и диодов Шоттки, стабилитронов, биполярных и полевых транзисторов, а также параметрических стабилизаторов напряжения. Была собрана электрическая схема, позволяющая снимать значения напряжения и силы тока на отдельных элементах цепи. К изучаемому универсальному измерителю, встроенному в комплекс, был параллельно подключен мультиметр высокой точности Agilent 34401A, имеющий подтвержденную заводом-изготовителем метрологическую точность и используемый в качестве образцового устройства. Полученные результаты измерений представлены на рис. 2, (а) и (б) в виде графиков абсолютных отклонений между показателями измерителя универсального и мультиметром Agilent 34401A. Сравнение показателей напряжения показало, что точность универсального измерителя достаточно высока ($\Delta U_{\max} = 0,03 \text{ В}$) в диапазоне напряжений до 9 В, но несколько снижается ($\Delta U_{\max} = 0,11 \text{ В}$) при более высоких значениях. При измерении силы тока максимальные отклонения $\Delta I_{\max} = 0,142 \text{ мА}$ обнаружены в области низких значений тока (менее 1 мА), однако, при токах выше 1 мА точность измерителя существенно возрастает – $\Delta I_{\max} = 0,59 \text{ мА}$. Исходя из проведенных измерений можно заключить, что разработанный универсальный измеритель обладает достаточно высокой разрешающей способностью и приемлемой точностью для использования в учебных и исследовательских целях.

Разработанный программно-аппаратный комплекс демонстрирует широкий функционал. Система обеспечивает точный сбор данных через COM-порт по напряжению и по току. Встроенные алгоритмы автоматически рассчитывают ключевые параметры электронных компонентов: динамическое сопротивление диодов и стабилитронов, коэффициенты стабилизации и КПД параметрических стабилизаторов, крутизну передаточных характеристик транзисторов. Особое внимание уделено удобству визуализации - реализовано построение графиков ВАХ с функциями масштабирования и наложения теоретических кривых. Все результаты могут быть экспортированы в формат Excel для последующего анализа. Проведенные испытания подтвердили высокую эффективность разработанного решения. Система демонстрирует устойчивую работу при различных сценариях, включая потерю связи с оборудованием и ввод некорректных данных. По сравнению с оригинальным программным обеспечением, новый комплекс предлагает более удобный интерфейс, расширенный функционал обработки данных и повышенную точность измерений.

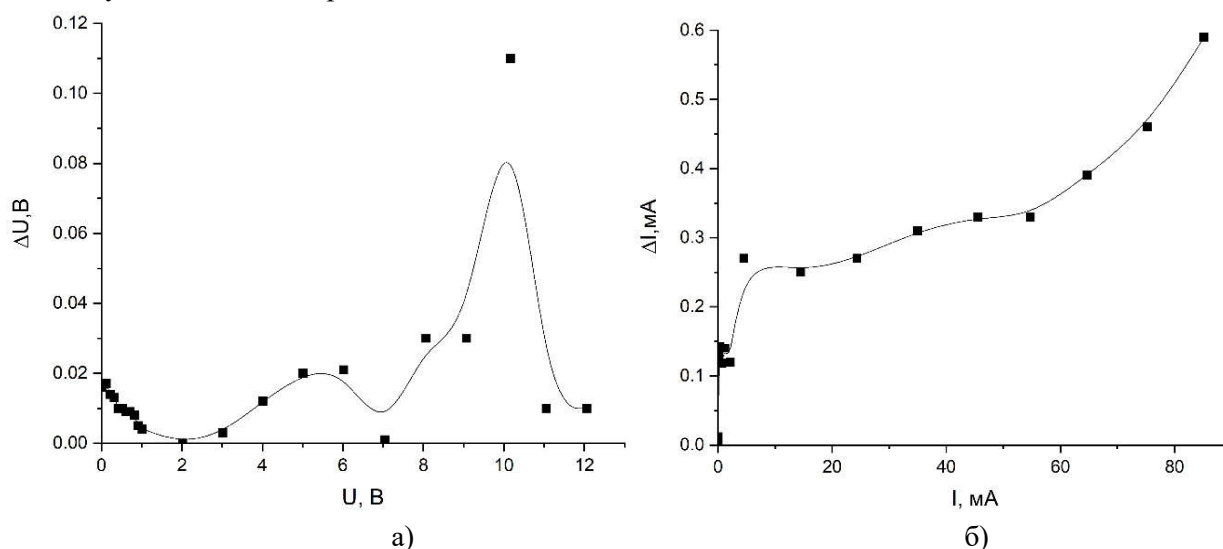


Рис. 2. Сравнение напряжения (а) и тока (б) между показателями измерителя универсального и мультиметром Agilent 34401A.

В заключение следует отметить, что разработанный программно-аппаратный комплекс успешно решает задачи автоматизации лабораторного практикума, обеспечивая эффективный сбор

данных, их наглядное представление и существенное снижение трудозатрат участников учебного процесса. Перспективы развития системы включают расширение перечня поддерживаемых лабораторных работ, внедрение клиент-серверной архитектуры для организации удаленного доступа и возможность интеграции с облачными сервисами аналитики. Практическая значимость работы подтверждается готовностью комплекса к внедрению в учебный процесс и потенциальной возможностью адаптации для работы с другими типами лабораторного оборудования.

-
1. Modbus Application Protocol Specification. Документация протокола Modbus на сайте компании-разработчика modbus.org [Электронный ресурс]. URL: https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf (дата обращения: 21.04.25).
 2. Комплект модулей для лабораторной установки по изучению основ электроники, тех. паспорт, ООО «ТРИМБИРТ», 06.12.2024, 4 с.
 3. Singh, S.C. Zinc oxide nanostructures. synthesis, characterizations and device applications // Journal of Nanoeengineering and Nanomanufacturing. – 2013. – V.3. – P.1-28.
 4. Model-View-Controller (MVC) Pattern in Python. Статья в онлайн-библиотеке softwarepatternslexicon о реализации паттерна MVC в Python [Электронный ресурс]. URL: <https://softwarepatternslexicon.com/patterns-python/4/8/> (дата обращения: 21.04.25).

УДК 372.853

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ГРАФИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ

В.В. Щогла, Л.В. Горбанева

Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

2019102243@togudv.ru, 009608@togudv.ru

Статья посвящена анализу графических задач по термодинамике в школьном курсе физики. Рассматриваются основные виды таких задач, включающие построение графиков в различных системах координат, анализ изменений физических величин и установление соответствий между графиками процессов. Особое внимание уделяется методике решения задач с использованием таблиц, что помогает систематизировать данные и избежать ошибок. Приводятся примеры решения задач на перерисовку графиков, анализ изменения внутренней энергии, работы и теплоты, а также установление связей между графиками в разных системах координат.

В школьном курсе физики существует множество видов задач, решение которых позволяет учащимся глубже понимать предмет и развивать целый ряд метапредметных навыков. К основным видам задач можно отнести расчетные, качественные и графические.

К графическим задачам относят такие задачи, при решении которых каким-либо образом используют графики, таблицы, схемы и т.п. [1]. Работа с задачами данного типа требует не только глубоко знания теории, но и умения визуализировать описанные процессы, видеть и уметь представлять заданные зависимости между описанными величинами, извлекать информацию физического содержания из графических источников, анализировать нужные данные.

Несмотря на то, что задачи данного вида включаются в курс физики начиная с 7 класса (задачи на механическое движение), они часто вызывают определенный ряд сложностей у учеников, основной

причиной которых является, пожалуй, то, что для их решения требует достаточно высокого уровня математической подготовки и упомянутых ранее умений работы с графиками.

По уровню сложности графические задачи можно разделить на несколько типов, для каждого из которых существует своя методика решения [5]. В данной работе обратим внимание на решение разных типов графических задач по термодинамике.

К одному из типов данных задач можно отнести такие, в которых необходимо представить предлагаемый график изопроцессов в других системах координат. Эти задачи вызывают больше всего вопросов у школьников: не очень понятно, в чем суть перерисовывания графиков, но на самом деле, из графического изображения процессов в каждой системе можно вынести информацию, применяемую в решении разного рода задач, например, из графика в p - V координатах можно посчитать работу газа, а из графика в p - T можно судить о том, что происходит с объемом газа, что позволяет решать прикладные задания. Рассмотрим решение подобной задачи.

Задача 1. На рис. 1 изображен график замкнутого процесса. Постройте график этого процесса в других координатах [2].

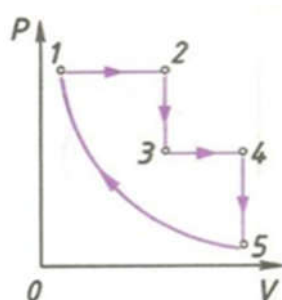


Рис. 1. График к задаче 1

Изменение состояния газа представляет собой замкнутый цикл, состоящий из пяти участков, каждый из которых является изопроцессом. Распишем подробно ситуацию для каждого участка в виде табл. 1.

Таблица 1)

Для решения задачи 1

		p	V	T
1	$\frac{V}{T} = \text{const}$	const	$\uparrow$	$\uparrow$
2	$\frac{p}{T} = \text{const}$	$\downarrow$	const	$\downarrow$
3	$\frac{V}{T} = \text{const}$	const	$\uparrow$	$\uparrow$
4	$\frac{p}{T} = \text{const}$	$\downarrow$	const	$\downarrow$
5	$pV = \text{const}$	$\uparrow$	$\downarrow$	const

Теперь для получения окончательного ответа изобразим каждый этап в pT и VT -координатах (рис. 2):

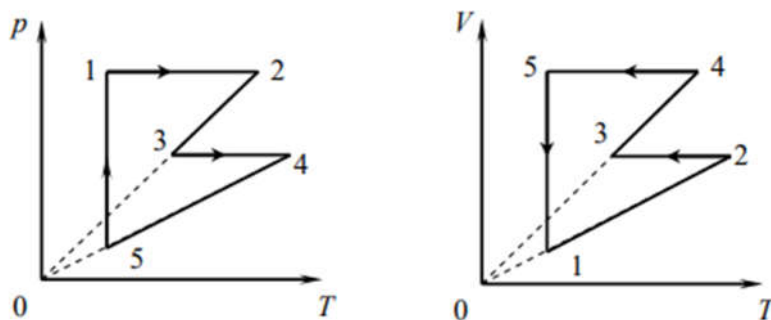


Рис. 2. Решение задачи 1.

К следующему типу можно отнести задачи на анализ предложенного графика: здесь требуется не только построить и/или перерисовать график, но и проанализировать его, понять, как ведут себя термодинамические величины в ходе процесса. Часто встречаются задачи, где нужно понять, как изменяются работа газа, его внутренняя энергия или количество теплоты. Часто подобные задачи встречаются в ЕГЭ, рассмотрим пример решения одной из них.

Задача 2. На pV -диаграмме (рис. 3) показан процесс изменения состояния постоянной массы газа. В этом процессе внутренняя энергия газа уменьшилась на 30 кДж. Чему равно количество теплоты, отданное газом?

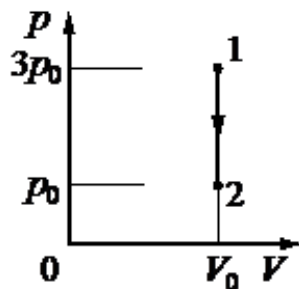


Рис. 3. Рисунок к задаче 2.

Для решения данного типа задачи вспомогательная табл. 2 имеет другой вид.

Анализируя график в первой строке записывают как изменяются параметры – давление, объем, температура (P, V, T). Затем рассматривают как при этом будут изменяться внутренняя энергия и работа газа (второй столбец). Используя значения, данные в условии задачи и результат анализа приходим к решению задачи.

Таблица 2)

Для решения задачи 2

Измерения параметров газа	P, V, T	$p \downarrow, V = const, T \downarrow$	
Изменение внутренней энергии	$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$	$\Delta U < 0$	30 кДж
Работа газа	$A = p \Delta V$	$A = 0$	0
Количество теплоты	$Q = \Delta U + A$	$Q < 0$	30 кДж

Для закрепления умений анализировать график процесса встречаются задачи на установление соответствия между графиками процессов, в которых участвует идеальный газ и физическими величинами. Такие задачи вызывают определенные затруднения у учащихся. Для решения таких задач мы также предлагаем использовать предлагаемую нами таблицу, что помогает систематизировать данные и избежать ошибок в расчетах. Рассмотрим пример решения подобной задачи.

Задача 3. На рис. 4 А и Б приведены графики двух процессов: 1–2 и 3–4, в каждом из которых участвует 1 моль разреженного гелия. Графики построены в координатах p – T и V – T , где p – давление, V – объем и T – абсолютная температура газа.

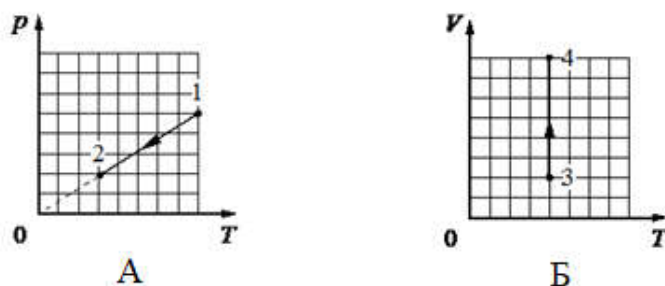


Рис. 4. Графики в задаче 3.

Установите соответствие между графиками и утверждениями, характеризующими изображённые на графиках процессы.

Утверждения:

- 1) над газом совершают положительную работу, при этом газ отдаёт тепло;
- 2) над газом не совершают работы, при этом его внутренняя энергия уменьшается;
- 3) газ получает положительное количество теплоты и не совершает работы;
- 4) газ получает положительное количество теплоты, при этом его внутренняя энергия не изменяется.

Для решения задачи проанализируем графики и заполним табл. 3.

Таблица 3)

Для решения задачи 3

		График А	График Б
Измерения параметров газа	PVT	$p \downarrow V = \text{const } T \downarrow$	$p \uparrow V \downarrow T = \text{const}$
Изменение внутренней энергии	$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$	$\Delta U < 0$	0
Работа газа	$A = p \Delta V$	$A=0$	$A < 0$
Количество теплоты	$Q = \Delta U + A$	$Q < 0$	$Q < 0$

Данные в составленной таблице позволяют сразу определить верные утверждения.

Существуют также задачи, которые объединяют анализ графиков и количественные расчеты.

В таких задачах необходимо вычислить такие термодинамические величины, как работа газа, количество теплоты, используя предложенный условием график. Для решения таких задач также удобно использовать предложенный способ анализа графиков и запись результата анализа в виде таблицы.

Задача 4. Один моль идеального газа участвует в процессе 1-2-3, график которого представлен на рис. 5 в координатах V - p , где V – объем газа, p – его давление. Температура газа в состояниях 1 и 3 $T_1 = T_3 = 300\text{K}$. В процессе 2-3 газ увеличил свой объем в 3 раза. Какое количество теплоты отдал газ в процессе 1-2?

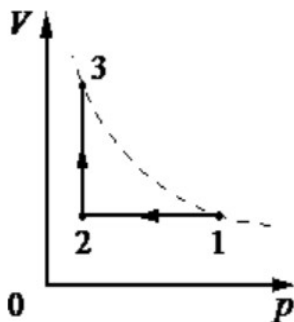


Рис. 5. График в задаче 5.

Для решения задач такого вида также воспользуемся предложенной нами табл.4.

Таблица 4)

Для решения задачи 4

		1-2	2-3
Измерения параметров газа	PVT	$p \downarrow V = \text{const } T \downarrow$	$p = \text{const } V \uparrow^3 T \uparrow^3$ $T_2 = 100\text{K}$
Изменение внутренней энергии	$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$	$\Delta U < 0$	$\Delta U > 0$
Работа газа	$A = p \Delta V$	$A=0$	$A > 0$
Количество теплоты	$Q = \Delta U + A$	$Q_{12} = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$	$Q > 0$

$$\Delta T_{12} = (300 - 100) = 200K$$

$$Q_{12} = \frac{3}{2} \cdot 1 \cdot 8,31 \cdot 200 = 2493 \text{ Дж}$$

Использование данного способа записи анализа графика позволяет визуализировать результат анализа и делает решение задач такого типа более понятными для учащихся. Кроме этого позволяет формировать метапредметные умения чтения графиков и извлечение информации из них.

Графические задачи по физике являются неотъемлемой частью изучения термодинамики, они способствуют не только углубленному пониманию термодинамических законов и процессов, но и занимают значимое место в развитии метапредметных навыков.

1. Бутырский Г.А. Классификация графических задач по физике и проблемы обучения их решению // Вестник ВятГУ. 2010. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-graficheskikh-zadach-po-fizike-i-problemy-obucheniya-ih-resheniyu> (дата обращения: 01.08.2025).

2. Бутырский Г. А. Проблемы обучения школьников решению физических задач // Вестник Вятского государственного гуманитарного университета. – 2007. – № (1)16. – С. 123-128.

3. Купрацевич О. А. Особенности работы с графиками при решении задач по теме «Основы термодинамики» // Фізика: проблеми викладання. – 2009. – № 5. – С. 28-36.

4. Калашников, Н.П. Графические методы решения задач по молекулярно-кинетической теории и термодинамике идеальных газов [Текст] / Н.П. Калашников, В.П. Красин. – СПб.: Лань, 2011. – 192 с.

5. Полицинский Е.В. Задачи и задания по физике. Методы решения задач и организация деятельности по их решению: учебно-методическое пособие / Е.В. Полицинский, Е.П. Теслева, Е.А. Румбешта. – Томск: Изд-во Томского педагогического университета, 2009 – 2010. – 483 с.

УДК 538.9:37.047

УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ УЧАЩИХСЯ ШКОЛ В НАУЧНОЙ ЛАБОРАТОРИИ «ФИЗИКА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК И ПОКРЫТИЙ»

Н.М. Яковлева, К.В. Степанова, Е.А. Чупахина, А.Н. Кокатев

Петрозаводский государственный университет (г. Петрозаводск)

chelen@petrsu.ru

В докладе обобщается опыт работы со школьниками в научно-исследовательской лаборатории физико-технического института Петрозаводского госуниверситета. Представлены принципы организации учебно-исследовательской деятельности учащихся 10-х классов, а также начальной и основной школы. Кратко описаны разработанные в лаборатории образовательные ресурсы для обеспечения этой работы.

Научно-исследовательской лаборатории «Физика наноструктурированных оксидных пленок и покрытий» более 20 лет. Основное направление деятельности лаборатории – исследование физических основ роста и структурообразования оксидных пленок, формируемых электрохимическим анодированием металлов и сплавов (Al, Ti, Ta, Nb, Al-Mg, Al-Si, Ti-Al, Ti-Al-Nb). И если в начале нашего пути главными объектами исследований являлись самоорганизованные нанотрубчатые и нанопористые ок-

сидные пленки на компактных Al и Ti [1] и нанокompозитные покрытия на их основе [2], то к настоящему моменту к ним добавилось анодирование спеченных порошков металлов и сплавов, приводящее к синтезу микро- и наноструктурированных оксидных пленок различной функциональности [3]. Анодные оксидные покрытия на металлах и сплавах входят в группу широко изучаемых материалов, благодаря огромному спектру реализованных и потенциальных применений в биомедицине, фотоэлектролизе воды, преобразовании солнечной энергии, изготовлении анодов литий-ионных аккумуляторов, поверхностей с регулируемой смачиваемостью и др. Соответственно, исследование таких объектов, а также корреляции структуры и функциональных свойств, является актуальным как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения.

Понимая важность профориентационной работы со школьниками [4], в лаборатории уделяется большое внимание организации учебно-исследовательской деятельности учащихся. Нами разработан комплекс образовательных ресурсов, используемых в работе с учащимися 10-х классов, начальной и основной школы. Для младших школьников предлагается мастер-класс, формирующий понятия о макро-, микро- и наномире, о том, что изучать предметы необходимо на разных пространственных масштабах. В учебно-исследовательской деятельности с учащимися 5–7 классов используются программы (продолжительностью от 12 до 18 часов), включающие лекционно-практические занятия с экскурсией по лаборатории и знакомством с имеющимся оборудованием, которое они в дальнейшем будут использовать в процессе выполнения лабораторных работ исследовательского характера. Для обеспечения «школьного» лабораторного практикума были разработаны адаптированные методические указания к работам. После выполнения 2-х лабораторных работ ребята выбирают наиболее для них интересную, оформляют полученные результаты в виде презентации и защищают учебно-исследовательский проект. В программах, предназначенных для основной школы, как правило, на первом этапе проводится знакомство с обновленной версией электронного образовательного ресурса «Начальная школа нанотехнологий» [5]. Для промежуточного контроля полученных знаний предлагается участие в квест-игре «Путешествие в НАНОмир». Сюжет квест-игры прост, она представляет собой путешествие по пяти станциям согласно маршрутному листу. На каждой станции участникам предстоит выполнить задания различного характера и уровня сложности, за которые начисляется определенное количество баллов. Итогом квест-игры является награждение победителей, набравших наибольшее количество баллов.

Учебно-исследовательская деятельность учащихся 10-х классов в лаборатории осуществляется, как правило, в рамках модуля «Получаем и исследуем покрытия на металлах и сплавах» профориентационной программы Петрозаводского госуниверситета и содержит лекционно-практические занятия, лабораторный практикум, подготовку учебно-исследовательского проекта и его защиту. Работа 10-классников проводится также и в виде профильной практики. Придя в лабораторию, ребята узнают, что для того, чтобы получить оксидные пленки на поверхности металлов и сплавов, надо понимать, во-первых, процессы, определяющие их рост, а тут без знаний химии никак не обойтись; во-вторых, стоит разобраться с их структурой с помощью физических и химических методов исследования. А если перейти к применениям оксидных покрытий, например, использующих их замечательные антибактериальные свойства, то без биологии, а точнее, микробиологии, это сделать невозможно. С помощью сотрудников лаборатории практиканты знакомятся с экспериментальными методами исследований, используемыми в лаборатории, специальным программным обеспечением, а также применяют их к изучению уникальных нанопокровов, которые самостоятельно получили. Подобный подход позволяет школьникам определить интересующую их тему научного проекта, продолжить исследования в лаборатории, выполнить проект и представить результаты исследований на конференциях. Несомненно, работа над проектом поможет определиться и с выбором будущей профессии.

1. Яковлева, Н. М. и др. Наноструктурирование поверхности металлов и сплавов. Обзор часть 2. Наноструктурированные анодно-оксидные пленки на Ti и его сплавах // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2016. – Т. 18, №1. – С. 6 – 27.
2. Кокатев, А.Н. и др. Каталитически активные композитные материалы с пористой алюмооксидной матрицей, модифицированной наночастицами γ -MnO₂ // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2016. – Т. 52, № 5. – С. 517 – 524.
3. Яковлева, Н.М. и др. Анодно-оксидные покрытия с иерархической микронаноструктурой на спеченных порошках титана // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2022. – Т. 24(4). – С. 572–583.
4. Прохоров, А.В. Университет как субъект профориентационной работы со школьниками // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. Тамбов. – 2020. – Т. 25, № 187. – С. 15–20.
5. Егорина, Е.С., Яковлева, Н.М. Электронный образовательный ресурс «Начальная школа нанотехнологий»: методическое обеспечение и результаты апробации // В сборнике: Физика в системе современного образования (ФССО-2013). Материалы XII Международной научной конференции. отв. ред. А.И. Назаров. – 2013. – С. 187–189.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция «Теоретическая физика и вычислительная математика»

<i>Агапова Е.Г.</i> Современные подходы к модернизации математических дисциплин для физиков-информатиков: профессиональная ориентация, цифровизация и междисциплинарность.....	3
<i>Воронина А.А., Верхотурова И.В.</i> Моделирование распределения температуры в ткани опухоли при радиочастотной абляции.....	6
<i>Ворона Д.Л., Верхотурова И.В.</i> Моделирование процесса теплопередачи в экранно-вакуумной теплоизоляции.....	10
<i>Ефименко М.К., Мазур А.И., Мазур И.А., Широков А.М., Шин И. Дж.</i> Исследование связанного состояния ядра 6He в подходе SS-HORSE–NCSM.....	13
<i>Заборовский В.С., Уткин Л.В., Филимонов А.В.</i> Физические аспекты процессов «Обучения машин»	17
<i>Колганова Е.А., Коробицин А.А., Клименко О.П., Шалапинин Д.И.</i> Малоатомные кластеры гелия и неона при низких энергиях.....	24
<i>Мазур А.И., Ефименко М.К., Мазур И.А., Широков А.М., Куликов В.А., Шин И.Дж., Вэри Дж.П.</i> Исследование мультинейтронных систем методом SS-HORSE–NCSM.....	26
<i>Мележик В.С.</i> Ускорение и закручивание нейтральных атомов сильными электромагнитными импульсами различной поляризации.....	30
<i>Насыров В.В., Савченко В.В.</i> Измерение коэффициента электроакустического преобразования.....	32
<i>Чуков В.Н.</i> Локализация спектра рассеяния с помощью топологических законов рассеяния волны Рэлея.....	36
<i>Шарыпов Р.Э.</i> Байесовские нейронные сети для регрессии и экстраполяции результатов NO-CORE SHELL MODEL.....	40

Секция «Физика конденсированных сред»

<i>Барышников С.В.</i> Сегнетоэлектрические свойства твердого раствора $\text{Pb}_{0,9}\text{Ba}_{0,1}(\text{Zr}_{0,9}\text{Ti}_{0,1})\text{O}_3$, полученного из нанопорошков.....	43
<i>Бондаренко В.Б., Филимонов А.В., Кораблев В.В.</i> Хаотический потенциал на поверхности Легированных III-нитридов.....	47
<i>Галкин Н.Г., Галкин К.Н., Горошко Д.Л., Субботин Е.Ю., Балаган С.А., Горошко О.А., Чернев И.М., Маслов А.М., Кропачев О.В., Доценко С.А., Герасименко А.В., И.А. Ткаченко</i> Тонкие пленки моносилицидов переходных металлов на кремнии для термоэлектроники и спинтроники.....	50
<i>Голубева И.А., Зотова О.В., Сахненко К.И., Стукова Е.В.</i> Исследование диэлектрических свойств композитов на основе иодида диизоропиламмония с диэлектрическими включениями оксида кремния.....	59
<i>Дьяченко О.И., Белоконь В.И.</i> Флуктуации магнитных моментов наночастиц пермаллоя на регулярной плоской решетке.....	61
<i>Зотова О.В., Голубева И.А., Сахненко А.В., Стукова Е.В.</i> Влияние размеров частиц включений титаната бария на диэлектрические свойства иодида диизоропиламмония в композите.....	64
<i>Клопотов А.А., Потекаев А.И., Абзаев Ю.А., Волокитин О.Г.</i> Экспериментальное и теоретическое исследование структурной неустойчивости в сплавах Cu-Pd при фазовых переходах.....	66
<i>Кульбачинский В.А., Апрелева А.С., Кытин В.Г.</i> Нанокompозиты – перспективные материалы для создания эффективных термоэлектриков.....	71
<i>Мередилина Т.А.</i> Влияние свойств растворителя на спектр флуоресценции фуллерена C_{60}	73

<i>Милинский А.Ю.</i> Диэлектрические свойства композита пористого тефлона, заполненного тиомочевиной	76
<i>Набережнов А.А.</i> Фрактальные структуры в нанокompозитах на основе мезопористых матриц....	79
<i>Павлов А.В., Стукова Е.В.</i> Влияние рода диэлектрических включений на расширение сегнетоэлектрической фазы KNO_3 в композитах на его основе.....	87
<i>Поляков А.В., Рябов И.А., Фомин Д.В., Галкин К.Н., Галкин Н.Г., Шеметов Д.А.</i> Термоэлектрические свойства магний и кремний содержащих полупроводниковых плёнок.....	90
<i>Резник М.В., Нецименко В.В.</i> Моделирование процесса теплового расширения микрочастиц структуры $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$	93
<i>Стародубцева А.К., Мередилина Т.А.</i> Получение спектров флуоресценции углеродных нанотрубок, внедренных в кристаллическую матрицу	96
<i>Стукова Е.В.</i> Диэлектрические свойства иодида диизоропиламмония, внедренного в керамические матрицы титаната бария.....	98
<i>Филимонов А.В., Вахрушев С.Б., Королева Е.Ю.</i> Динамика и кинетика релаксатора магнитообата свинца	100
<i>Чернечкин И.А., Милинский А.Ю., Барышников С.В.</i> Фазовые переходы в нанокompозитах RbNO_3/PG	104
<i>Шеметов Д.А., Поляков А.В., Фомин Д.В., Галкин К.Н., Галкин Н.Г., Шолыгин И.О.</i> Тонкие плёнки кремния и силицида магния, сформированные методом твердофазной эпитаксии.....	108
<i>Юрина В.Ю.</i> Влияние электронов на рентгеновские фотоэлектронные спектры нано- и полых частиц оксида	112

Секция «Материаловедение»

<i>Должиков С.В., Фролов А.М.</i> Применение искусственных нейронных сетей в материаловедении.....	115
<i>Круглов М.С., Пячин С.А., Баишкова М.А.</i> Плазменная обработка оксида висмута емкостным высокочастотным разрядом низкого давления для изменения его свойств.....	119
<i>Морев Н.Г., Нецименко В.В., Ли Чундун</i> Оптические свойства полых микросфер на основе диоксида кремния и диоксида титана, полученных золь-гель методом штёбера.....	122
<i>Пионкин Д.Е., Филиппова В.И., Пупишев Д.С., Шерозия Н.Г., Хайлатыпова Р.Р.</i> Магнитоактивированное ускорение разрушения сплава Al-Fe-Si при ползучести.....	125
<i>Фролов А.М., Плотников В.С., Пустовалов Е. В., Крайнова Г. С., Полянский Д.А., Должиков С.В.</i> От цифрового паспорта материала к цифровой платформе.....	129

Секция «Общая и техническая физика, оптика»

<i>Андреева М.В., Афонин К.Н., Ермолаев А.В., Солдаткин В.С., Туев В.И.</i> Лампово-полупроводниковый модуль излучения	133
<i>Вайнер Б.Г.</i> Изучение физических, физико-химических и биофизических процессов с применением матричного тепловидения высокого разрешения.....	137
<i>Гольх А.Е.</i> Разработка тепловакуумной камеры для испытаний мка: конструкция, материалы и технология производства.....	143
<i>Губин С. В., Насыров В. В., Рябинкин К. С.</i> Сейсморегистратор для измерительного комплекса «Сейсмо-ПРО»	146
<i>Ефременко В.Г., Антонычева Е.А., Уиков А.А., Сюй А.В.</i> Оптические свойства наночастиц максена Ti_3C_2	149

<i>Иванов В.И., Егоришин И.Н.</i> Оптический метод формирования кристаллов в наносuspensions...152	152
<i>Казарбин А.В., Драчёв К.А., Савченко В.В.</i> Влияние модифицирующих факторов на свойства эпоксидных композиционных материалов.....154	154
<i>Кармоков А.М., Лосанов Х.Х., Молоканов О.А., Шомахов З.В.</i> Исследование физических и электрофизических свойств функциональных стекол электроники и структурно-фазовых изменений в них157	157
<i>Пустовалов Е.В., Федорец А.Н., Ткачев В.В., Фролов А.М., Крайнова Г.С., Наливайко И.Н.</i> Аналитика больших данных комплексных изображений.....160	160
<i>Пячин С.А., Рекунова Н.Н., Щербатюк А.И.</i> Моделирование термдеформации пленки под действием лазерного пучка.....162	162
<i>Сюй А.В., Завидовский И.А., Целиков Д.И., Мартынов И.В., Сидоров Н.В., Палатников М.Н.</i> Фотокаталитические свойства аморфных наночастиц ниобата лития, синтезированных методом лазерной фрагментации.....166	166
<i>Яковлев А.А., Писаренко Т.А., Игнатович К.В., Мараров В.В., Цуканов Д.А.</i> Влияние толщины слоя топологического изолятора на фотовольтаические свойства гетероструктуры $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Si}$169	169

Секция «Физическое образование (школьное и вузовское)»

<i>Бобрышева С.А., Горбанева Л.В.</i> Интерактивные методы обучения в астрономии: опыт проведения практикума для 7-8 классов.....174	174
<i>Верхотурова И.В.</i> Применение программных продуктов численного моделирования в лабораторном эксперименте.....177	177
<i>Галушко С.Е.</i> Значимость и способы формирования смыслового чтения на уроках физики.....179	179
<i>Горбанева Л.В., Тюканов А.С., Горбанева Н.В.</i> Научно-популярная лекция как средство интеграции физики и биологии в рамках внеурочной деятельности.....182	182
<i>Закирова Ю.А., Верхотурова И.В.</i> Игровой урок физики с применением «Машины Голберга» .185	185
<i>Кадеева О.Е., В.Н. Сырицына</i> Современные научные понятия на уроках физики как элемент формирования представлений учащихся о современной научной картине мира188	188
<i>Казарбин А.В., Лунина Ю.В., Драчёв К.А., Славгородская С.И.</i> Сетевая форма реализации образовательных программ: цели, задачи, риски.....191	191
<i>Керимова Ю.А.</i> Методики изучения солнечной физики: от теории к практике в образовательных учреждениях.....195	195
<i>Кожин Д.А., Мередилина Т.А.</i> Методика дистанционных астрономических наблюдений: современные подходы к исследованию звёзд и туманностей.....197	197
<i>Копылова И.Б.</i> Результаты внедрения пилотного проекта реформы высшего образования...201	201
<i>Корнеев Т.Н., Коростелева И.А.</i> Внедрение искусственного интеллекта в образовательную среду.....205	205
<i>Коткина Ю.О., Римлянд В.И., Хаас Т.В.</i> О возможности использования искусственного интеллекта на основе нейросетей для преподавания физики в вузах.....208	208
<i>Ледовских И.А.</i> Педагогические условия подготовки будущих учителей физики к решению профессиональных задач.....212	212
<i>Литовко И.В.</i> Познавательный и исследовательский потенциал фотографии на уроке физики...216	216
<i>Логачев П.В., Вайнер Б.Г., Блинов М.Ф.</i> Комплексная программа выявления и многоуровневой поддержки учащихся, мотивированных на глубокое изучение физики.....219	219
<i>Масленникова Е.Н.</i> Решение качественных задач как один из методов подготовки обучающихся к итоговой аттестации на уроках физики.....223	223

<i>Стукалова А. С.</i> Формирование профессиональной идентичности студентов-медиков при выполнении лабораторного физического практикума.....	226
<i>Усов Д.А.</i> Концепция и архитектурные решения распределенной системы автоматизированных солнечных наблюдений для определения числа вольфа в условиях СПО.....	229
<i>Цветков Р.В., Коваленко Я.И., Ванина П.Ю.</i> Программно-аппаратный комплекс для обработки экспериментальных данных лабораторных стендов Measlab ЭЭ-ОЭ.....	233
<i>Щогла В.В., Горбанева Л.В.</i> Методические особенности решения графические задач по термодинамике	236
<i>Яковлева Н.М., Степанова К.В., Чупахина Е.А., Кокатев А.Н.</i> Учебно-исследовательская деятельность учащихся школ в научной лаборатории «Физика наноструктурированных оксидных пленок и покрытий»	240

Научное электронное издание

ФИЗИКА: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБРАЗОВАНИЕ

Материалы XXIII Всероссийской научной конференции
(22 – 28 сентября 2025 г.)

Публикуется в авторском варианте

Компьютерная верстка *И.В. Верхотуровой*