



КАЗАНСКИЙ
ФИЗИКО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

ИМЕНИ
Е. К. ЗАВОЙСКОГО

2024

ЕЖЕГОДНИК

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КАЗАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

КАЗАНСКИЙ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

ИМЕНИ Е. К. ЗАВОЙСКОГО



ЕЖЕГОДНИК

ТОМ 24
2025

ФИЦПРЕСС
ИЗДАТЕЛЬСТВО
ФИЦ КАЗНЦ РАН

УДК 006.16(471.41)(09)+53(06)
ББК 22.3е(2)л+22.3я54(2 Рос.тат)
К14

К14 Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского. Ежегодник.
Том 24. – Казань: ФИЦ КазНЦ РАН, 2025. 226 с.

ISSN 2782-4780

Под общей редакцией К. М. Салихова и С. М. Хантимерова

Редакторы-составители Т. П. Гаврилова, Л. И. Савостина

Редакционная коллегия

Р. И. Баталов, В. К. Воронкова, Г. Г. Гумаров, Р. М. Ерёмина, А. А. Камашев, И. З. Латыпов, Р. Ф. Мамин,
В. Г. Никифоров, Н. И. Нургазизов, А. А. Туранов, Ю. В. Садчиков, В. В. Семашко, А. Л. Степанов,
Н. М. Сулейманов, И. А. Файзрахманов, Я. В. Фаттахов, А. В. Шкаликов

Печатается по решению

Учёного совета Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского – обособленного
структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки
“Федеральный исследовательский центр “Казанский научный центр Российской академии наук”.

Очередной том Ежегодника представляет информационные и статистические материалы, отражающие деятельность
КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН в 2024 году. В секции “Научные сообщения”
представлены результаты научных исследований по актуальным вопросам химической физики, квантовой оптики и
информатики, физики конденсированного состояния, а также другим тематикам, соответствующим направлениям на-
учной деятельности института.

УДК 006.16(471.41)(09)+53(06)
ББК 22.3е(2)л+22.3я54(2 Рос.тат)

© КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, 2025
© Обложка Аксёнов И.А., 2025

Ответственный редактор О. Б. Яндуганова
Редакторы С. М. Ахмин, С. Г. Львов, Л. В. Мосина
Технический редактор С. Г. Львов

Издательство ФИЦ КазНЦ РАН
420029, Казань, Сибирский тракт, 10/7
Лицензия № 0325 от 7 декабря 2000 года

Подписано в печать 15.07.2025
Формат 60х90/8. Бумага мелованная
Гарнитура Times. Печать офсетная
Тираж 100 экз.

Предисловие редактора

Как всегда, очередной Ежегодник-2024 Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН суммирует итоги нашей работы за год, событий в жизни всего института и каждого физтеховца. Очень радует, что в нашем физтехе происходят актуальные изменения в тематике и организационной структуре. И в то же время сохраняются и развиваются хорошие традиции нашего института. Всё это можно увидеть, прочитать в этом Ежегоднике.

Выход каждого очередного номера Ежегодника – это взгляд на наш институт как бы “из мышиной норы” (по Гумилёву). Но это даёт удобный повод посмотреть и попытаться оценить нашу деятельность, нашу жизнь и “с высоты птичьего полёта”. 12 лет тому назад началась реформа РАН. Восемь лет тому назад все институты РАН в Татарстане были объединены в один Федеральный исследовательский центр КазНЦ РАН. Нормально и ожидаемо такая перемена в нашей жизни была встречена неоднозначно. Естественно, были опасения. Слишком разными представлялись профили институтов, которых объединили в один центр. Но у нас, как выяснилось, оказалось и много общего. Я бы в первую очередь отметил наше общее желание работать, работать настойчиво. Мы периодически общаемся, начинаем понимать друг друга. Уже выполняем задания, которые выполняются одновременно, согласованно сотрудниками разных подразделений ФИЦа. Очень важным фактором стало то, что создание ФИЦа укрепило позиции науки, учёных в обществе, в Республике Татарстан и во всей стране. Конечно, это вдохновляет на творчество, прибавляет оптимизма.

Регулярный выход нашего Ежегодника, его содержание, профессиональный уровень издания служат одним из свидетельств самоотверженной работы физтеховцев.

Многие внесли вклад в создание очередного Ежегодника. Всем большое спасибо. Особая благодарность коллегам, которые подготовили Ежегодник к печати: С. М. Ахмину, Т. П. Гавриловой, С. Г. Львову, Л. В. Мосиной, Л. И. Савостиной, О. Б. Яндугановой.

К. М. Салихов

Слово руководителя

Дорогие коллеги!

В 2024 году, как и в предыдущие годы, в нашем физтехе, обладающим мощным кадровым потенциалом и поддерживающим развитие сильных научных школ, активно проводились фундаментальные и прикладные исследования в соответствии с приоритетными направлениями, сформулированными в Программе развития ФИЦ КазНЦ РАН. За прошлый год наш институт приумножил свои научные достижения несмотря на объективные сложности. Увеличение объёмов финансирования, включая грантовую поддержку, высокая публикационная активность, обновление приборного парка, растущее сотрудничество с реальным сектором экономики, организация научных конференций, проведение торжественных мероприятий по вручению Международной премии им. Е. К. Завойского, встреча с многочисленными гостями института, защиты диссертаций и заслуженные награды – всё это вместе наглядно демонстрирует успехи сотрудников физтеха в 2024 году и отражено на страницах этого выпуска Ежегодника.

В 2024 году сотрудники института были удостоены многих важных знаков отличия, в числе которых ведомственные награды – Почётное звание “Почётный работник науки и высоких технологий Российской Федерации”, региональные награды – Благодарности Кабинета Министров Республики Татарстан, Почётные грамоты Минобрнауки Республики Татарстан, Почётной грамотой г. Казани, Знак отличия “За труд и доблесть на благо Казани”, Почётная грамота Казанского научного центра РАН, международная награда – медаль “Памяти академика Н. М. Эмануэля” и др. Свою высочайшую квалификацию сотрудники физтеха подтвердили и защитами диссертационных работ. Было защищено три диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук и одна – на соискание учёной степени доктора физико-математических наук.

2024 год был знаменателен 80-летним юбилеем открытия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Совместно с КФУ мы успешно провели международную конференцию Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives (EPR-80), приуроченную к этому замечательному событию. Традиционно в Актовом зале Академии наук РТ состоялось вручение Международной премии имени Е. К. Завойского. В этот раз лауреатами премии стали проф. Роберт Гиффин (США) и проф. Анатолий Ванин (Россия) за выдающийся вклад в развитие методологии ЭПР и его применения в биохимии и живых организмах.

В 2025 году нас ожидает замечательное научное мероприятие – Неделя науки города Казани “Kazan Science Week-2025”, которое будет включать в себя церемонию вручения Международной премии имени Е. К. Завойского, международную конференцию “Современное развитие магнитного резонанса” (“Modern Development of Magnetic Resonance 2025”), международную конференцию “Передовые лазерные технологии” (“Advanced Laser Technologies – ALT 2025”), конференцию “Сверхпроводимость в наноструктурах” (“Superconductivity in nanostructures 2025”), а также молодёжные школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (“Coherent optics and optical spectroscopy 2025”) и “Актуальные проблемы магнитного резонанса и его применений” (“Actual problems of magnetic resonance and its applications 2025”). Уверен, что научные мероприятия в рамках Недели науки города Казани будут организованы и проведены на самом высоком уровне благодаря самоотдаче и преданности науке наших сотрудников.

Важным является активное участие сотрудников нашего института в популяризации физтеха и науки в целом. Физтех регулярно посещают экскурсии, включая школьников, студентов и их родителей, которые жаждут узнать больше о науке, возможностях профессиональной ориентации, направлениях современных исследований. На мой взгляд, такое сотрудничество со школами и вузами играет ключевую роль в развитии института, так как способствует привлечению талантливой молодёжи и формированию нового поколения специалистов. Также в этом году был снят ряд репортажей о нашем институте, работе молодых учёных в научной сфере. Кроме того, мы принимаем самое активное участие (совместно с Университетом Иннополис и КФУ) в разработке концепции физико-химического прорыва, направленной на повышение качества обучения физике и химии. Несомненно, эта непростая работа принесёт свои плоды в ближайшем будущем.

И хочется верить, что благодаря нашим совместным усилиям физтех не только сохранит свои лидерские позиции в проводимых фундаментальных и прикладных научных исследованиях мирового уровня, но будет и дальше процветать и развиваться.

С. М. Хантимеров

Содержание

Структура института

- 10 Структура института

Важнейшие события года

- 13 Признание заслуг
18 Подписано соглашение о сотрудничестве между КФТИ им. Е. К. Завойского и Институтом физики КФУ

Важнейшие результаты года

- 19 Важнейшие результаты исследований 2024 года

Научные сообщения

- 24 Изолирование одиночных апконверсионных люминесцентных частиц на поверхности путём прецизионного микроманипулирования в сканирующем зондовом микроскопе
А. П. Чукланов, В. В. Никулина, Е. О. Митюшкин, Н. М. Лядов, Л. А. Нуртдинова, Д. К. Жарков, А. В. Леонтьев, В. Г. Никифоров, Н. И. Нургазизов
- 30 Ионный синтез наночастиц Ag в матрице GaAs
А. Л. Степанов, Д. А. Коновалов, А. М. Rogov, В. Ф. Валеев, В. И. Нурджин
- 34 Лазерный нагрев и кристаллизация нанопористых слоёв германия, сформированных имплантацией ионами серебра, возникающих при возбуждении комбинационного рассеяния
А. Л. Степанов, Д. А. Коновалов, А. М. Rogov, В. Ф. Валеев, В. И. Нурджин, А. В. Павликов, А. М. Шарафутдинова
- 40 Влияние магнитного поля на электрическую поляризацию малых ферромагнитных частиц цилиндрической формы
Т. С. Шапошникова, Р. Ф. Мамин
- 45 Новый подход к получению бозе-эйнштейновского конденсата
К. М. Салихов
- 51 ЭПР-исследование содержания оксида азота в спинном мозге крыс через семь суток после сочетанной травмы головного и спинного мозга
В. В. Андрианов, Л. В. Базан, А. И. Арсланов, Х. Л. Гайнутдинов
- 55 Особенности применения гауссова импульса для измерения времени фазовой релаксации в многоимпульсной последовательности
Р. Б. Зарипов, И. Т. Хайрутдинов

59	Магнитные свойства $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$ <i>И. В. Яцык, Р. М. Еремина, Р. Ф. Ликеров, Р. Г. Батулин</i>
63	Гептаядерный комплекс Fe(II)–Fe(III) как многофункциональный магнитный материал <i>А. Р. Шарипова, Е. Е. Батуева, Е. Н. Фролова, Л. В. Базан, О. А. Туранова</i>
66	Самосборка циклических дипептидов на основе аланина и фенилаланина в тонких плёнках по данным АСМ <i>А. С. Морозова, Е. О. Кудрявцева, А. А. Камалетдинова, С. А. Зиганишина, М. А. Зиганишин, А. А. Бухараев</i>
69	Методы оптимизации для совмещения систем квантовой памяти на оптических резонаторах <i>Н. С. Перминов, С. А. Моисеев</i>
73	Влияние спиновых корреляций на транспортные свойства кристаллов $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ <i>Д. Е. Железнякова, И. И. Гимазов, Ю. И. Таланов</i>
77	Идентификация компонент спектра ЭПР механоактивированного глюконата кальция в W-диапазоне <i>М. М. Ахметов, Г. Г. Гумаров, Р. Б. Зарипов, Ю. В. Садчиков, А. Н. Ашихмин</i>
80	Определение оптической нелинейности новых D-π-A хромофоров методами фемтосекундной спектроскопии <i>Д. Н. Петров, А. Г. Шмелев, Б. А. Хабибуллин, А. В. Леонтьев, Л. А. Нуртдинова, Д. К. Жарков, Л. Н. Исламова, А. А. Калинин, М. Ю. Балакина, В. Г. Никифоров</i>
84	Импульсный отжиг кремния, имплантированного ионами индия и сурьмы <i>Р. И. Баталов, В. В. Базаров, В. И. Нурждин, В. Ф. Валеев, Г. А. Новиков, В. А. Шустов</i>
89	Фотолюминесценция кислородных вакансий в рутиле (TiO_2), облучённом ионами аргона <i>Е. М. Бегиев, В. В. Базаров, В. Ф. Валеев, Д. К. Жарков, Н. М. Лядов, В. И. Нурждин, А. Г. Шмелев, Р. И. Хайбуллин</i>
95	Двухканальная ЭПР-спектроскопия с квадратурным детектированием примесных центров меди во фториде бария (BaF_2) <i>Р. Б. Зарипов, В. Ф. Тарасов, В. А. Уланов</i>
100	Оценка возможности использования интерферометра Жамена для создания государственного первичного эталона скорости продольных ультразвуковых колебаний в прозрачных твёрдых телах <i>А. Д. Шишкин, В. В. Семашко, А. А. Карабутов</i>
107	Люминесцентная термометрия на основе микрокристаллов LiHoF_4 <i>В. И. Колесникова, Г. С. Шакуров, О. А. Морозов, А. Г. Шмелев, С. Л. Кораблева, В. В. Семашко</i>
115	Многофункциональная импульсная программа для получения изображений на специализированном магнитно-резонансном томографе с индукцией поля 0.4 Тл <i>В. Л. Одиванов, Я. В. Фаттахов, А. Р. Фахрутдинов, В. А. Шагалов, А. Р. Баязитов</i>
121	Синтез непланарных углеродных нанотрубных структур на поверхности никеля методом CVD <i>Е. Ф. Куковицкий, С. Г. Львов, В. А. Шустов</i>
125	Abstracts

Аспиранты и молодые учёные

- 130 Аспиранты и молодые учёные

Персоналии

- 131 Алла Ивановна Андреева. К 80-летию со дня рождения
Сотрудники лаборатории СФСХ
- 132 Александр Николаевич Аникин. К 70-летию со дня рождения
Я. В. Фаттахов, А. Р. Фахрутдинов, В. А. Шагало, А. А. Баязитов
- 134 Ленар Рафгатович Тагиров. К 70-летию со дня рождения
*А. А. Калачёв, К. М. Салихов, М. Х. Салахов, С. М. Хантимеров,
С. А. Зиганишина, Т. П. Гаврилова, Л. И. Савостина, И. А. Гарифуллин,
Р. М. Ерёмин, В. Е. Катаев, А. А. Камашев, Ю. И. Таланов,
Р. И. Хайбуллин, И. А. Файзрахманов, Р. Н. Шахмуратов, Р. В. Юсупов*
- 136 Ольга Олеговна Куприянова. К 70-летию со дня рождения
Н. Г. Куркина
- 137 Ильдар Валеевич Гайнутдинов. К 70-летию со дня рождения
С. Г. Львов, Е. Ф. Куковицкий, Н. М. Сулейманов
- 138 Сергей Михайлович Ахмин. К 70-летию со дня рождения
Л. В. Мосина, К. М. Салихов
- 147 Марьям Ильгизаровна Ибрагимова. К 70-летию со дня рождения
И. А. Файзрахманов

Памяти...

- 149 Памяти Ады Наумовны Спиваковской
Г. Э. Фалина
- 150 Памяти Станислава Александровича Мигачёва
Р. Ф. Мамин, В. Ф. Тарасов, А. М. Шегада
- 152 Памяти Игоря Васильевича Овчинникова
Е. Н. Фролова от имени коллег и близких
- 158 Памяти Эльмиры Рашидовны Хисамовой
И. А. Файзрахманов
- 158 Памяти Вадима Алексеевича Голенищева-Кутузова

Научно-организационная деятельность

- 159 О работе Учёного совета
Л. И. Савостина
- 161 Семинар памяти Григория Бенционовича Тейтельбаума
Ю. И. Таланов
- 162 Проект “Наука как искусство”
Р. М. Ерёмин
- 165 “День без турникетов”
Т. П. Гаврилова
- 168 Гостеприимные учёные
Т. П. Гаврилова
- 169 Международная конференция “Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives” (EPR-80)
Т. П. Гаврилова

172	Международная премия им. Е. К. Завойского 2024 <i>Л. В. Мосина</i>
173	“EPR newsletter”: Как мы отметили 80-летие открытия ЭПР <i>Л. В. Мосина</i>
175	Журнал “Applied Magnetic Resonance” <i>Л. В. Мосина</i>
177	Премия имени М. Л. Блатта <i>С. Г. Львов</i>
177	Репортаж с торжественного заседания, посвящённого проводам старого и встрече Нового 2025 года <i>Д. Е. Железнякова</i>

СМИ о сотрудниках института

181	Будущее науки за молодыми
182	Алексей Калачёв, директор ФИЦ КазНЦ РАН: “Санкции – это независимая оценка значимости проводимых нами исследований”
184	Репортаж о работе КФТИ
186	Лучший молодой учёный Татарстана 2023 года – Андрей Камашев
188	Женский взгляд на фундаментальную науку. Интервью с Анной Морозовой
192	Каждый учёный – немного герой
194	“Наука интернациональна”: В Академии наук наградили профессоров из России и США
195	И германий может быть пористым

Цифры и факты

196	2024 год в цифрах
197	Темы государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН, выполняемые КФТИ им. Е. К. Завойского
197	Проекты, финансируемые на конкурсной основе
198	Публикации
205	Защиты, награды
206	Участие сотрудников института в преподавательской деятельности
207	Патенты
208	Конференции, организованные КФТИ и при участии КФТИ
217	Участие сотрудников в конференциях
224	Гости института



Структура приводится по состоянию на 31 декабря 2024 года

Дирекция

Руководитель института

Хантимеров Сергей Мансурович, к.ф.-м.н.

Зам. руководителя по научной работе

Гаврилова Татьяна Павловна, к.ф.-м.н.

Учёный секретарь

Савостина Людмила Ивановна, к.ф.-м.н.

Главный бухгалтер

Гусева Раиса Рафаиловна

Начальник ПЭО

Хабибуллина Валентина Ивановна

Научный руководитель института

Салихов Кев Минуллинович,
действительный член РАН и АН РТ,
Заслуженный деятель науки РФ, проф., д.ф.-м.н.

Учёный совет

Калачёв Алексей Алексеевич, д.ф.-м.н., член-корр. РАН
председатель

Таланов Юрий Иванович, д.ф.-м.н.

зам. председателя

Бухараев Анастас Ахметович, д.ф.-м.н., член-корр. АН РТ

Вавилова Евгения Леонидовна, д.ф.-м.н.

Воронкова Виолета Константиновна, д.ф.-м.н.

Гаврилова Татьяна Павловна, к.ф.-м.н.

Гарипов Ранис Рамисович, к.ф.-м.н.

Ерёмина Рушана Михайловна, д.ф.-м.н.

Камашев Андрей Андреевич, к.ф.-м.н.

Мамин Ринат Файзрахманович, д.ф.-м.н.

Никифоров Виктор Геннадьевич, к.ф.-м.н.

Савостина Людмила Ивановна, к.ф.-м.н.

Салихов Кев Минуллинович, д.ф.-м.н., действительный
член РАН и АН РТ

Тагиров Ленар Рафгатович, д.ф.-м.н., член-корр. АН РТ

Тарасов Валерий Фёдорович, д.ф.-м.н.

Файзрахманов Ильдар Абдулкабирович, д.ф.-м.н.

Фаттахов Яхъя Валиевич, к.ф.-м.н.

Хантимеров Сергей Мансурович, к.ф.-м.н.

Хайбуллин Рустам Ильдусович, к.ф.-м.н.

Шакуров Гильман Султанович, д.ф.-м.н.

Шахмуратов Рустэм Назимович, д.ф.-м.н.

Курбатова Надежда Васильевна,

технический секретарь

Научные подразделения

Отдел химической физики

Лаборатория физики и химии поверхности

Руководитель:

к.ф.-м.н. Нургазизов Нияз Ильгизович

Лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Руководитель: Заслуженный деятель науки РТ,

д.ф.-м.н. Воронкова Виолета Константиновна

Лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков

Руководитель: Заслуженный деятель науки РТ,

д.ф.-м.н. Ерёмина Рушана Михайловна

Лаборатория молекулярной радиоспектроскопии

Руководитель: д.т.н. Туранов Александр Николаевич

Отдел когерентной и нелинейной оптики

Лаборатория нелинейной оптики

Руководитель:

к.ф.-м.н. Шкаликов Андрей Викторович

Лаборатория квантовой оптики в алмазах

Руководитель:

к.ф.-м.н. Никифоров Виктор Геннадьевич

Лаборатория квантовой оптики и информационных технологий

Руководитель: к.ф.-м.н. Латыпов Ильнур Зиннурович

Лаборатория функциональных материалов и технологий фотоники

Руководитель: д.ф.-м.н. Семашко Вадим

Владимирович

Отдел радиационных воздействий на материалы

Лаборатория радиационной физики

Руководитель: Заслуженный деятель науки РТ,

д.ф.-м.н. Файзрахманов Ильдар Абдулкабирович

Лаборатория радиационной химии и радиобиологии

Руководитель: к.ф.-м.н. Гумаров Габдрауф

Габдрашитович

Лаборатория интенсивных радиационных воздействий

Руководитель: к.ф.-м.н. Баталов Рафаэль Ильясович

Отдел физики перспективных материалов

Лаборатория проблем сверхпроводимости и спинтроники

Руководитель:

к.ф.-м.н. Камашев Андрей Андреевич

Лаборатория физики ферроиков и функциональных материалов

Руководитель: д.ф.-м.н. Мамин Ринат

Файзрахманович

Научно-исследовательское подразделение перспективных прикладных исследований

Лаборатория физики углеродных наноструктур и композитных систем

Руководитель: Заслуженный деятель науки РТ,

д.ф.-м.н. Сулейманов Наиль Муратович

Лаборатория нанооптики и наноплазмоники

Руководитель: д.ф.-м.н. Степанов Андрей Львович

Лаборатория моделирования физико-механических процессов и систем имени С. К. Черникова

Руководитель: к.т.н. Садчиков Юрий Викторович

Лаборатория методов медицинской физики

Руководитель: к.ф.-м.н. Фаттахов Яхъя Валиевич

Научно-вспомогательные подразделения

*Отдел информационной безопасности,
телекоммуникационных и сетевых технологий*
Руководитель: Хисамов Артур Рауфович

Отдел криогенной техники
Начальник: Арсланов Ильгиз Альбертович

Научно-техническая библиотека
Заведующая: Фалина Гульшат Эльгизовна

Научно-организационный отдел
Руководитель: учёный секретарь
Савостина Людмила Ивановна, к.ф.-м.н.

Прочие подразделения

Административно-управленческий персонал

Приёмная
Секретарь директора:
Губайдуллина Альфия Закировна

Канцелярия
Заведующая: Куркина Нина Георгиевна

Бухгалтерия
Главный бухгалтер: Гусева Раиса Рафаиловна

Планово-экономический отдел
Руководитель (главный экономист):
Хабибуллина Валентина Ивановна

Ведущий специалист по гос. закупкам:
Пушкова Валентина Валерьевна

Отдел кадров
Начальник: Посокова Ирина Винедиктовна

*Служба по комплексному обслуживанию и ремонту
зданий, сооружений, инженерных систем*
Руководитель: Оладошкин Юрий Владимирович

ВАЖНЕЙШИЕ СОБЫТИЯ ГОДА

Признание заслуг

Юбилейная медаль “300 лет Российской академии наук” – юбилейная медаль Российской Федерации, учреждённая Указом Президента Российской Федерации от 5 декабря 2022 г. № 874 как государственная награда Российской Федерации, была вручена от имени Президента Российской Федерации следующим сотрудникам:

- Бухараев Анастас Ахметович, г.н.с.
- Воронкова Виолета Константиновна, в.н.с.
- Гарифуллин Ильгиз Абдулсаматович, г.н.с.
- Калачёв Алексей Алексеевич, директор ФИЦ КазНЦ РАН
- Овчинников Игорь Васильевич, в.н.с.
- Салихов Кев Минуллинович, научный руководитель института

- Сулейманов Наиль Муратович, в.н.с.
- Таланов Юрий Иванович, в.н.с.
- Тарасов Валерий Фёдорович, г.н.с.
- Хантимеров Сергей Мансурович, руководитель института
- Шахмуратов Рустэм Назимович, в.н.с.

Согласно положению о юбилейной медали, ею могут награждаться: члены РАН; работники РАН, которые имеют стаж работы более 15 лет; сотрудники научных организаций и вузов, имеющие стаж более 20 лет; россияне, внёсшие значительный вклад в научно-техническое развитие страны.



Вручение медалей в честь 300-летия Российской академии наук. Слева направо: В. К. Воронкова, Ю. И. Таланов, Р. Н. Шахмуратов, А. А. Бухараев, А. Н. Туранов (получил медаль за И. В. Овчинникова), С. М. Хантимеров.

Медалью “Памяти академика Н. М. Эмануэля” за большие достижения в области химической и биохимической физики награждён Зарипов Руслан Булатович, с.н.с. лаборатории спиновой физики и спиновой химии КФТИ. Награждение состоялось 1 октября 2024 года в Институте биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН, г. Москва.



Награду к.ф.-м.н. Зарипову Руслану Булатовичу вручает директор Института биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН, д.х.н. Курочкин Илья Николаевич.

Почётной грамоты Президента РФ удостоен Салихов Кев Минуллинович, научный руководитель КФТИ.



Государственной награды Республики Татарстан (медали “За доблестный труд”) удостоен Тарасов Валерий Фёдорович, г.н.с.

Медалью “За доблестный труд” награждаются граждане за высокие достижения в труде в области государственного, экономического, социального и культурного развития Республики Татарстан, в развитии экономического, научного и технического потенциала республики.

Благодарность Кабинета Министров Республики Татарстан вручена Шахмуратову Рустэму Назимовичу, в.н.с.

Благодарность Кабинета Министров Республики Татарстан является одной из форм поощрения за плодотворный труд и значительный вклад гражданина или коллектива предприятия, учреждения, организации в развитие государственности, местного самоуправления, экономики, промышленности, сельского хозяйства, науки, культуры, искусства, образования, здравоохранения, спорта, заслуги в области национальной и общественной безопасности, укреплении правопорядка и обороны, активное участие в общественно-политической жизни республики, а также за иные заслуги (достижения) перед Республикой Татарстан.

Почётное звание “Почётный работник науки и высоких технологий Российской Федерации” присвоено Тагирову Ленару Рафгатовичу, в.н.с.

Благодарности Министерства науки и высшего образования РФ удостоен Файзрахманов Ильдар Абдулкабирович, г.н.с.

Ведомственной награды Минобрнауки Республики Татарстан удостоены:

- Арсланов Ильгиз Альбертович, заведующий отделом,
- Шегеда Анатолий Михайлович, с.н.с.

Руководитель КФТИ Сергей Мансурович Хантимеров вручает награды сотрудникам института:



Виолете Константиновне Воронковой



Валерию Фёдоровичу Тарасову



Рустэму Назимовичу Шахмуратову



Анатолию Михайловичу Шегедe

Муниципальные награды города Казань

- Андреева Алла Ивановна, инженер-исследователь, награждена **Знаком отличия “За труд и доблесть на благо Казани”** за многолетний и добросовестный труд и заслуги в профессиональной деятельности.



- Куприянова Ольга Олеговна, лаборант-исследователь, награждена **Почётной грамотой** за многолетний и добросовестный труд на благо города Казани и заслуги в профессиональной деятельности.



Дирекция Федерального исследовательского центра “Казанский научный центр Российской академии наук” искренне благодарит Мухтасарову Халиму Лутфулловну, начальника отдела кадров Казанского физико-технического института имени Е. К. Завойского за многолетний добросовестный труд, чуткое и внимательное отношение к сотрудникам, неоценимый вклад в формирование дружелюбной и благоприятной атмосферы в стенах института в течение более чем полувека.



На собрании в Академии наук Республики Татарстан, посвящённом Дню российской науки, Раис Татарстана Рустам Нургалиевич Минниханов вместе с министром науки и высшего образования РФ Валерием Николаевичем Фальковым наградили:

- ведомственной наградой “Почётный работник науки и высоких технологий РФ” главного научного сотрудника лаборатории физики и химии поверхности, доктора физико-математических наук, заслуженного деятеля науки РТ, члена-корреспондента Академии наук РТ Бухараева Анастаса Ахметовича,
- дипломом за 1-е место в конкурсе “Лучший молодой учёный Республики Татарстан” в 2023 году в номинации естественные науки старшего научного сотрудника лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники, кандидата физико-математических наук Камашева Андрея Андреевича.



Слева направо: Раис Татарстана Р. Н. Минниханов, чл.-корр. АН РТ А. А. Бухараев, министр науки и высшего образования РФ В. Н. Фальков.



Слева направо: Раис Татарстана Р. Н. Минниханов, к.ф.-м.н. А. А. Камашев, министр науки и высшего образования РФ В. Н. Фальков.

Подписано соглашение о сотрудничестве между КФТИ им. Е. К. Завойского и Институтом физики КФУ

1 апреля 2024 года Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского и Институт физики КФУ подписали соглашение о сотрудничестве в сфере научно-исследовательской и инновационной деятельности.

Настоящее Соглашение предполагает взаимодействие Сторон по следующим направлениям:

- разработка и реализация совместных научных, научно-технических проектов и опытно-конструкторских работ по приоритетным направлениям развития науки и техники;
- формирование совместных временных научных коллективов, обеспечивающих проведение научных, научно-технических проектов и опытно-конструкторских работ, включая экспериментальные работы на оборудовании Сторон;
- обмен научно-технической, архивной и библиографической информацией, документацией, литературой и библиографическими изданиями и совместное использование информационных ресурсов Сторон;
- проведение совместных семинаров, научных конференций, рабочих встреч и иных научных мероприятий;
- повышение квалификации и подготовка научных кадров, в том числе через аспирантуру, докторантуру, путём стажировок или создания базовых кафедр, научных лабораторий;
- подготовка и публикация результатов совместных работ в ведущих научных журналах;
- доступ исследователей каждой Стороны к уникальным установкам, центрам коллективного пользования, технопаркам, исследовательскому и технологическому



Директор института физики КФУ, д.ф.-м.н. М. Р. Гафуров (слева) и руководитель КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, к.ф.-м.н. С. М. Хантимеров (справа).

оборудованию, включая возможность передачи оборудования между Сторонами, архивам, библиотекам и музеям, имеющимся у Сторон для проведения совместных научных работ, включая совместные полевые исследования и экспедиции;

- популяризация результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в том числе – в цифровом формате;
- в иных взаимосогласованных формах, обеспечивающих реализацию данного Соглашения.

Срок действия соглашения – 5 лет.



Слева направо: Р. В. Юсупов, заведующий кафедрой квантовой электроники и радиоспектроскопии Института физики КФУ, И. В. Романова, заместитель директора по научной деятельности Института физики КФУ, директор Института физики КФУ, д.ф.-м.н. М. Р. Гафуров, руководитель КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, к.ф.-м.н. С. М. Хантимеров, заместитель руководителя по научной работе КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, к.ф.-м.н. Т. П. Гаврилова.

ВАЖНЕЙШИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГОДА

Важнейшие результаты исследований 2024 года

I.

Экспериментально зарегистрирована поляризация апконверсионного люминесцентного излучения одиночной NaYbF₄:Er микрочастицы

Методом гидротермального синтеза были получены микрочастицы NaYbF₄:Er. Одиночные микрочастицы были изолированы на поверхности стеклянной подложки методами сканирующей зондовой микроскопии, что позволило регистрировать апконверсионный люминесцентный отклик от одной микрочастицы NaYbF₄:Er с помощью конфокального оптического микроскопа. Установлено, что эмиссия ионов Er³⁺ в спектральной области 655–667 нм обладает заметной поляризацией, обусловленной пространственной анизотропией микрочастицы (рис. 1а–г). Высокая температурная чувствительность спектров люминесценции микрочастицы позволяет использовать её в качестве температурного сенсора с высоким пространственным разрешением. Наблюдаемая поляризация может использоваться для идентификации одиночной микрочастицы в ансамбле (рис. 1д–ж).

Исследования проводились в рамках выполнения грантов РНФ № 23-42-10012 (рук. Никифоров В.Г.) и РНФ № 23-29-00516 (рук. Чукланов А.П.).

Авторы: Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Митюшкин Е.О., Шмелёв А.Г., Жарков Д.К., Лядов Н.М., Морозова А.С., Чукланов А.П., Нургазизов Н.И., Никифоров В.Г.

Публикации:

1. Leontyev A.V., Nurtdinova L.A., Mityushkin E.O., Shmelev A.G., Zharkov D.K., Chuklanov A.P., Nurgazizov N.I., Nikiforov V.G.: Polarized luminescence in single upconversion NaYbF₄:Er rods // New J. Chem. **48**, 14029 (2024)
2. Chuklanov A.P., Morozova A.S., Nurgazizov N.I., Mityushkin E.O., Zharkov D.K., Leontyev A.V., Nikiforov V.G.: The precision movement of upconversion nanoparticles on a surface by using scanning probe microscopy // Technical Physics **69**, 1164 (2024)

Приоритетное направление ПФНИ: 1.3.5.4. Развитие методов спектроскопии, люминесценции и прецизионных оптических измерений.

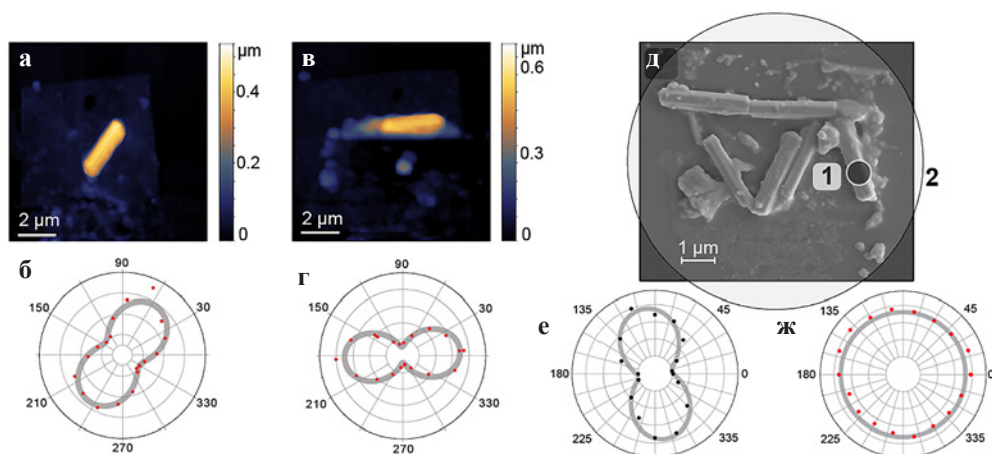


Рис. 1. АСМ-изображения NaYbF₄:Er микрочастицы: до (а) и после поворота на 52° (б), и соответствующие им зависимости соотношений интенсивности люминесценции на волнах 655 и 667 нм ($R = I_{655}/I_{667}$) от угла анализатора (г, д). СЭМ-изображение ансамбля NaYbF₄:Er микрочастиц (д) и угловые зависимости R при возбуждении лазером, области 1 (е) диаметром 0.7 мкм, т.е. на одной частице, и области 2 (ж) диаметром 9.3 мкм т.е. на всех микрочастицах в ансамбле (для наглядности области обозначены на панели (д)).

2.

Экспериментальное подтверждение новой парадигмы спинного обмена в разбавленных растворах парамагнитных частиц

Результаты наших экспериментальных исследований зависимости формы спектров ЭПР растворов нитроксильных радикалов от концентрации радикалов, температуры и мощности микроволнового поля подтвердили принципиальные теоретические предсказания новой парадигмы спинного обмена, предложенной недавно К. М. Салиховым:

Для радикалов ^{14}N Tempol в условиях обменного сужения спектра, интегральная интенсивность спектра сосредоточена на узкой центральной ($m = 0$) азотной

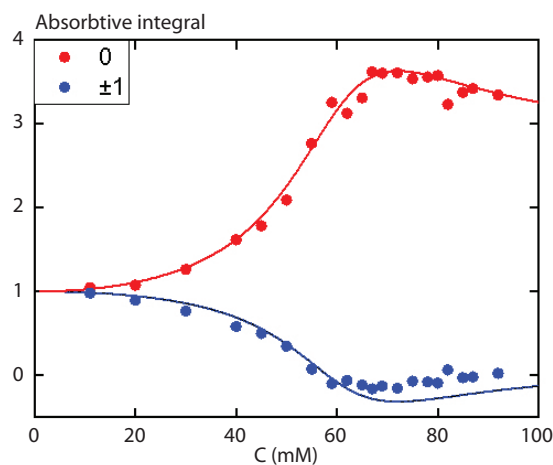


Рис. 1. Рассчитанные (сплошные) и измеренные (кружки) интегральные (дважды интегрированные) интенсивности азотных СТС-компонент спектра ЭПР: $m = 0$ (красный цвет), $m = \pm 1$ (синий цвет).

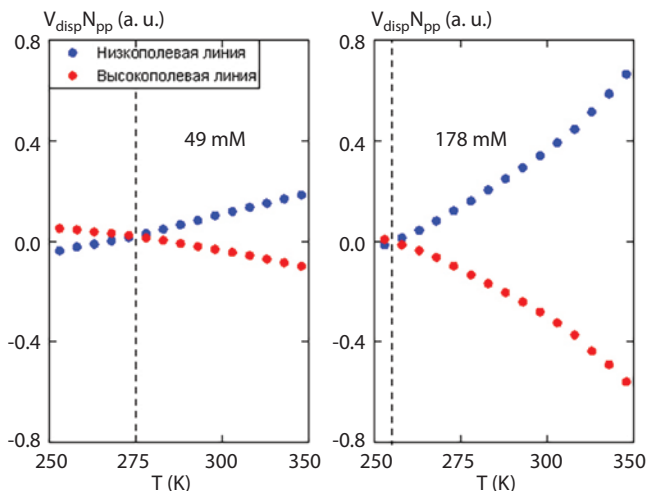


Рис. 2. Экспериментальное подтверждение того, что при заданной концентрации радикалов ^{15}N Tempol при некоторой температуре раствора перенос спиновой когерентности обращается в нуль.

СТС-компоненте (рис. 1). А две боковые ($m = \pm 1$) СТС-компоненты имеют малую интегральную интенсивность, и фаза этих сигналов соответствует излучению.

Для радикалов ^{15}N Tempol в условиях сравнительно медленного спинного обмена продемонстрирован эффект отрицательной интерференции вкладов изотропного обменного взаимодействия при случайных бимолекулярных столкновениях радикалов и анизотропного диполь-дипольного спин-спиновой взаимодействий в перенос спиновой когерентности спину выделенного радикала от партнёра по взаимодействию. При заданной концентрации радикалов суммарный вклад этих взаимодействий в перенос спиновой когерентности обращается в нуль, как показано на рис. 2.

Исследования проводились в рамках выполнения госзадания ФИЦ КазНЦ РАН “Развитие физических принципов квантовых оптических и спиновых технологий, спинтроники сверхпроводящих и магнитных топологических систем”, руководитель А. А. Калачёв, № 122011800133-2.

Авторы: Бакиров М.М., Зарипов Р.Б., Хайрутдинов И.Т., Салихов К.М.

Публикации:

1. Salikhov K.M., Bakirov M.M., Khairutdinov I.T., Zaripov R.B. // J. Magn. Reson. **363**, 107703 (2024)
2. Bales B.L., Peric M., Schwartz R.N., Bakirov M.M., Khairutdinov I.T. // J. Magn. Reson. **368**, 107711 (2024)

Приоритетное направление ПФНИ: 1.3.2.5; 1.3.2.7; 1.3.2.3.

3.

Необычное ферромагнитное поведение эпитаксиальных плёнок SnO_2 с имплантированной примесью кобальта

С целью получения магнитного полупроводника на основе диоксида олова (SnO_2) для спинтроники впервые проведены эксперименты по имплантации ионов Co^+ с энергией 40 кэВ в тонкие эпитаксиальные плёнки SnO_2 с дозами более чем $3.0 \cdot 10^{16}$ ион/см². Показано, что высокодозная имплантация кобальта вызывает значительные изменения в микроструктуре плёнок SnO_2 (формированию наночастиц и твёрдого раствора примеси кобальта, рис. 1a) и приводит к явлению ферромагнетизма с температурой Кюри выше комнатной. Установлено сильное влияние температуры подложки во время имплантации, а также среды последующего отжига (на воздухе или в вакууме) на элементно-фазовый состав и магнитные свойства имплантированных плёнок SnO_2 . Наблюдаемый ферромагнетизм проявляет ряд особенностей.

1. Необычно высокие значения коэрцитивного поля ($H_c \geq 2500$ Э) в случае имплантации при комнатной температуре. Напротив, коэрцитивность плёнок, имплантированных при повышенной температуре подложки, существенно ниже (рис. 1b).

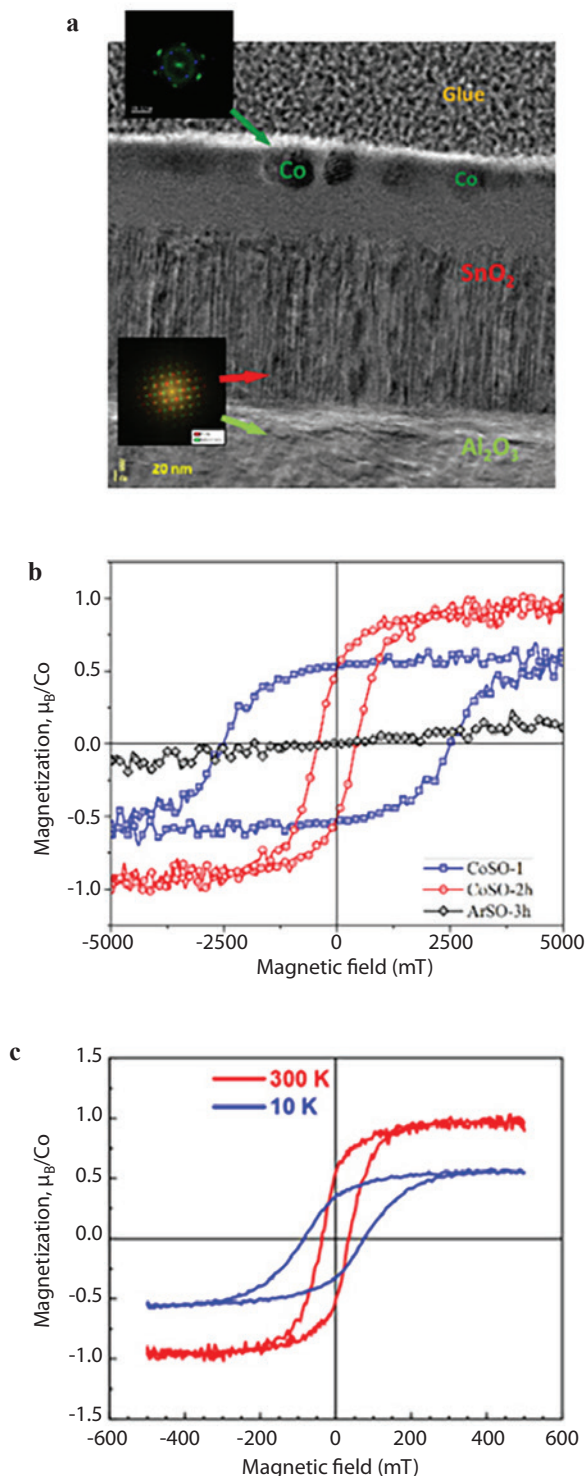


Рис. 1. Микроструктура (а) и магнитные свойства (б, в) плёнок SnO₂, имплантированных ионами кобальта с дозой $1.0 \cdot 10^{17}$ ион/см² при комнатной (а, б) или повышенной (б, в) температуре подложки.

2. Как петли магнитного гистерезиса, так и спектры ферромагнитного резонанса в низкокоэрцитивных образцах проявляют слабую out-of-plane угловую зависимость, что нетипично для тонких магнитных плёнок.

3. Сильное химическое воздействие этанола на магнетизм и спектры ФМР.
4. Спад намагниченности (рис. 1с) и исчезновение сигналов ФМР с понижением температуры, что необычно для ферромагнетизма в целом.

Исследование выполнено в рамках гранта РНФ № 22-19-00712 (рук. Хайбуллин Р.И.)

Авторы: Хайбуллин Р.И. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, Институт физики КФУ), Базаров В.В., Бегишев Е.М., Валеев В.Ф. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Вахитов И.Р., Гумаров А.И., Зиннатуллин А.Л., Нуждин В.И., Киямов А.Г., Лядов Н.М. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН; Институт физики КФУ), Суханов А.А., Файзрахманов И.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН).

Публикации:

1. Khaibullin R.I., Gumarov A.I., Vakhitov I.R., Sukhanov A.A., Lyadov N.M., Kiiamov A.G., Kuzina D.M., Bazarov V.V., Zinnatullin A.L.: Microstructure and unusual ferromagnetism of epitaxial SnO₂ films heavily implanted with Co ions // *Condensed Matter*. **9**, iss. 2. 2024. – Art. 27 (15 pages).
2. Begishev E., Bazarov V., Gumarov A., Lyadov N., Vakhitov I., Sukhanov A., Shustov V., Faizrahmanov I., Zinnatullin A., Khaibullin R. Ferromagnetism induced in SnO₂ films by Co ions implantations // *Abstracts of Internat. Conf. "Defects in Insulating Materials" (ICDIM-2024)*. Astana, Kazakhstan, 19–23 August, 2024. P. 34 (oral).
3. Особенности ферромагнетизма в эпитаксиальных плёнках диоксида олова (SnO₂), имплантированных ионами 3d-элементов / Хайбуллин Р.И., Бегишев Е.М., Базаров В.В., Валеев В.Ф., Вахитов И.Р., Гумаров А.И., Зиннатуллин А.Л., Киямов А.Г., Лядов Н.М., Суханов А.А. // Тезисы докладов IX Всеросс. конф. "Физические и физико-химические основы ионной имплантации". Нижний Новгород, Россия, 22–25 октября 2024 г. С. 28. (приглашённый)

Приоритетные направления ПФНИ: 1.3.2.3. Физика магнитных явлений, магнитные материалы и структуры, спинтроника; 1.3.2.10. Физическое материаловедение и физика дефектов.

4.

Технология повышения эффективности сверхпроводящего спинового клапана

Авторами предложена новая конструкция структуры сверхпроводящего спинового клапана (ССК) Ф1/Ф2/С, показывающая рекордную эффективность ССК на сегодняшний день. В качестве сверхпроводящего слоя в структурах ССК использовался свинец, а в качестве материала для ферромагнитных слоёв использовался сплав Гейслера (НА) Co₂Cr_{1-x}Fe_xAl_y. Магнитные свойства данного материала зависят от температуры подложки, на которую он наносится. Плёнки сплава Гейслера, приготовленные при комнатной температуре подложки (НА^{RT}),

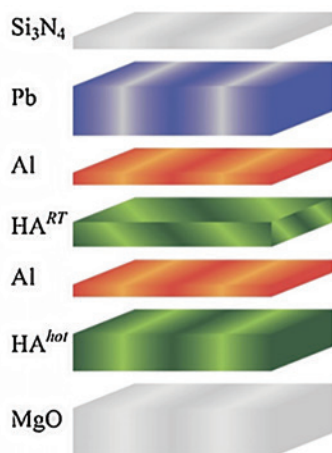


Рис. 1. Структура приготовленных образцов серии $\text{HA}^{\text{hot}}(20 \text{ нм})/\text{Al}(4 \text{ нм})/\text{HA}^{\text{RT}}(d_{\text{HA}})/\text{Al}(1.2 \text{ нм})/\text{Pb}(60 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(85 \text{ нм})$ с варьируемой толщиной HA^{RT} -слоя в пределах от 1 до 5 нм.

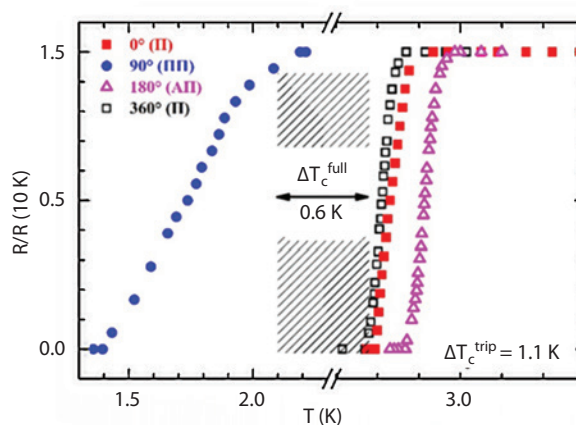


Рис. 2. Кривые сверхпроводящих переходов для П- ($\alpha = 0^\circ, 360^\circ$), ПП- ($\alpha = 90^\circ$) и АП-ориентации ($\alpha = 180^\circ$) намагниченностей Ф-слоев образца $\text{HA}^{\text{hot}}(20 \text{ нм})/\text{Al}(4 \text{ нм})/\text{HA}^{\text{RT}}(5 \text{ нм})/\text{Al}(1.2 \text{ нм})/\text{Pb}(60 \text{ нм})$. Заштрихованная область – ширина рабочей температурной зоны ΔT_c^{full} .

обладают малой степенью спиновой поляризации (ССП) и являются слабыми ферромагнетиками. Плёнки сплава Гейслера, приготовленные при температурах подложки 600 К и выше (HA^{hot}), обладают высокой СПП и являются сильными ферромагнетиками. В исследованных структурах ССК сплав Гейслера использовался как в качестве материала для Ф1-слоя (HA^{hot}), так и в качестве материала для Ф2-слоя (HA^{RT}). В этом случае HA^{RT} -слой выполнял роль своего рода селективного “фильтра” для генерации триплетных компонент сверхпроводящего конденсата в Ф1-слое, что позволило наблюдать более выраженный и настраиваемый эффект близости С/Ф (следовательно, и эффект ССК). В приготовленных структурах ССК удалось пронаблюдать гигантскую величину триплетного эффекта ССК более чем 1 К с рекордной шириной рабочей температурной зоны 0.6 К.

Исследования проводились в рамках выполнения гранта РНФ № 21-72-20153 “Исследование особенностей сверх-

проводимости, магнетизма и топологических эффектов в квантовых материалах” (руководитель Таланов Ю.И.).

Авторы: Камашев А.А., Гарифьянов Н.Н., Валидов А.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Катаев В.Е. (Leibniz Institute for Solid State and Materials Research, Dresden, Germany), Осин А.С., Фоминов Я.В. (Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, Черноголовка, Россия), Гарифуллин И.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН)

Публикация:

– Kamashev A.A., Garifyanov N.N., A.A. Validov, V. Kataev, A.S. Osin, Ya.V. Fominov, I.A. Garifullin, Expanding the operational temperature window of a superconducting spin valve, *Physical Review B* **109**, 144517, 2024

Приоритетные направления ПФНИ: 1.3.2.5 – Физика нано- и гетероструктур, мезоскопика; 1.3.2.7 – Физика низких температур, квантовые кристаллы и жидкости; 1.3.2.3 – Физика магнитных явлений, магнитные материалы и структуры, спинтроника.

Лучшие доклады, представленные на устной сессии Итоговой научной конференции за 2024 год ФИЦ КазНЦ РАН. Секция физическая

С устными докладами выступили представители лабораторий физики и химии поверхности, спиновой физики и спиновой химии, радиоспектроскопии диэлектриков, интенсивных радиационных взаимодействий, методов медицинской физики, радиационной физики, проблем сверхпроводимости и спинтроники, функциональных материалов и технологий фотоники. Всего было сделано 14 интересных докладов по тематике лабораторий. По

завершению выступлений состоялось тайное голосование членов Учёного совета по выбору лучшего устного доклада.

Поздравляем победителей:

1-е место:

• Хайбуллин Р.И., Базаров В.В., Бегишев Е.М., Валиев В.Ф., Нуждин В.И., Лядов Н.М., Суханов А.А., Файзрахманов И.А. (КФТИ), Вахитов И.Р., Гумаров А.И., Зиннатуллин А.Л., Киямов А.Г. (КФУ): “Микро-

структура и необычное ферромагнитное поведение эпитаксиальных плёнок SnO_2 с имплантированной примесью кобальта”.

2-е место:

- Бегишев Е.М., Базаров В.В., Валеев В.Ф., Жарков Д.К., Лядов Н.М., Нуждин В.И., Шмелёв А.Г., Хайбуллин Р.И.: “Оптическая спектроскопия кислородных вакансий в рутиле (TiO_2), облучённом ионами аргона”.
- Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Одиванов В.Л., Баязитов А.А., Коновалов Д.А.: “Разработка и создание оборудования и методик, и проведения экспериментов по магнитно-резонансной томографии лёгких лабораторных животных с применением гиперполяризованного ксенона”.

3-е место:

- Колесникова В.И. (КФУ), Шакуров Г.С. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Морозов О.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, КФУ), Кораблева С.Л. (КФУ), Шишкин А.Д. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, КФУ), Семашко В.В. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН): “О возможности визуализации терагерцового излучения с использованием люминесцентных нанотермометров”.
- Салихов К.М.: “Новый подход к получению бозе-эйнштейновского конденсата”
- Суханов А.А., Воронкова В.К. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Jianzhang J. (Даляньский технологический университет, Китай) : “Фотофизические и фотохимические свойства термически активируемой задержанной флуоресценция на основе эффекта множественного резонанса”.

Изолирование одиночных апконверсионных люминесцентных частиц на поверхности путём прецизионного микроманипулирования в сканирующем зондовом микроскопе

А. П. Чукланов, В. В. Никулина, Е. О. Митюшкин, Н. М. Лядов, Л. А. Нуртдинова, Д. К. Жарков, А. В. Леонтьев, В. Г. Никифоров, Н. И. Нургазизов

Лаборатория физики и химии поверхности, лаборатория квантовой оптики в алмазах

В работе разработан и реализован подход, позволяющий манипулировать апконверсионными микрочастицами, осаждёнными на поверхность подложки. Был реализован алгоритм расчистки поверхности подложки с апконверсионными микрочастицами площадью порядка $100 \times 100 \text{ мкм}^2$, перемещение отдельных микрочастиц на расстояния вплоть до долей микрометров, контролируемый перенос относительно небольших конгломератов микрочастиц на макроскопически чистую поверхность. Предложенный метод позволяет гарантировано регистрировать апконверсионный люминесцентный отклик от конкретного единичного объекта в оптическом конфокальном микроскопе.

Isolation of single upconversion luminescent nanoparticles on a surface by precise micromanipulation in a scanning probe microscope

A. P. Chuklanov, V. V. Nikulina, Ye. O. Mityushkin, N. M. Lyadov, L. A. Nurtdinova, D. K. Zharkov, A. V. Leontyev, V. G. Nikiforov, N. I. Nurgazizov

Laboratory of surface physics and chemistry, Laboratory of quantum optics in diamonds

In this work, an approach has been developed and implemented that allows manipulation of upconversion microparticles deposited on the substrate surface. An algorithm for cleaning the substrate surface with upconversion microparticles with an area of about $100 \times 100 \text{ }\mu\text{m}^2$, moving individual microparticles over distances up to fractions of a micrometer, and controlled transfer of relatively small conglomerates of microparticles to a macroscopically clean surface has been implemented. The proposed method allows for guaranteed registration of the upconversion luminescent response from a specific single object in an optical confocal microscope.

Введение

Явление апконверсионной люминесценции состоит в поглощении системой атомов двух низкоэнергетических квантов света с последующей эмиссией одного фотона более высокой энергии [1]. Системы, в которых реализуется данный эффект, привлекают внимание исследователей благодаря широким перспективам использования: флуоресцентная микроскопия высокого разрешения,

3D дисплеи, солнечные батареи, материалы для лазерной оптики и т. п. [2, 3]. Одна из практически важных особенностей таких систем – высокая чувствительность апконверсионных люминесцентных спектральных линий к внешним условиям, например, к температуре [4, 5]. Накачка системы, как правило, осуществляется ближним инфракрасным излучением, в котором прозрачны большинство биологических тканей и некоторые интересные с точки зрения современных технологий неорганические

материалы, например, кремний. Это открывает перспективы применения апконверсионных систем как высокочувствительных малоинвазивных высокоразрешающих температурных сенсоров.

Эффект апконверсионной люминесценции обычно реализуется в монокристаллических матрицах с сильно анизотропными внутренними полями, которые допируются двумя типами редкоземельных ионов. Как правило, в качестве матрицы используют оксидные или фторидные монокристаллы микро- и наноразмеров в гексагональной фазе. Ион Yb^{3+} выступает в качестве сенситизатора, поскольку его сечение поглощения на длине волны 980 нм на порядок превосходит таковое для остальных редкоземельных ионов. Вторым близкорасположенным ионом (им может быть, например, Er^{3+} , Tm^{3+} , Ho^{3+}) является излучающим центром с характерными узкими линиями в спектре эмиссии. Возбуждение второго иона происходит в результате двухкратного переноса энергии с возбуждённого иона Yb^{3+} , что и определяет апконверсионные свойства системы из пары редкоземельных ионов. Эффективность двухквантового процесса возбуждения обусловлена метастабильными возбуждёнными уровнями (с субмиллисекундными временами жизни), участвующими в переносе энергии. В этой связи особую актуальность имеет правильный выбор матрицы с низкоэнергетичными фононами для минимизации нежелательной безызлучательной релаксации по многофононному механизму. Как правило, в роли таких матриц выступают оксидные (например, кристаллы VO_4 с энергией фонона 600 см^{-1}), или фторидные (например, кристаллы NaF_4 с энергией фонона 350 см^{-1}) соединения.

Современные способы измерения определяют температурную чувствительность на основе усреднённых характеристик ансамбля частиц. Однако спектральные свойства отдельных частиц могут сильно отличаться от усреднённых по ансамблю характеристик. Вариация размера и формы частиц, связанная с “мокрой” технологией химического синтеза в объёме жидкости, приводит к широкой дисперсии фотофизических свойств. При использовании большого ансамбля, например, в виде плёнки на поверхности твёрдого тела или в виде раствора в биологическом объекте, измерение температуры не представляет большой сложности. Однако локальное измерение температуры предполагает использование одиночной частицы, свойства которой могут сильно отличаться от средних по ансамблю. Такая особенность является серьёзным препятствием для калибровки, что затрудняет развитие технологии создания одиночных термосенсоров.

Поэтому задача разработки методов и алгоритмов работы с отдельными апконверсионными частицами представляется важной. Для этих целей в работе использовались методы сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). За более чем 40 лет с момента открытия зондовые методы хорошо зарекомендовали себя не только как уникальное средство визуализации объектов на поверхности (вплоть до атомарного разрешения), но и как средство прецизионного манипулирования [6–8].

Приготовление образцов и методы исследования

В качестве объектов исследования выступали частицы размерами $0.3 \times 2.2\text{ мкм}^2$: монокристаллы NaYF_4 , допированные ионами Yb^{3+} (18%) и Er^{3+} (2%). Частицы проявляли апконверсионные свойства в объёме раствора. Синтез осуществлялся гидротермальным методом [9]. В качестве подложек использовалось предметное стекло размером $20 \times 8\text{ мм}^2$ и толщиной 0.4 мм. Подложки имели несимметричную форму для простоты определения рабочей поверхности. На одной из поверхностей была сформирована система меток из нескольких перпендикулярных пересекающихся царапин (рис. 1). Данные метки хорошо видны при исследовании поверхности разными методами: СЗМ, оптическая микроскопия на просвет, оптическая конфокальная микроскопия (ОКМ), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), что позволяло идентифицировать область, в которой проводились манипуляции с частицами, и гарантированно находить одну и ту же область поверхности при исследованиях разными методами. После нанесения меток-микроцарапин подложки отчищались от механических и органических загрязнений в ацетоне ЧДА в ультразвуковой ванне в течение 10 мин и в растворе “пиранья” (смесь H_2O_2 и H_2SO_4 в соотношении 3:7) в течение 20 мин, а после промывались дистиллированной водой три раза и высушивались. Капля свежеперемешанного в ультразвуковой ванне коллоидного водного раствора апконверсионных частиц объёмом порядка 5 мкл наносилась на поверхность подложки в область пересечения меток-микроцарапин и высушивалась.

СЗМ Solver Bio (NT-MDT, Россия), работающий в режиме атомно-силового микроскопа (АСМ), использовался для манипуляций с апконверсионными частицами, определения их морфологии и переноса на чистую поверхность. СЗМ оборудован оптическим инвертированным микроскопом Биолам П2-1, в который хорошо просматривались метки-микроцарапины подложки (рис. 1). Точность позиционирования АСМ-зонда над нужной областью составляла около 5 мкм. Сканирование поверхности в СЗМ Solver



Рис. 1. Оптическое изображение участка стеклянной подложки с нанесёнными метками-микроцарапинами: две вертикальные метки и одна горизонтальная. Слева в центре тень от кремниевого чипа с балкой и АСМ-зондом на конце балки. Ширина балки 35 мкм. Изображение получено на просвет, вид снизу вверх, подсветка сверху.

Bio реализовано за счёт перемещения зонда, сканирующая головка располагается над образцом. Максимальное латеральное поле сканирования – около 100×100 мкм², максимально возможное перемещение зонда по вертикали порядка 7 мкм. Измерения и манипуляции проводились в воздушной атмосфере при комнатной температуре и влажности. Использовались стандартные кремниевые кантилеверы NSG-01 (НТ-МДТ, Россия) с силовой постоянной 5 Н/м (диапазон возможных значений, заявленный производителем: 1.45–15.1 Н/м) и резонансной частотой около 150 кГц (диапазон возможных значений, заявленный производителем: 87–230 кГц). Выбор зондов ACM был обусловлен их универсальностью: в контактном режиме работы они создают достаточное давление на поверхность для перемещения объектов, а в полуконтактном используются для визуализации формы и размера частиц, не меняя их расположения. Таким образом, одним и тем же зондом ACM без смены юстировки можно осуществлять полный цикл манипуляции и контроля.

Основными компонентами оптического конфокального микроскопа являются пинхолы (pinholes), объективы, детекторы светового излучения, сканирующие зеркала, делительные пластины, настроенные на длины волн возбуждающего лазера и люминесцентного сигнала [10, 11]. В нашем случае для возбуждения сигнала использовался диодный лазер, $\lambda = 980$ нм. Фокусировка излучения на объект и сбор излучения с объекта осуществлялись с помощью 40-кратного объектива. Латеральное разрешение микроскопа составляло 1 мкм. Максимальная площадь сканируемой поверхности составляла 6×6 мм². Регистрация излучения происходила в режиме счёта фотонов. Сканирование проводилось лазерным лучом с системой позиционирования на основе гальванометрического сканера. В результате собирался массив данных, представляющий собой зависимость интенсивности люминесценции от координат фокального пятна. Спектр люминесценции соответствовал линиям излучения ионов Er^{3+} .

Изолирование одиночных апконверсионных частиц на поверхности

Подложка с высушенными апконверсионными частицами помещалась на предметный столик ACM Solver Bio и в оптический микроскоп, выбиралось подходящее место, отвечающее ряду критериев: место для манипулирования должно быть вблизи области пересечения меток-царапин подложки (расстояние до метки не более чем 100 мкм); визуально в области сканирования не должно наблюдаться объектов большого размера. Далее регистрировалось ACM-изображение поверхности в полуконтактном режиме с латеральным полем сканирования, близким к максимально доступному в приборе (100×100 мкм² или немного меньше). При этом всегда наблюдалось хаотичное распределение разных объектов по поверхности (рис. 2а). За счёт того, что частицы NaYF_4 имели вытянутую форму и огранку, они легко идентифицировались на поверхности. В зависи-

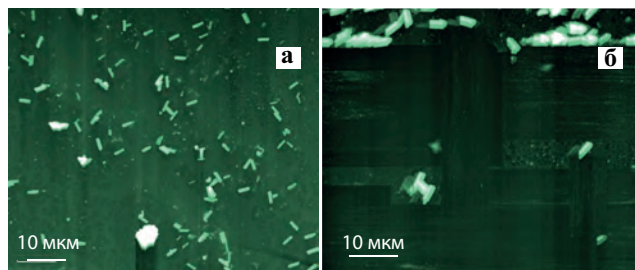


Рис. 2. а АСМ-изображение участка поверхности подложки после нанесения на поверхность $\text{NaYF}_4:\text{Yb}$, Er из коллоидного раствора и высушивания; б тот же участок поверхности после расчистки зондом АСМ-микроскопа.

мости от концентрации исходного коллоидного раствора частицы могли находиться как на большом расстоянии друг от друга, так и собираться в агломераты. Также на АСМ-изображении могли наблюдаться структуры, предположительно состоящие из остатков продуктов синтеза. Важно отметить, что на данном этапе, несмотря на ярко выраженную анизотропную форму фторидных частиц, не было однозначного соответствия между топографией объектов на поверхности и их люминесцентными свойствами.

Полученные на предыдущем этапе полуконтактные АСМ-изображения анализировались, на поверхности выбиралось несколько (как правило, от 1 до 5) наиболее интересных для дальнейших исследований объектов. Для того, чтобы на последующих этапах исследования апконверсионный люминесцентный сигнал регистрировался только от одного из объектов, на поверхности необходимо было выбирать частицы (или группы частиц), расстояние между которыми значительно превышает разрешающую способность оптического конфокального микроскопа. Для расчистки от всех остальных частиц и остатков раствора АСМ переводился в контактный режим работы. Внутри исследуемой области поверхности выбиралось такое поле сканирования (меньшей площадью) и задавалось такое направление сканирования, которое позволяло оттеснить все ненужные объекты внутри этой области к краю. Обычно использовались прямоугольные области сканирования размером в несколько десятков микрон. Скорость сканирования для области размером 20×10 мкм² составляла около 0.8 строк/с. Сила давления зонда на поверхность составляла 0.2–0.7 мкН. После сканирования в контактном режиме АСМ вновь переводился в полуконтактный режим и сканировалась область чуть больше расчищенной для проверки качества очистки. Если из данной области не были убраны все лишние объекты, то процедура повторялась. Если цель была достигнута, то выбиралась следующая область в пределах максимального поля сканирования, и описанная выше последовательность действий повторялась. Таким образом, на области размером около 80×80 мкм² (что немного меньше максимального поля сканирования АСМ) оставалось несколько частиц (рис. 2б), которые можно было исследовать дальше методами ОКМ. Каждая из оставшихся в области исследования частиц (или небольших скоплений частиц) была просканирована с большим

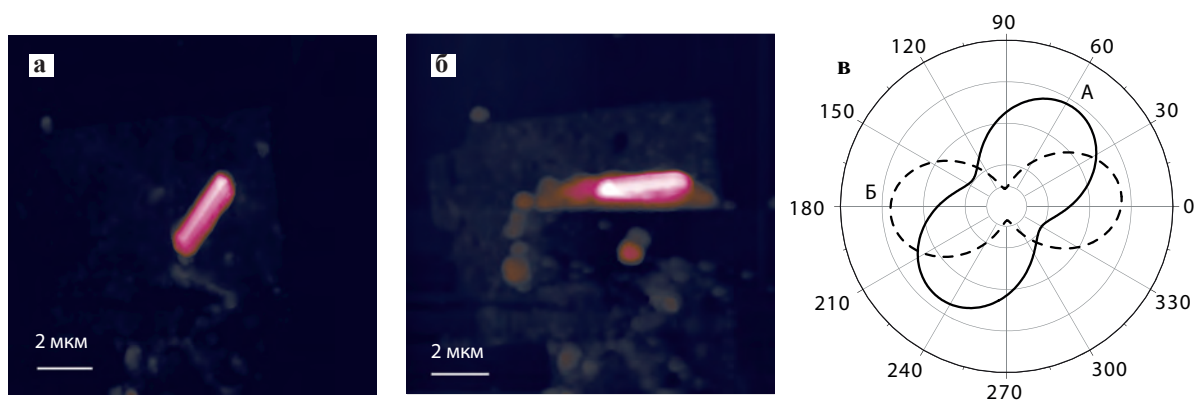


Рис. 3. Два АСМ-изображения одной и той же апконверсионной частицы до (а) и после (б) поворота на угол примерно 55° в АСМ. в Угловая зависимость апконверсионного люминесцентного отклика в зависимости от угла падения излучения линейно поляризованной накачки, А: сплошная кривая для частицы до поворота (а), Б: пунктирная кривая для частицы после поворота в АСМ (б).

увеличением для того, чтобы можно было определить её размеры, форму и ориентацию относительно подложки и меток. Такое сканирование обычно выполнялась новым зондом, для того чтобы минимизировать приборные искажения.

Благодаря меткам на подложке было реализовано многократное позиционирование над одной и той же областью с точностью менее 1 мкм. Были выполнены эксперименты по последовательному повороту отдельной апконверсионной частицы, чередуя поворот с получением спектров люминесценции и конфокальных изображений. На рис. 3а показано АСМ-изображение отдельно лежащей апконверсионной частицы после расчистки. Образец затем исследовался в оптическом конфокальном микроскопе, и после этого, благодаря меткам, АСМ-зонд позиционировался в ту же самую область поверхности и та же самая частица была повернута на угол $50^\circ (\pm 5^\circ)$ относительно начального положения (рис. 3б). Хорошо видно, что ряд морфологических особенностей подложки остался неизменным. От частицы, представленной на рис. 3а и б, был получен апконверсионный люминесцентный отклик при разной ориентации на подложке. Накачка была линейно поляризована, вращался азимутальный угол и регистрировался апконверсионный люминесцентный отклик в зависимости от угла падения. Результаты для двух ориентаций частицы показаны на рис. 3в. Видно, что отклик одноосный анизотропный, ось совпадает с длинной стороной частицы.

Импринтинг

Используя тот же атомно-силовой микроскоп, была реализована задача контролируемого нанесения небольших агломератов апконверсионных частиц на макроскопически чистую подложку. Для этого было использовано две подложки: “подложка-донор”, на которую был осаждён и высушен в воздушной атмосфере коллоидный раствор апконверсионных частиц, и чистая подложка. Обе под-

ложки имели систему меток-царапин. Предметный столик Solver Bio имеет латеральный запас хода в несколько сантиметров, поэтому обе подложки могли одновременно размещаться в приборе. С помощью оптического микроскопа визуально идентифицировалась область подложки-донора с пересечением меток и оценивалась степень заполнения участка частицами. Основываясь на алгоритме расчистки поверхности, описанном в предыдущей части, зонд АСМ подводился к поверхности в полуконтактном режиме, проводилось сканирование поверхности достаточно большой площади (порядка $90 \times 90 \text{ мкм}^2$) и проверялось наличие в этой области апконверсионных частиц. Параллельно, во время сканирования, перемещение зонда и поведение плёнки в области взаимодействия зонда с поверхностью наблюдались с помощью оптического микроскопа. Далее прибор переводился в контактный режим (когда зонд не испытывает вынужденных колебаний, обратная связь работает по отклонению балки кантилевера от положения равновесия). Сила давления зонда на поверхность возрастала на порядок. В этом режиме запускался процесс сканирования достаточно большой области (квадрат с размером стороны 80–90 мкм). В оптический микроскоп при этом наблюдалось утончение плёнки в просканированных участках, предположительно из-за “соскребания” остатков раствора и апконверсионных частиц с поверхности. Часть материала с подложки выдавливалась к краю поля сканирования, другая часть прилипала к балке и зонду, что наблюдалось визуально в оптический микроскоп (рис. 4).

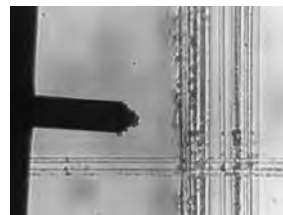


Рис. 4. Оптическое изображение балки с налипшими частицами после сканирования подложки-донора в контактном режиме.

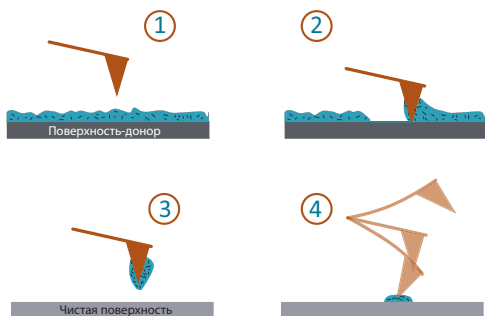


Рис. 5. Схема осаждения конгломератов из апконверсионных частиц на чистую подложку.

Далее зонд АСМ отводился от поверхности на значительное расстояние (миллиметр или более) при помощи механической системы подвода-отвода. Предметный столик перемещал под зонд чистую подложку и зонд с налипшими частицами подводился в контактный режим (без вынужденных колебаний балки) в область пересечения меток-царапин, в оптический микроскоп АСМ выбиралось желаемое место для осаждения. Прибор переводился в полуконтактный режим (то есть зонд начинал совершать вынужденные колебания), и выполнялась протяжка частоты возбуждающего генератора от 50 кГц до 2 МГц. Собственная частота колебаний зонда составляет около 150 кГц, на возбуждающем генераторе устанавливалось напряжение в 3–5 В (максимально возможное напряжение: 10 В). Во время протяжки по частоте амплитуда колебаний зонда резко возрастала в

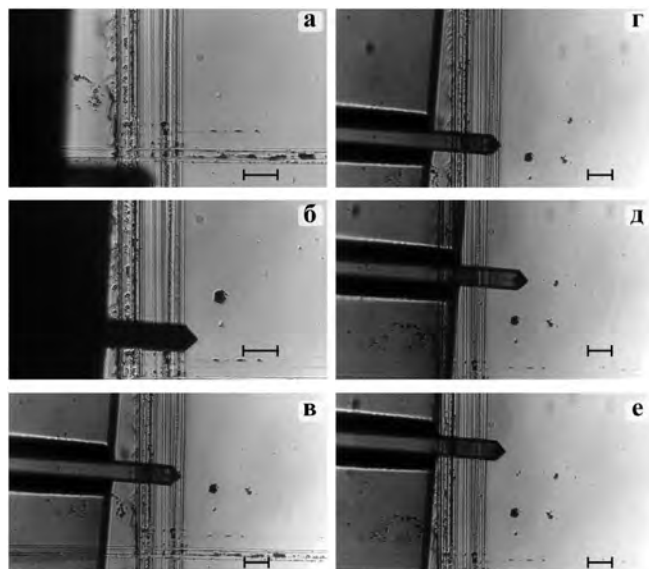


Рис. 6. Последовательность изображений, полученная при помощи оптического микроскопа, иллюстрирующая этапы создания метки в виде агломерата из апконверсионных частиц, расположенных по углам квадрата. а) Область без частиц; б) область с одним агломератом; в) область с двумя агломератами; г) область с тремя агломератами; д) АСМ-зонд находится в позиции для осаждения четвертого агломерата; е) четыре агломерата с частицами размещены по углам квадрата. Вид снизу вверх. Подсветка сверху и сбоку. Размер масштабного отрезка 45 мкм.

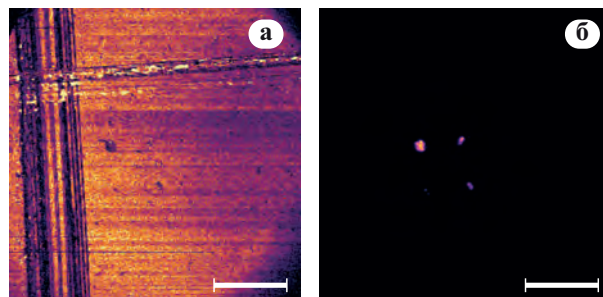


Рис. 7. Изображение, полученное с помощью конфокального микроскопа: а) отраженное от поверхности лазерное излучение; б) апконверсионная люминесценция наночастиц $\text{NaYF}_4:\text{Yb,Er}$. Длина масштабного отрезка 50 мкм.

области резонанса, за счёт чего агломерат частиц стряхивался с зонда и оставался на поверхности подложки в нужном месте. Стадии процесса осаждения схематично показаны на рис. 5.

Описанная выше процедура была повторена четыре раза, при этом каждый раз площадь сканирования подложки-донора уменьшалась в два раза. Этапы изготовления метки в виде агломератов разного размера, осаждённых в углы квадрата, представлены на изображениях с оптического микроскопа на рис. 6. От этой же группы агломератов в оптическом конфокальном микроскопе были зарегистрированы спектры апконверсионной люминесценции (рис. 7а) и построена карта распределения интенсивности апконверсионной люминесценции на поверхности (рис. 7б). Результаты показывают, что оптическое конфокальное изображение повторяет морфологию меток, зарегистрированную при осаждении, а интенсивность люминесцентного сигнала прямо зависит от количества осаждённого в конкретную область материала.

Выводы

Можно заключить, что использование методов сканирующей зондовой микроскопии позволило прецизионно и последовательно, чередуя перемещение и контроль, очищать на поверхности подложки области, сопоставимые по порядку величины с максимальной площадью сканирования прибора ($\sim 100 \times 100$ мкм²), оставляя единичные апконверсионные частицы или небольшие их конгломераты на поверхности. Область перетяжки объектива оптического конфокального микроскопа меньше 1 мкм, что заведомо меньше, чем расстояние между объектами на расчищенном участке. Это гарантировало регистрацию спектров люминесценции от единичных объектов. Использование меток на подложке позволило построить карту расположения объектов исследования и сделать взаимно однозначное соответствие между морфологией поверхности и её оптическими свойствами. Продemonстрировано, что, используя тот же набор методов сканирующей зондовой микроскопии, можно контролируемо осаждать апконверсионные частицы

небольшими группами на макроскопически чистые подложки. Каждый такой агрегат предположительно содержит от нескольких единиц до нескольких десятков частиц. Показано, что агрегаты можно осаждать в виде простых геометрических фигур, например, в узлы квадрата. При помощи оптического конфокального микроскопа было установлено, что области апконверсионной люминесценции однозначно соответствуют скоплениям наночастиц $\text{NaYF}_4:\text{Yb,Er}$.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-29-00516, проект № 23-42-10012 и госзадания ФИЦ КазНЦ РАН.

Литература

1. Deng R., Qin F., Chen R., Huang W., Hong M., Liu X.: *Nat. Nanotechnol.* **10**, 237–242 (2015)
2. Zaldo C.: *Lanthanide-Based Multifunctional Materials*. Netherlands: Elsevier 2018.
3. Tyagi A.K., Ningthoujam R.S.: *Handbook on Synthesis Strategies for Advanced Materials Volume-III: Materials Specific Synthesis Strategies*. Springer 2021.
4. Tanimoto R., Hiraiwa T., Nakai Y., Shindo Y., Oka K., Hiroi N., Funahashi A.: *Sci. Rep.* **6**, 22071 (2016)
5. Xie T.-R., Liu Ch.-F., Kang J.-Sh.: *Biophys. Rep.* **3**, 85 (2017)
6. Darwich S., Mougín K., Rao A., Gnecco E., Sh. Jayaraman, Haidara H.: *Beilstein J. Nanotechnol.* **2**, 85 (2011)
7. Tong L., Zhu T., Liu Zh.: *APL* **92**, 023109 (2008)
8. Korayem M.H., Omid E.: *Micro & Nano Letters* **7**(9), 927 (2012)
9. Ren G., Zeng S., Hao J.: *J. Phys. Chem. C* **115**(41), 20141–20147 (2011)
10. Elliott A.D.: *Current Protocols in Cytometry* **92**(1), e68 (2020)
11. Webb R.H.: *Rep. Prog. Phys.* **59**, 427–471 (1996)

Ионный синтез наночастиц Ag в матрице GaAs

А. Л. Степанов, Д. А. Коновалов, А. М. Рогов, В. Ф. Валеев, В. И. Нуждин

Лаборатория нанооптики и наноплазмоники, лаборатория радиационной физики

Продemonстрирована методика создания плазмонного композиционного материала на основе GaAs, содержащего наночастицы Ag, с помощью ионной имплантации. В качестве демонстрационного примера был представлен новый материал, полученный при использовании следующих технологических условий: облучение тонких слоёв GaAs было проведено ионами Ag^+ с энергией $E = 30$ кэВ при плотности тока в ионном пучке $J = 5$ мкА/см² и дозе $D = 6.2 \cdot 10^{16}$ ион/см². Анализа сформированного образца был выполнен с использованием сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии оптического отражения. Экспериментальные спектры отражения были сопоставлены с данными по оптической экстинкции, рассчитанных в рамках электромагнитной теории Ми. Установлено, что в процессе ионной имплантации в слое GaAs образуются наночастицы Ag размерами от 5 до 40 нм, демонстрирующие эффекты плазмонного резонанса.

Ion synthesis of Ag nanoparticles in GaAs matrix

A. L. Stepanov, D. A. Kononov, A. M. Rogov, V. F. Valeev, V. I. Nuzhdin

Nanooptics and nanoplasmonics laboratory, Laboratory of radiation physics

A technique for creating a plasmonic composite material based on GaAs containing Ag nanoparticles using ion implantation is demonstrated. A novel material obtained is presented as a demonstration example using the following process conditions: thin GaAs layers were irradiated by Ag^+ ions with an energy of $E = 30$ keV at a current density of $J = 5$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ and a dose of $D = 6.2 \cdot 10^{16}$ ion/cm². The formed sample was analyzed using scanning electron microscopy and optical reflectance spectroscopy. The experimental reflectance spectra were compared with optical extinction data which were calculated within the electromagnetic Mie theory. It was found that during ion implantation, Ag nanoparticles with sizes from 5 to 40 nm demonstrating the effects of plasmon resonance were synthesized in the GaAs layer.

Введение

При проектировании различных электронных и опто-электронных устройств, как правило, в качестве основных материалов рассматриваются слои непрямозонных полупроводников Si и Ge [1]. При этом интерес вызывают и другие матрицы, например, GaAs. Слои на основе GaAs активно используются в солнечных элементах благодаря прямой структуре запрещённой зоны, ширина которой 1.43 эВ находится в пределах оптимального диапазона, требуемого для эффективного преобразования световой энергии в электрическую [2]. GaAs характеризуется большим коэффициентом оптического поглощения, высокой стойкостью к радиации и малым коэффициентом температурного расширения, поэтому особенно подходит для изготовления высокоэффективных космических солнечных батарей [3]. Однако GaAs имеет малую механическую прочность и хрупок, поэтому его обычно формуют в тонкие плёнки для покрытия различных подложек. Вследствие относительно большого показателя преломления $n \sim 3.5$, рабочая поверхность фотоэлементов GaAs отражает су-

щественную часть падающего солнечного излучения во всём рабочем интервале спектра. Поэтому для данных устройств требуются эффективные антиотражающие оптические покрытия [4].

Слои GaAs используются как в однослойных солнечных элементах, так и в многослойных структурах таких, например, как InGaP/GaAs, InGaP/InGaAs/Ge и др. [5]. В данном контексте, исследуются наноструктурированные и пористые слои Ge, которые могут быть использованы в качестве антиотражающих оптических покрытий, а также в виде буферного слоя для тонких плёнок GaAs в многослойных структурах, поскольку кристаллические параметры решёток GaAs ($a = 5.965 \text{ \AA}$) и Ge ($a = 5.657 \text{ \AA}$) близки друг к другу [6].

В настоящее время проводятся поисковые исследования по повышению коэффициента полезного действия (КПД) солнечных элементов, и одним из вариантов является внедрение в слои, из которых состоят солнечные батареи, металлических наночастиц, проявляющих эффекты резонансного плазмонного поглощения [5]. В частности, поисковые работы направлены на создание элементов

солнечных батарей с высоким КПД на основе GaAs с плазмонными наночастицами Au, Ag и Al [7–9]. Было показано, что комбинирование таких наночастиц с GaAs приводит к увеличению интегрального оптического поглощения композиционных материалов за счёт плазмонных эффектов – коллективно осциллирующих электронов в металле, к повышению фотопроводимости, а также проявлению антиотражающих и светорассеивающих свойств.

Помимо приложения для солнечной энергетики, электроды GaAs с осаждёнными на них наночастицами Ag могут быть использованы в качестве катализаторов для разложения метилоранжевого красителя в растворах под действием ультрафиолетового и видимого излучения [10]. Подложки Au:GaAs и Ag:GaAs с контактами Шоттки на них рассматриваются в качестве сенсоров полярных газов CO и NO [11]. Слои GaAs с островковыми нанодантеннами Au на поверхности оказываются эффективными структурами для применения в качестве низкотемпературных фотопроводящих детекторов терагерцового диапазона [12].

Для создания композиционных материалов GaAs с плазмонными металлическими наночастицами были применены различные технологии, такие, например, как синтез наночастиц в растворе, которые наносятся впоследствии центрифугированием на поверхность подложек GaAs [7], электрохимическое осаждение наночастиц в растворе [10], испарение в вакууме или высокочастотное распыление металлических мишеней [12].

В настоящей работе для получения тонкого слоя GaAs с наночастицами Ag предлагается использовать метод низкоэнергетической высокодозовой имплантации ионов металлов, как это ранее было успешно реализовано для ионного синтеза металлических наночастиц в полупроводниковых подложках Si и Ge [1].

Методика эксперимента

В качестве подложек для ионной имплантации использовались гладкие монокристаллические слои GaAs толщиной

0.8 мкм, сформированные методом магнетронного осаждения на кристаллических подложках InGaP по методике, описанной в работе [13], с последующим термическим отжигом в течении 30 мин при температуре 300 °С. Имплантация проводилась в вакууме 10^{-5} мм. рт. ст. ионами Ag^+ с энергией $E = 30$ кэВ, дозой $D = 6.2 \cdot 10^{16}$ ион/см² при плотности тока в ионном пучке $J = 5$ мкА/см² на ионном ускорителе ИЛУ-3 при комнатной температуре облучаемой подложки. Для наблюдения морфологии поверхности образца был использован сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Merlin (Carl Zeiss) при ускоряющем напряжении 5 кВ и плотности тока 300 пА. Зеркальные спектры оптического отражения образцов в диапазоне 230–1050 нм были измерены на волноводном спектрометре AvaSpec-2048 (Avantes).

Результаты и обсуждения

Для моделирования профилей распределения имплантируемых ионов по глубине образца GaAs для Ag^+ с энергией $E = 30$ кэВ была использована компьютерная программа DYNA. Физические принципы расчёта, заложенные в неё, подробно обсуждаются в работе [14]. Данная программа основана на эффектах парных столкновений ускоренных ионов с атомами облучаемой матрицы, которые приводят к динамическому по времени облучения изменению фазового состава имплантированного слоя подложки, одновременно с учётом его изменения вследствие поверхностного распыления. Расчёты показывают, что имплантированные ионы Ag^+ залегают в GaAs по гауссовой статистической кривой с максимумом на глубине $R_p \sim 14.6$ нм и разбросом $\Delta R_p \sim 6.9$ нм. Толщина приповерхностного легированного слоя с учётом распыления поверхности при имплантации по оценке $h = R_p + 2\Delta R_p$ составляет порядка 30 нм.

На рис. 1 приведены СЭМ-изображения поверхностей исходного слоя GaAs и образца Ag:GaAs. До проведения ионной имплантации поверхность полупроводника выглядит гладкой, без каких-либо морфологических образований

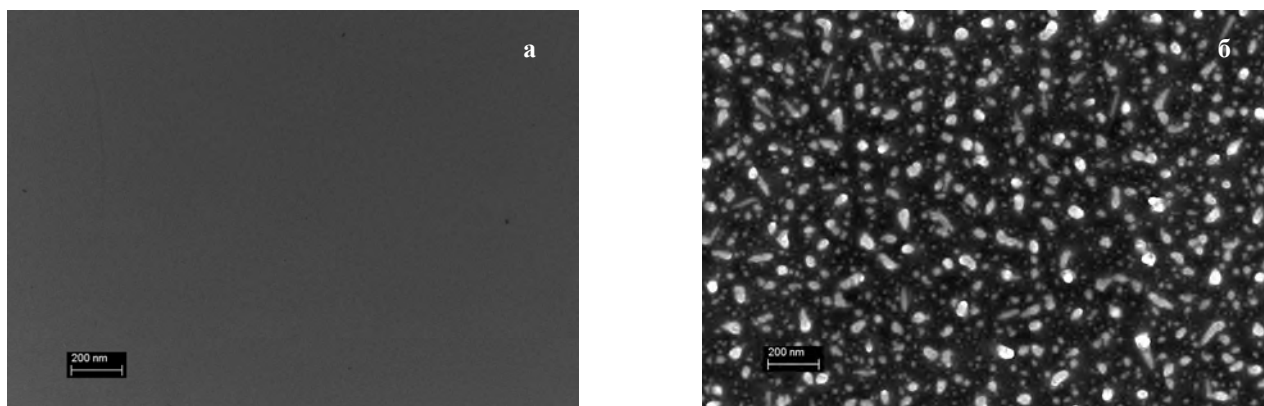


Рис. 1. СЭМ-изображение сформированной поверхности GaAs до (а) и после имплантации ионами Ag^+ при $E=30$ кэВ, $J = 5$ мкА/см² и $D = 6.2 \cdot 10^{16}$ ион/см² (б).

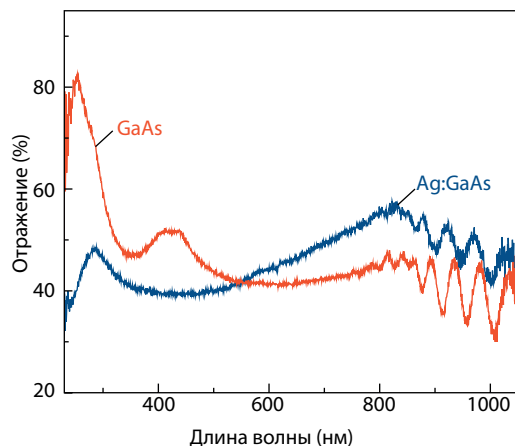


Рис. 2. Спектры оптического отражения исходной подложки GaAs и имплантированной поверхности образца Ag:GaAs.

(рис. 1а). Облучение ионами Ag^+ приводит к формированию металлических наночастиц с размерами примерно от 5 до 40 нм, наблюдаемых на СЭМ-изображении в виде однородно распределённых по поверхности светлых пятен на фоне тёмного фона от GaAs (рис. 1б) аналогично имплантации ионов металлов в матрицы Si и Ge [1]. Формирования пор на поверхности облучённого GaAs, как это происходит в случае ионов Si^+ и Ge^+ [15], при имплантации ионов Ag^+ не наблюдается.

Спектры оптического отражения исходного слоя GaAs и образца Ag:GaAs, сформированного ионной имплантацией, представлены на рис. 2. Отражение прямозонного полупроводника GaAs характеризуется полосами с максимумами в области 242.2 (5.12 эВ), 295 (4.2 эВ), 427.6 (2.9 эВ), 539 (2.3 эВ) и 918.5 (1.35 эВ) нм, определяемыми внутризонным и межзонным электронными переходами [16]. По интенсивности полос в коротковолновой области спектра определяется степень кристалличности GaAs. После облучения ионами Ag^+ наблюдается исчезновение данных полос отражения, что указывает на аморфизацию имплантированного слоя. Подобное интегральное уменьшение отражения при аморфизации поверхности различных полупроводников было показано в работе [1]. На длинноволновом участке спектра отражения образцов GaAs и Ag:GaAs наблюдаются интерференционные полосы, возникающие вследствие проникновения оптического излучения через осаждённую плёнку GaAs и отражения от подложки.

Как видно из рис. 2, после ионной имплантации дополнительно зарегистрировано появление широкой полосы отражения с максимумом в области 800 нм. Очевидно, данную полосу следует связывать с образованием в Ag:GaAs наночастиц Ag и проявлением в них плазмонного резонанса. Для проверки данной гипотезы плазменные спектры экстинкции наночастиц Ag, помещённых в матрицу GaAs, были смоделированы, используя электромагнитную теорию Ми [17]. Для моделирования спектров экстинкции в видимом диапазоне использовались

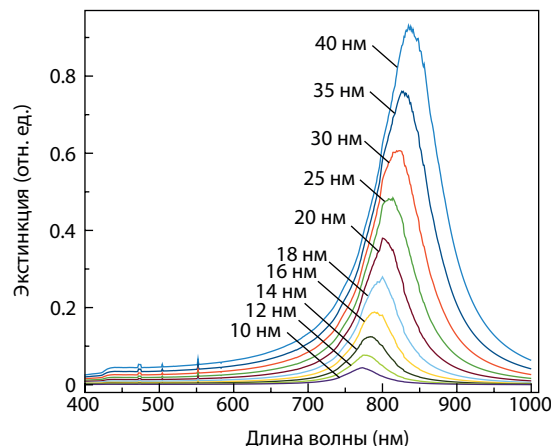


Рис. 3. Расчётные спектры экстинкции наночастиц Ag различных размеров в GaAs.

спектральные значения диэлектрических проницаемостей для наночастиц Ag и среды GaAs из работы [18].

На рис. 3 приведены спектры экстинкции Ми-резонансов для наночастиц Ag различных размеров от 10 до 40 нм. Диапазон данных размеров был выбран в соответствии с размерами наночастиц, наблюдаемых на СЭМ-изображении (рис. 1б). Как видно из расчётных спектров, металлическим наночастицам соответствуют плазменные полосы экстинкции с максимумами, расположенными в спектральном диапазоне от 750 до 850 нм. Спектральное положение данных полос оказывается в хорошем качественном согласии с экспериментальным спектром отражения для слоя Ag:GaAs, приведённым на рис. 2. Отметим, что расчётные спектры экстинкции для наночастиц Ag, смоделированные по теории Ми, по своему спектральному положению также подтверждаются расчётами для подобной структуры по теории эффективной среды Максвелла-Гарнетта [19].

Заключение

В настоящей работе показано, что методом низкоэнергетической высокодозовой имплантации ионами Ag^+ подложки GaAs впервые сформирован композиционный материал Ag:GaAs. Методами электронной микроскопии и оптической спектроскопии установлено образование наночастиц Ag в слое GaAs. Моделированием спектров плазменного резонанса по теории Ми подтверждается присутствие в Ag:GaAs ионно-синтезированных наночастиц Ag. Продemonстрировано, что вакуумная чистая технология ионной имплантации может быть использована для получения тонкослойного композиционного материала GaAs с наночастицами Ag, который может рассматриваться кандидатом для создания солнечных элементов и фотоприёмников на основе GaAs.

Работа проводилась в рамках выполнения госзадания ФИЦ КазНЦ РАН.

Литература

1. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Рогов А.М., Воробьев В.В.: Формирование слоёв пористого кремния и германия с металлическими наночастицами, Казань: ФИЦПРЕСС 2019.
2. Ji C., Liu W., Bao Y., Chen X., Yang G., Wei B., Yang F., Wang X.: *Photonics* **9**, 906 (2022)
3. Chaudhry F.A., Escandell L., Lopez-Fraguas E., Vergaz R., Sanchez-Pena J.M., Garcia-Camara B.: *Sci. Report* **12**, 9240 (2022)
4. Cai J., Qi L.: *Mater. Horizons* **2**, 37 (2015)
5. Shanmugam N., Pugazhendhi R., Elavarasan R.M., Kasiviswanathan P., Das N.: *Energies* **13**, 2631 (2020)
6. Akl A.A., Howari H.: *J. Phys. Chem. Solids* **70**, 1337 (2009)
7. Jangjy A., Bahador H., Heidarzadeh H.: *Plasmonics* **16**, 395 (2021)
8. Wei B., Mao X., Liu W., Ji C., Yang G., Bao Y., Chen X., Yang F., Wang X.: *Plasmonics* **18**, 2009 (2023)
9. Berkovits V.L., Kosobukin V.A., Ulin V.P., Alekseev P.A., Soldatenkov F.Y., Nashchekin A.V., Khakhulin S.A., Komkov O.S.: *Surf. Sci.* **742**, 122437 (2024)
10. Xu Y., Qian Y.-S., Qiao J.-L., Huang D.-Y., Huang D.-Y., Cui S.-B.: *Int. J. Electrochem. Sci.* **17**, 22024 (2022)
12. Salehi A., Kalantari D.J.: *Sensors Actuators B* **122**, 69 (2007)
13. Murakami H., Takarada T., Tonouchi M.: *Chinese Laser Press* **8**, 1448 (2020)
14. Klimovich I.M., Stepanov A.L.: *Optoelectr. Adv. Mater. Rapid Comm.* **17**, 165 (2023)
15. Stepanov A.L., Zhikharev V.A., Hole D.E., Townsend P.D., Khaibulin I.B.: *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **166–167**, 26 (2000)
16. Hernandez A., Kudriavtsev Y., Salinas-Fuentes C., Hernandez-Gutierrez C., Salinas-Fuentes C.: *Vacuum* **171**, 108976 (2020)
17. Тайц Я.: *УФН* **94**, 501 (1968)
18. Bohren C.F., Huffman D.R.: *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. N.Y.: Wiley 1983.
19. Palik E.D.: *Handbook of Optical Constants of Solids*, N.Y.: Acad. Press 1985.
20. Nolte D.D.: *J. Appl. Phys.* **76**, 3740 (1994)

Лазерный нагрев и кристаллизация нанопористых слоёв германия, сформированных имплантацией ионами серебра, возникающих при возбуждении комбинационного рассеяния

А. Л. Степанов, Д. А. Коновалов, А. М. Рогов, В. Ф. Валеев, В. И. Нуждин,
А. В. Павликов¹, А. М. Шарафутдинова²

Лаборатория нанооптики и наноплазмоники, лаборатория радиационной физики

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Зеленоград, Россия

Способом имплантации низкоэнергетических (30 кэВ) ионов Ag^+ в кристаллическую подложку $c\text{-Ge}$ при различных дозах облучения $7.4 \cdot 10^{16} - 1.3 \cdot 10^{17}$ ион/см² сформированы тонкие аморфные нанопористые слои PGe, состоящие из нанонитей. С ростом дозы наблюдается увеличение среднего значения диаметров нанонитей от 29 до 36 нм. Полученные слои PGe были изучены методом рамановской спектроскопии с использованием возбуждающих He-Ne и Ag-лазеров, излучающих соответственно на длинах волн 633 и 488 нм. Показано, что зондирующее лазерное воздействие на имплантированные аморфные слои приводит к их локальному нагреву и частичной кристаллизации. Установлены пороги кристаллизации для интенсивностей, которые составили 3 кВт/см² для He-Ne-лазера и 1 кВт/см² для Ag-лазера. Обсуждается связь значений порогов кристаллизации с глубиной проникновения света в Ge на разных длинах волн. Определена доля кристаллического объёма в имплантированных слоях, которая достигла максимального значения 6–7% при наиболее интенсивном лазерном воздействии.

Laser heating and crystallization of nanoporous germanium layers formed by silver ion implantation, arising from excitation of Raman scattering

A. L. Stepanov, D. A. Kononov, A. M. Rogov, V. F. Valeev, V. I. Nuzhdin, A. V. Pavlikov¹, A. M. Sharafutdinova²

Nanooptics and nanoplasmonics laboratory, Laboratory of radiation physics

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² National Research University of Technology MIET, Zelenograd, Russia

Thin amorphous nanoporous PGe layers consisting of nanowires were formed by low-energy (30 keV) implantation with Ag^+ ions into a crystalline $c\text{-Ge}$ substrate at different irradiation doses of $7.4 \cdot 10^{16} - 1.3 \cdot 10^{17}$ ion/cm². With increasing dose, the rise in the average value of the nanowire diameters from 29 to 36 nm was observed. The obtained PGe layers were studied by the Raman spectroscopy using exciting He-Ne and Ag lasers emitting at wavelengths of 633 and 488 nm respectively. It was shown that laser interaction with the implanted amorphous layers leads to their local heating and partial crystallization. The crystallization thresholds were established, which amounted to 3 kW/cm² for the He-Ne laser and 1 kW/cm² for the Ag laser. The relationship between the crystallization threshold values and the light penetration depth in Ge at different wavelengths is discussed. The fraction of crystalline volume in implanted layers is determined, which reached a maximum value of 6–7% at the most intense laser exposure.

Введение

Наноструктурированные полупроводниковые материалы, состоящие из нанонитей, представляются перспективными для применения в различных оптоэлектронных устройствах, таких как элементы солнечных батарей [1], термоэлектрические приёмники [2, 3] и др. Они могут использоваться для изготовления полевых транзисторов с контактами истока/стока Шоттки [4], а также служить биосовместимыми люминесцентными маркерами и сенсификаторами для радиочастотной терапии [5].

Солнечные элементы, изготовленные непосредственно из кристаллического Si, занимают в настоящее время большую часть коммерческих приложений, тогда как кристаллический Ge ($c\text{-Ge}$) используется в основном в многословных устройствах [6, 7]. Высокие коэффициент поглощения и показатель преломления Ge привлекают внимание к данному материалу для изготовления на его основе нанопористых слоёв Ge (PGe), состоящих из нанонитей, с целью манипулирования оптическими свойствами [8]. В частности, слои PGe могут быть использованы в качестве антиотражающих оптических покрытий

для различных фотоприёмников, функционирующих в широких спектральных диапазонах [9, 10]. Также плёнки из PGe демонстрируют уникальные электрохимические характеристики для применения в качестве анодов в литий-ионных аккумуляторах с высокой удельной ёмкостью [11, 12].

Метод имплантации полупроводниковых мишеней различными ионами обеспечивает формирование нанопористых слоёв на поверхности облучаемых матриц [8]. Такой подход позволяет изготавливать легированные аморфные слои толщиной от нанометров до нескольких микрон, которые могут быть контролируемо рекристаллизованы при термическом отжиге [13], облучением высокоэнергетическим ионным пучком [14] или при лазерными воздействиями. Лазерный отжиг тонких полупроводниковых слоёв был описан ранее в ряде работ, например, [15–17], при этом данные эксперименты были проведены с использованием сверхмощных лазерных пучков, приводящих к полному переплавлению обрабатываемых материалов.

Настоящая работа посвящена исследованию с помощью рамановской спектроскопии тонких слоёв PGe, сформированных имплантацией ионов Ag^+ в $c\text{-Ge}$, а также термическим модификациям имплантированных слоёв, возникающим при относительно малоинтенсивном лазерном облучении, достаточном для возбуждения рамановского сигнала. Ранее было показано, что рамановская спектроскопия позволяет определять объёмную долю кристаллической фазы в различных полупроводниках, состоящих из нанонитей [18, 19], обнаруживать механические напряжения [20, 21], наличие локализованных колебаний, а также позволяет оценивать концентрацию свободных носителей заряда для сильнолегированных полупроводников [22–24]. Однако конкретно слои PGe, состоящие из нанонитей, методом рамановской спектроскопии практически не изучались.

Методика эксперимента

В работе в качестве подложек для ионной имплантации использовались гладкие полированные пластины $c\text{-Ge}$ марки ГДГ-45 толщиной 0.5 мм с кристаллографической ориентацией (111). Имплантация проводилась ионами Ag^+ с энергией $E = 30$ кэВ, плотностью тока в ионном пучке $J = 5$ мкА/см² при дозах $D = 7.4 \cdot 10^{16}$, $1.0 \cdot 10^{17}$ и $1.3 \cdot 10^{17}$ ион/см² на ионном ускорителе ИЛУ-3 при комнатной температуре облучаемой подложки. Для наблюдения морфологии поверхности образцов был использован сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Merlin (Carl Zeiss), функционирующий при ускоряющем напряжении 5 кВ и плотности тока 300 пА.

С помощью программы SRIM-2013 (www.srim.org) были рассчитаны профили распределения имплантированных ионов Ag^+ в Ge для различных энергий. Моделирование показывает, что имплантированные ионы Ag^+ накапливаются вблизи поверхности подложки Ge с

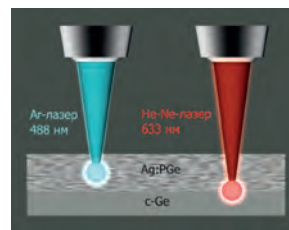


Рис. 1. Схематическое изображение, демонстрирующее проникновение лазерных лучей различных длин волн в приповерхностный слой образца Ag:PGe.

максимальным статистическим гауссовым распределением по глубине образца с максимальной концентрацией при $R_p \sim 14.6$ нм и разбросом $\Delta R_p \sim 6.9$ нм. Таким образом, толщина имплантированного слоя оценивается как $h_{\text{Impl}} = R_p + 2\Delta R_p \sim 30$ нм.

Спектры рамановского обратного рассеяния были измерены при возбуждении сфокусированным лазерным излучением на микрорамановском спектрометре LabRAM HR800 (Horiba). Эксперименты проводились с использованием He-Ne и Ar-лазеров, излучающих на длинах волн 633 и 488 нм с максимальной мощностью до 6 мВт и минимальным диаметром пятна на образце 14 мкм. Интенсивность лазерного излучения ослаблялась фильтрами с различной оптической плотностью. Время измерения одного спектра составляло порядка 5 с, а количество накоплений выбиралось 5 раз. Цикл измерения увеличения и уменьшения интенсивности лазерного излучения I_{Laser} проводился для одной и той же позиции лазерного пятна на поверхности образца. Схематическое изображение образца Ag:PGe в поперечном сечении с падающим на него различных лазерных пучков с соответствующими длинами волн приведено на рис. 1.

Результаты и обсуждения

Ионная имплантация подложек $c\text{-Ge}$ ионами Ag^+ в выбранном диапазоне D приводит к формированию PGe губчатой структуры, состоящей из переплетающихся нанонитей [8]. СЭМ-изображения поверхности образцов для различных D представлены на рис. 2а–в. Гистограммы распределений диаметров нанонитей по размеру диаметров d также приведены на соответствующих вставках к рис. 2а–в. Распределение d аппроксимировано с помощью гауссовой кривой, из которых определены средние значения d . Таким образом установлено, что с ростом D средние значения d увеличиваются и составляют величины $d = 29, 34$ и 36 нм.

На рис. 3 в качестве примера приведены спектры рамановского рассеяния света, возбуждаемых He-Ne лазером для образца Ag:PGe, сформированного при наименьшей $D = 7.4 \cdot 10^{16}$ ион/см². Измерения спектров проводились начиная с наименьшего значения $I_{\text{Laser}} = 300$ Вт/см² и последовательно до $I_{\text{Laser}} = 1000, 1500$ и 3000 Вт/см², с последующим понижением I_{Laser} в обратном порядке, как

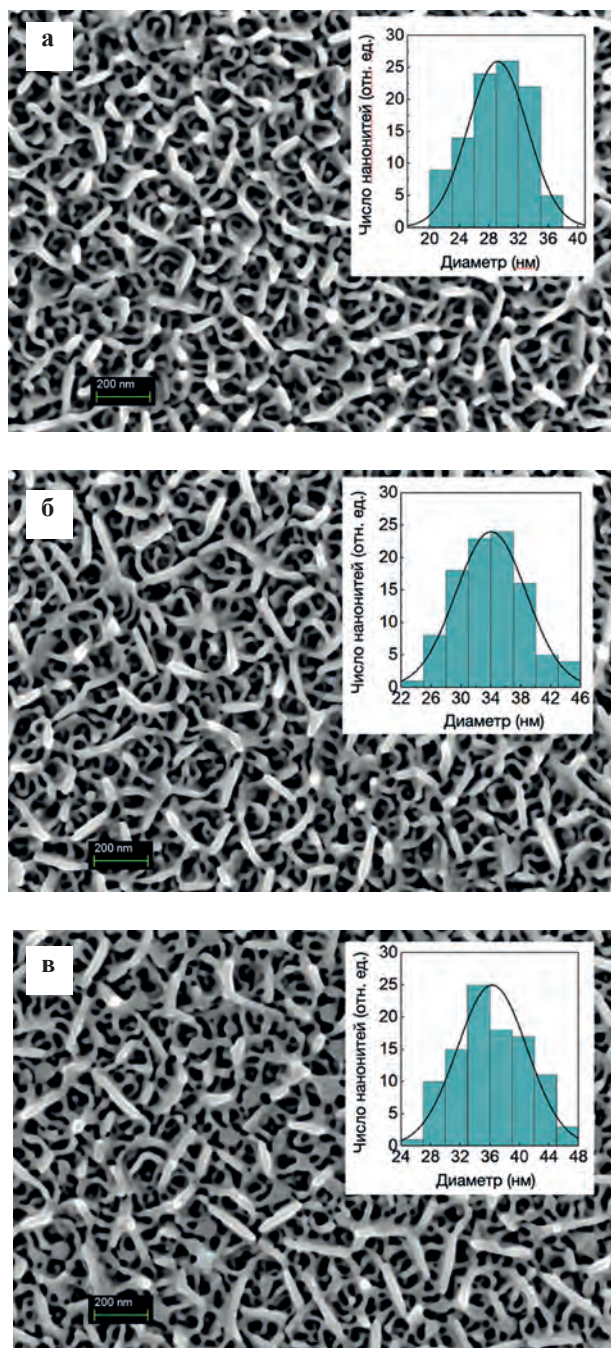


Рис. 2. СЭМ-изображение поверхности *c*-Ge, имплантированной ионами Ag^+ при $E = 30$ кэВ, $J = 5$ мкА/см² и $D = 7.4 \cdot 10^{16}$ (а), $1.0 \cdot 10^{17}$ (б) и $1.3 \cdot 10^{17}$ (в) ион/см². На вставках приведены гистограммы распределения d нанонитей Ge по размерам.

это показано цифрами на рис. 3. Все спектры на рис. 3 имеют одну основную широкую полосу с максимумом при 280 см^{-1} , которая связана с рассеянием фотонов на поперечных оптических фононах в аморфном германии (*a*-Ge) [25]. Другие два типичных пика для *a*-Ge, соответствующие рамановскому рассеянию света продольными оптическими (260 см^{-1}) и продольными акустическими (170 см^{-1}) фононами [25], могут быть выделены из экспериментального спектра с помощью процедуры деконво-

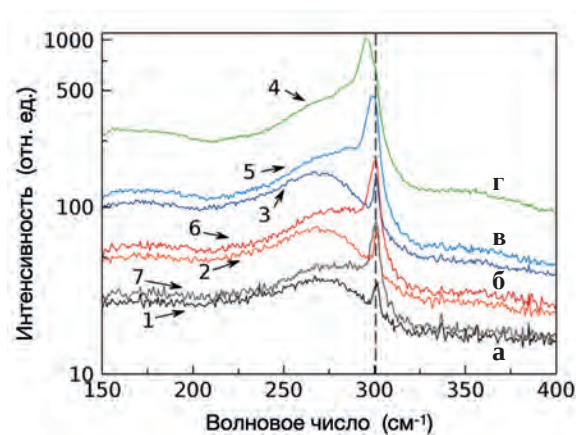


Рис. 3. Рамановские спектры образца Ag:PGe, сформированного имплантацией *c*-Ge ионами Ag^+ при $D = 7.4 \cdot 10^{16}$ ион/см². Интенсивности излучения He-Ne лазера: а 300; б 1000; в 1500 и г 3000 Вт/см². Цифрами указаны спектры в последовательности их измерений.

люции (разложением на гауссовы кривые). Циклические измерения спектров при увеличении и уменьшении I_{Laser} позволяют выявить необратимые изменения, происходящие в структуре PGe, возникаемые при лазерном воздействии во время возбуждения рамановских спектров. Как видно из рис. 3 для начального и конечного спектров (например, спектры 3 и 5), полученных при одной и той же интенсивности, наблюдается расхождение, что указывает на изменение фазового состава в слое PGe.

Рамановский пик при 300 см^{-1} в полученных спектрах соответствует рассеянию фотонов для *c*-Ge [26]. Точное спектральное положение этого пика для экспериментальных спектров (рис. 3, кривые 1 и 7), возбуждаемых при $I_{\text{Laser}} = 300 \text{ Вт/см}^2$, характерно для объёмного *c*-Ge и указывает на вклад от подложки *c*-Ge. Это следует из того, что коэффициент поглощения *a*-Ge на длине волны 633 нм He-Ne лазера составляет величину $\alpha = 2.5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ [27]. Тогда глубина проникновения оптического излучения в Ge составляет $h_{\text{pen}} = 1/\alpha = 40 \text{ нм}$, которая превышает $h_{\text{Impl}} = 30 \text{ нм}$ имплантированного аморфного слоя в образце. При этом I_{Laser} оказывается недостаточно высокой для фазовой модификации тонкого имплантированного слоя PGe. Изменение рамановских спектров при возбуждении He-Ne лазером различной интенсивности для Ag:PGe образцов, сформированных при более высоких $D = 1.0 \cdot 10^{17}$ и $1.3 \cdot 10^{17}$ ион/см², качественно согласуются со спектрами, представленными на рис. 3.

Как следует из проведённой компьютерной деконволюции экспериментальных спектров, при повышении I_{Laser} и достижении порогового значения I_{Crit} появляется дополнительный пик, который можно соотнести с появлением нанокристаллической фазы *nano*-Ge в аморфном слое PGe [28]. Известно, что пик, связанный с *nano*-Ge, располагается в области меньших волновых чисел в диапазоне от 295 до 299 см^{-1} относительно стационарного пика для *c*-Ge. Точное спектральное положение пика для *nano*-Ge зависит от I_{Laser} , тогда как максимум пика для *c*-Ge, связанный с подложкой, остаётся неизменным.

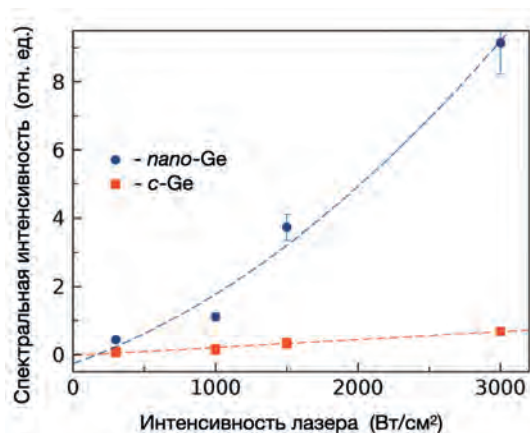


Рис. 4. Зависимость спектральной интенсивности рамановского сигнала I_{Raman} от интенсивности возбуждающего лазера I_{Laser} для долевых фракций *c*-Ge и *nano*-Ge для образца, сформированного при $D = 7.4 \cdot 10^{16}$ ион/см².

Одновременное присутствия этих двух пиков приводит к суперпозиции в экспериментальном спектре, а выделение каждого из них, как было сказано, проводится методом деконволюции. Результатом применения данного подхода является выстроенная зависимость интенсивности рассеянного света I_{Raman} отдельно для подложки *c*-Ge и фазы *nano*-Ge в имплантированном слое от I_{Laser} (рис. 4). Из рисунка видно, что I_{Raman} для подложки *c*-Ge возрастает очень слабо от I_{Laser} и фактически описывается линейным законом. Однако I_{Raman} для *nano*-Ge возрастает с ростом I_{Laser} очень резко по нелинейной зависимости. Резкое возрастание I_{Raman} для *nano*-Ge может объясняться двумя возможными факторами. Первая причина может заключаться в проявлении в наноструктурированном Ge эффекта квантового ограничения. Данный эффект наблюдался экспериментально в рамановских спектрах в химически изготовленных образцах Ge, состоящих из нанонитей с d порядка 6 нм [29]. Однако в настоящем эксперименте в имплантированных слоях PGe значения d нанонитей оказываются заметно больше (29–36 нм, рис. 2), а потому проявление квантового ограничения в таких более крупных структурах затруднительно вследствие низкого вырождения электронных уровней. Вторая причина, приводящая к резкому возрастанию I_{Raman} , заключается в увеличении объёмной доли *nano*-Ge в имплантированном аморфном слое PGe с ростом I_{Laser} . Появление и увеличение доли *nano*-Ge рассматривается вследствие локального нагрева и кристаллизации в слое PGe под воздействием лазерного облучения, как это будет обсуждаться далее.

На рис. 5 приведено СЭМ-изображение имплантированной поверхности PGe, соответствующей $D = 1.0 \cdot 10^{17}$ ион/см², после воздействия He-Ne-лазером при максимальной $I_{\text{Laser}} = 3000$ Вт/см². Место позиционирования центра пятна лазера на поверхности образца для удобства обведено окружностью диаметром 1 мкм, что заметно меньше полного лазерного пятна диаметром 14 мкм. Поэтому можно заключить, что небольшое разрушение имплантированного слоя PGe происходит лишь на незначительном

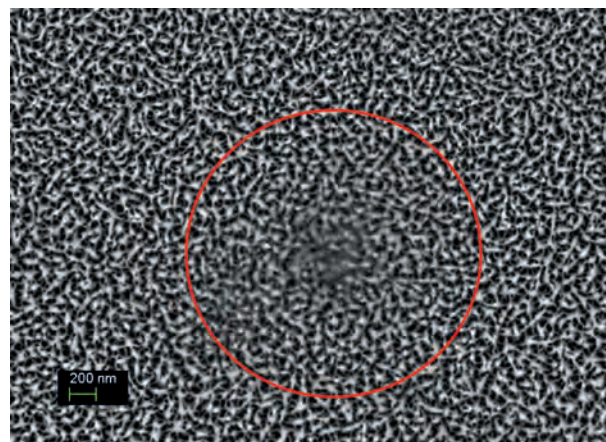


Рис. 5. СЭМ-изображение поверхности *c*-G, имплантированной ионами Ag^+ при $E = 30$ кэВ, $J = 5$ мкА/см², $D = 1.3 \cdot 10^{17}$ ион/см² и подвергнутого воздействию He-Ne лазера при максимальной интенсивности 3000 Вт/см². Круг диаметром 2 мкм очерчивает область вокруг центра лазерного пучка на поверхности образца.

участке диаметром менее 400 нм, который не оказывает значимого вклада в результаты рамановских измерений.

На рис. 6 приведены спектры рамановского рассеяния света, возбуждаемого Ag-лазером для образца Ag:PGe, сформированного при наименьшей $D = 7.4 \cdot 10^{16}$ ион/см². При минимальном значении $I_{\text{Laser}} = 300$ Вт/см² форма спектра (рис. 6, кривая 1) оказывается типичной для структуры *a*-Ge [25]. Увеличение I_{Laser} до 1000 Вт/см² приводит к появлению пика (рис. 6, кривая 2), характеризующего фазой *nano*-Ge [28]. Данное значение $I_{\text{Laser}} = 1000$ Вт/см² соответствует I_{Crit} , при котором наблюдается появление пика, связанного с *nano*-Ge. Отсутствие в экспериментальном спектре пика, возбуждаемого Ag-лазером для подложки *c*-Ge, объясняется малой глубиной проникновения света на длине волны 488 нм в Ge. В данном случае α составляет величину $6.0 \cdot 10^5$ см⁻¹ [27], поэтому $h_{\text{pen}} = 1/\alpha = 20$ нм, то есть меньше $h_{\text{Impl}} \sim 30$ нм. Аналогичные циклы по-

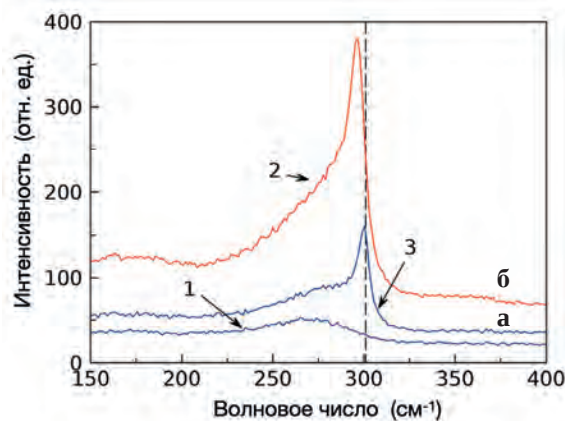


Рис. 6. Рамановские спектры образца Ag:PGe, сформированного имплантацией *c*-Ge ионами Ag^+ при $D = 7.4 \cdot 10^{16}$ ион/см². Интенсивности излучения Ag лазера: а 300 и б 1000 Вт/см². Цифрами указаны спектры в последовательности их измерений.

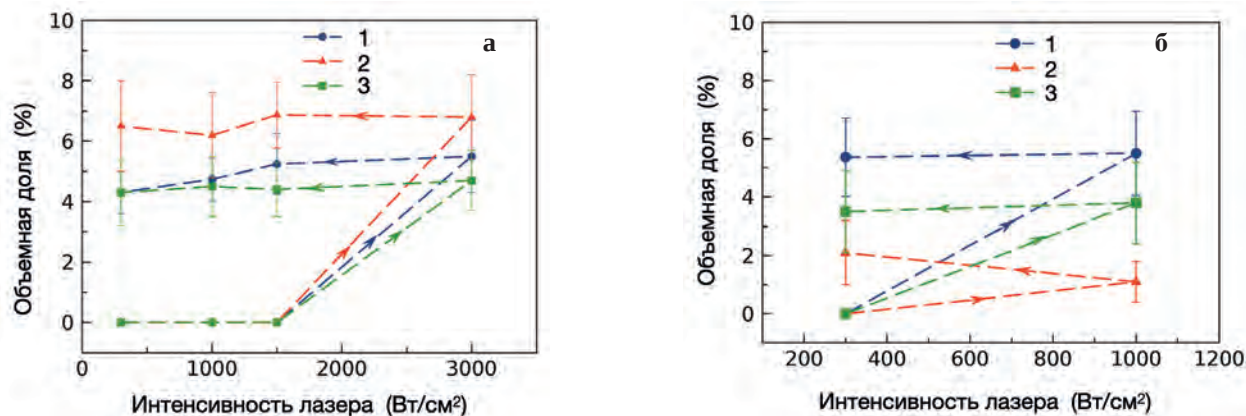


Рис. 7. Зависимость значения объёмной фракции кристаллической доли в образцах Ag:PGe от интенсивности I_{Laser} : а He-Ne и б Ar-лазеры. Цифрами обозначены значения D , при которых были сформированы образцы: 1 – $7.4 \cdot 10^{16}$; 2 – $1.0 \cdot 10^{17}$ и 3 – $1.3 \cdot 10^{17}$ ион/см².

следовательного увеличения и уменьшения I_{Laser} при возбуждении Ar-лазером были проведены и для образцов Ag:PGe, сформированных при более высоких значениях $D = 1.0 \cdot 10^{17}$ и $1.3 \cdot 10^{17}$ ион/см², и показали качественно подобные результаты.

Используя результаты деконволюции рамановских спектров на составляющие линии, соответствующие фракциям *nano*-Ge и *a*-Ge, были оценены количественные долевые значения для кристаллической *nano*-Ge (f) в имплантированном аморфном слое PGe. Данная величина f может быть рассчитана с использованием уравнения, предложенного в работе [18], где $f = I_{\text{nano}} / (I_{\text{nano}} + \gamma I_a)$, в котором I_{nano} и I_a являются интегральными интенсивностями рамановских полос для *nano*-Ge и *a*-Ge фаз. Величина γ соответствует отношению сечения рассеяния между этими фазами, которая для слоёв, состоящих из химически приготовленных нанонитей Ge, была экспериментально оценена равной 3.96 [19].

На рис. 7 приведены результаты зависимости f для доли *nano*-Ge в локальном объёме имплантированного слоя PGe от I_{Laser} воздействия для He-Ne и Ar-лазеров по экспериментальным данным, приведённым на рис. 3 и 6. На рис. 7 стрелками обозначена последовательность измерений рамановских спектров.

Как было указано ранее, при возбуждении рамановского свечения He-Ne лазером (рис. 5) проявляется вклад от подложки *c*-Ge, который при деконволюции вычитался из экспериментального спектра. Полученные оценки для данного лазерного возбуждения позволили установить увеличение доли *nano*-Ge, которые составили объём от 0 до 5–7% для образцов, формируемых с повышением D (рис. 7а). Очевидно, что появление кристаллической *nano*-Ge фазы происходит в результате локального нагрева имплантированного слоя под воздействием He-Ne лазера. При этом I_{Crit} для инициализации кристаллизации составляет величину порядка 3000 Вт/см² для сформированных образцов. В случае воздействия на образцы Ar-лазером также наблюдалось необратимое изменение фазового состава и образование кристаллического долевого объёма *nano*-Ge от 0 до 4–6% (рис. 7б), что также

подразумевает частичный локальный отжиг. Отметим однако, что I_{Crit} при этом оказался около 1000 Вт/см², что в три раза ниже, чем при облучении He-Ne лазером. Данное различие объясняется оттоком тепла в подложку *c*-Ge из облучаемого объёма имплантированного слоя в случае облучением He-Ne лазером, тогда как лазерное возбуждение для Ar-лазера полностью поглощается в имплантированном слое.

Заключение

Тонкие аморфные слои PGe, состоящие из переплетающихся нанонитей, были сформированы низкоэнергетической высокодозовой имплантацией ионов Ag⁺ в подложку *c*-Ge. В процессе измерения рамановских спектров при воздействии непрерывными He-Ne и Ar лазерами имплантированные слои PGe были подвержены нагреву с последующей локальной кристаллизацией с образованием наноструктурированной фазы *nano*-Ge. Установлено, что объёмная доля *nano*-Ge достигает значения 6–7%. Оценённые пороги кристаллизации составили 3 и 1 кВт/см² при возбуждении He-Ne и Ar-лазерами соответственно. Различие в порогах кристаллизации объясняется разницей глубиной проникновения лазерного излучения для собственных длин волн.

Работа проводилась в рамках выполнения госзадания ФИЦ КазНЦ РАН.

Литература

1. Yun J.-H., Park Y.C., Kim J., Lee H.-J., Anderson W.A., Park J.: *Nanoscale Res. Lett.* **6**, 287 (2011)
2. Kim J., Bahk J.-H., Hwang J., Kim H., Park H., Kim W.: *Phys. Status Solidi Rapid Res. Lett.* **7**, 767 (2013)
3. Nowak D., Turkiewicz M., Solnica N.: *Coatings* **9**, 120 (2019)
4. Burchhart T., Lugstein A., Hyun Y.J., Hochleiner G., Bertagnolli E.: *Nano Lett.* **9**, 2739 (2009)
5. Gongalsky M., Gvindzhiliia G., Tamarov K., Shalygina O., Pavlikov A., Solovyev V., Kudryavtsev A., Sivakov V., Osminkina L.A.: *ASC Omega* **4**, 10662 (2019)

6. Korun M., Navruz T.S.: J. Phys. Conf. **707**, 12035 (2016)
7. Isomura M., Nakahata K., Shima M., Taira S., Wakisaka K., Tanaka M., Kiyama S.: Sol. Energy Mater. Cell **74**, 519 (2002)
8. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Рогов А.М., Воробьев В.В.: Формирование слоёв пористого кремния и германия с металлическими наночастицами. Казань: ФИЦПРЕСС, 2019.
9. Leem J.W., Kim Y.P., Yu J.S.: J. Opt. Soc. Am. B **29**, 357 (2012)
10. Schicho S., Jaouad A., Sellmer C., Morris D., Aimez V., Ares R.: Mater. Lett. **94**, 86 (2013)
11. Liu S., Feng J., Bian X., Qian Y., Liu J., Xu H.: Nanomater. Energy **13**, 651 (2015)
12. Tian H., Xin F., Wang X., He W., Han W.: J. Materiomics **1**, 153 (2015)
13. Csepregi L., Kullen R., Mayer J., Sigmon T.: Solid State Comm. **21**, 1019 (1977)
14. Som T., Ghatak J., Sinha O.P., Sivakumar R., Kanjilal D.: J. Appl. Phys. **103**, 123532 (2008)
15. Milazzo R., Carraro C., Frigerio J., Ballabio A., Impellizzeri G., Scarpa D., Andrighetto A., Isella G., Napolitani E.: Appl. Surf. Sci. **509**, 145277 (2020)
16. Lombardoa S.F., Boninellie S., Cristianoc F., Fisicarod G., Fortunato G., Grimaldib M., Impellizzeri G., Italiaa M., Marinoa A., Milazzof R., Napolitani E., Privitera V., La Magnaa A.: Mater. Sci. Semicond. Process. **62**, 80 (2017)
17. Batalov R.I., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Vorobev V.V., Ivlev G.D., Stepanov A.L.: J. Phys. Appl. Phys. **51**, 15109 (2017)
18. Tsu R., Gonzalez-Hernandez J., Chao S.S., Lee S.C., Tanaka K.: Appl. Phys. Lett. **40**, 534 (1982)
19. Hao Z., Kochubei S., Popov A., Volodin V.: Solid State Comm. **313**, 113897 (2020)
20. Mohanta S., Soni R., Gosvami N., Tripathy S., Kanjilal D.: Appl. Surf. Sci. **253**, 4531 (2007)
21. Wolf I.D.: J. Raman Spectrosc. **30**, 877 (1999)
22. Cerdeira F., Fjeldly T.A., Cardona M.: Phys. Rev. B **9**, 4344 (1974)
23. Pavlikov A.V., Forsh P.A., Svyakhovskiy S.E., Matsukatova A.N., Forsh E.A., Kazanskii G., Kashkarov P.K.: Appl. Phys. Lett. **113**, 203103 (2018)
24. Rodichkina S., Nychporuk T., Pavlikov A., Lysenko V., Timoshenko V.Y.: J. Raman Spectrosc. **50**, 1642 (2019)
25. Bermejo D., Cardona M.: J. Non-Cryst. Solids **32**, 405 (1979)
26. Parker J.H., Feldman D.W., Ashkin M.: Phys. Rev. **155**, 712 (1967)
27. Terrasi A., Cosentino S., Crupi I., Mirabella S.: Nanotechnology and Photovoltaic Devices. Light energy harvesting with group IV nanostructures. N.Y.: Jenny Stanford Publ., 2015.
28. Volodin V.A., Marin D.V., Sachkov V.A., Gorokhov E.B., Rinnert H., Vergant M.: J. Exp. Theor. Phys. **118**, 65 (2014)
29. Jalilan R., Sumanasekera G.U., Chandrasekharan H., Sunkara M.K.: Phys. Rev. B **74**, 155421 (2006)

Влияние магнитного поля на электрическую поляризацию малых ферромагнитных частиц цилиндрической формы

Т. С. Шапошникова, Р. Ф. Мамин

Лаборатория физики ферроиков и функциональных материалов

В работе теоретически изучено возникновение неоднородного магнитного состояния и связанное с этим появление неоднородной электрической поляризации в объёме малых магнитных частиц цилиндрической формы в отсутствии внешнего магнитного поля. Расчёты выполнены в рамках феноменологического подхода. Микроскопический механизм связи намагниченности с поляризацией обусловлен спин-орбитальным взаимодействием. Конкретный вид намагниченности и поляризации определяется формой и размерами частиц. Вихревое состояние в виде трёхмерных магнитных вихрей возникает только для случая, когда радиус цилиндрических частиц больше определённого критического значения, а для частиц с меньшим радиусом возникает однородное магнитное состояние. Показано, что в вихревом состоянии появляется неоднородная электрическая поляризация. Векторы локальной поляризации направлены к оси цилиндрической частицы. Определена область существования таких неоднородных состояний. Рассмотрено изменение локальной электрической поляризации малых магнитных частиц цилиндрической формы при приложении малого внешнего магнитного поля. Результаты получены для длинных цилиндрических частиц и в приближении слабых магнитных полей. Получено выражение для магнитоэлектрической восприимчивости частиц цилиндрической формы в слабом внешнем магнитном поле.

The effect of a magnetic field on the electric polarization of small ferromagnetic cylindrical particles

T. S. Shaposhnikova, R. F. Mamin

Laboratory of physics of ferroics and functional materials

The occurrence of an inhomogeneous magnetic state and the associated appearance of inhomogeneous electric polarization in the volume of small cylindrical magnetic particles in the absence of an external magnetic field has been theoretically studied. All calculations are performed within the phenomenological approach. The microscopic mechanism of the relationship between magnetization and polarization is due to the spin-orbit interaction. The specific type of magnetization and polarization is determined by the shape and size of the particles. A vortex state in the form of three-dimensional magnetic vortices occurs only for cylindrical particles whose radius is greater than a certain critical value, and a homogeneous magnetic state occurs for particles with a smaller radius. It is shown that inhomogeneous electric polarization appears in the vortex state. The vectors of local polarization are directed towards the axis of the cylindrical particle. The area of existence of such inhomogeneous states is determined. A change in the local electric polarization of small cylindrical magnetic particles is considered when a small external magnetic field is applied. The results are obtained for long cylindrical particles in the approximation of weak magnetic field. An expression for the magnetoelectric susceptibility of cylindrical particles in a weak external magnetic field is obtained.

Введение

Малые частицы, обладающие магнитными свойствами, а также области субмикронного и нанометрового размеров с неоднородными магнитными состояниями привлекают большое внимание в связи с возможностью их практического применения [1–15]. Они являются потенциальными кандидатами для использования в качестве элементов памяти в жёстких дисках высокой плотности и могут использоваться как маркеры в медицинских целях [1]. Недавно было показано, что неоднородные состояния в виде цилиндрических областей могут применяться для записи и манипуляции информацией, а также различных

алгоритмов вычислений в современных компьютерах [12, 13]. Перемещать и управлять этими состояниями можно с помощью спин-поляризованного тока [13]. Такие состояния могут быть перспективны в качестве нового прототипа элементов памяти для реализации компьютерных вычислений.

Большой научный и практический интерес вызывают соединения, обладающие магнитоэлектрическими свойствами. Примером однофазных материалов, которые могут проявлять магнитоэлектрический эффект, являются мультиферроики, если их магнитный и электрический порядки связаны. В мультиферроиках чаще всего сосуществуют антиферромагнитный и сегнетоэлектрический

параметры порядка, при этом температуры Кюри и Нееля могут не совпадать [10]. Имеются соединения, в которых спонтанная намагниченность и спонтанная сегнетоэлектрическая поляризация возникают независимо друг от друга, но существует взаимодействие между этими двумя параметрами порядка [11]. В этом случае магнитоэлектрический эффект определяется таким взаимодействием. Магнитоэлектрический эффект наблюдается также в гетероструктурах, которые состоят из тонких плёнок магнитных и сегнетоэлектрических материалов [16]. Кроме того, магнитоэлектрический эффект существует в образцах, где наблюдается неоднородный магнитный порядок, например, в спиральных мультиферроиках и в образцах с ограниченной геометрией, а именно, частицах малого размера, тонких плёнках, доменных стенках. Это так называемый флексомагнитоэлектрический эффект [17–19]. Он приводит к появлению поляризации за счёт спин-орбитального взаимодействия [6–8]. Такого рода состояния и такой механизм магнитоэлектрического эффекта рассмотрены в настоящей работе.

В данной работе рассмотрено возникновение неоднородных магнитных состояний в частицах цилиндрической формы или в цилиндрических областях вблизи фазового перехода в ферромагнитное состояние и определена область их существования. Расчёты выполнены в рамках феноменологической теории фазовых переходов. Получено пространственное распределение неоднородной электрической поляризации, возникающей в областях цилиндрической формы вследствие пространственной неоднородности намагниченности. Рассчитана магнитоэлектрическая восприимчивость.

Методика

Гармоническая часть свободной энергии Ландау-Гинзбурга-Девоншира [20] для трёхмерной частицы ферромагнетика вблизи температуры Кюри, имеющей парамагнитное окружение, вблизи фазового перехода второго рода имеет следующий вид:

$$F = \int dV \left(\frac{A}{2} \mathbf{m}^2 + \frac{g}{2} (\nabla \mathbf{m})^2 \right) + F_{\text{EM}}, \quad (1)$$

где $\mathbf{m}$ – вектор локальной намагниченности, V – объём частицы, ∇ – векторный дифференциальный оператор, A – определяет обменное взаимодействие, $A = A'(T - T_c)$, T_c – температура магнитного фазового перехода объёмного образца, A' – константа, g – градиентный член, полученный в [20]. Интегрирование производится по объёму частицы. В уравнении (1) для свободной энергии отсутствует вклад, описывающий размагничивающее поле, так как ниже мы используем граничные условия, при которых энергия размагничивания будет минимальной. Кроме того, здесь отсутствуют слагаемые более высокого порядка по $\mathbf{m}$, так как мы полагаем, что намагниченность

мала. Неоднородный магнитоэлектрический эффект вносит вклад в свободную энергию кристалла F_{EM} , который имеет следующий вид для объёмного кристалла [17, 20] (инвариант типа Лифшица):

$$F_{\text{EM}} = \int dV \gamma \mathbf{E} \cdot (\mathbf{m} \cdot (\nabla \cdot \mathbf{m}) - (\mathbf{m} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{m}), \quad (2)$$

где $\mathbf{E}$ – вектор напряжённости электрического поля, а γ – константа магнитоэлектрической связи. Будем считать, что вклад в энергию, связанный с магнитоэлектрическим эффектом, мал, то есть мала константа γ . Тогда при определении намагниченности можно сначала пренебречь членом F_{EM} . Эффективное магнитное поле $\mathbf{H}^{\text{eff}}(\mathbf{r}, t)$ определяется как вариация изменения свободной энергии $F - F_{\text{EM}}$ по магнитному моменту $\mathbf{m}$:

$$\mathbf{H}^{\text{eff}}(\mathbf{r}, t) = -\delta(F - F_{\text{EM}}) / \delta \mathbf{m}. \quad (3)$$

Результаты и обсуждение

Обратимся к рассмотрению ферромагнитной частицы цилиндрической формы, которая вытянута вдоль своей оси и имеет парамагнитное или немагнитное окружение. Перейдём в цилиндрическую систему координат с координатами ρ , α , и z , а ось z направим вдоль оси цилиндрической частицы. Тогда локальная намагниченность имеет вид $\mathbf{m}(\rho, \alpha, z)$. Начало цилиндрической системы координат помещаем в центр нижнего круглого основания цилиндра, ρ – расстояние от оси z (внутри частицы цилиндрической формы $0 \leq \rho \leq R$, R – радиус основания цилиндра), угол α ($0 \leq \alpha \leq 2\pi$) откладываем от оси x декартовой системы координат в плоскости xy . Для определения пространственного распределения вектора магнитного момента $\mathbf{m}$, а в последующем и вектора электрической поляризации $\mathbf{p}$, рассмотрим вариацию $(F - F_{\text{EM}})$ по m_α . Если эта вариация равна нулю, то есть равна нулю проекция эффективного поля на направление с углом α , то намагниченность является решением уравнения:

$$\left(A + \frac{g}{\rho^2} \right) m_\alpha - \frac{g}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial m_\alpha}{\partial \rho} \right) - \frac{g}{\rho^2} \frac{\partial^2 m_\alpha}{\partial \alpha^2} - \frac{2g}{\rho^2} \frac{\partial m_\rho}{\partial \alpha} = 0. \quad (4)$$

Рассмотрим одно из решений уравнения (4), которое имеет вид вихря (см. рис. 1). Если m_ρ не зависит от угла α , а $m_\alpha = m_\alpha(\rho)$, то в уравнении (4) третье и четвёртое слагаемые будут равны нулю. Одно из возможных решений уравнения (4) при $A < 0$ имеет вид:

$$m_\rho = 0, \quad m_z = 0, \quad m_\alpha(\rho) = C J_1(\sqrt{-A/g} \rho), \quad (5)$$

где $C = \text{const}$, а $J_1(x)$ – функция Бесселя 1-го порядка. Для $A > 0$ действительные решения уравнения (4) отсутствуют. Для $A < 0$ граничное условие в виде свободной поверхности ($dm_\alpha/d\rho = 0$ при $\rho = R$) выполняется в случае, если $A = -g(\beta_n/R)^2$, где β_n – n -ый

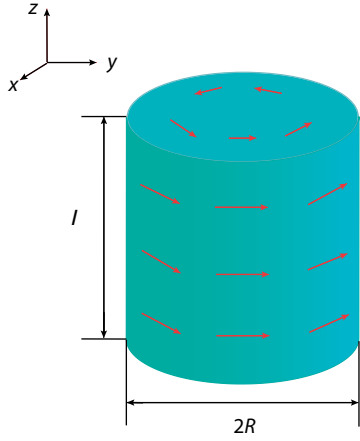


Рис. 1. Распределение намагниченности на поверхности цилиндрической частицы в вихревом магнитном состоянии (см. (5)) Стрелками схематично показаны векторы локальной намагниченности $\mathbf{m}$.

корень уравнения $dJ_1(x)/dx = 0$. $\beta_1 = 1.8$ – корень для $n = 1$. Полученное нами решение (5) уравнения (4) представляет собой вихревое решение с замкнутым магнитным потоком. Для решения, имеющего такой вид, энергия размагничивания будет минимальной. Выбор нами граничного условия обусловлен тем, что при нём минимален вклад в общую энергию от энергии размагничивания. Аналогичное граничное условие ($dm_\alpha/dz = 0$) применяется и при $z = 0$ и $z = l$ на нижней и верхней поверхностях цилиндра соответственно. Таким образом, мы считаем, что распределение намагниченности на нижней и верхней поверхностях цилиндра (при $z = 0$ и $z = l$) имеют такой же вид, как и в объёме цилиндра. Такой подход является некоторым упрощением задачи, и при численных расчётах вблизи верхней и нижней поверхностей цилиндра намагниченность может иметь несколько иной вид. Чем более вытянутым вдоль оси z является цилиндр, тем более правомерным является наше упрощение. Поэтому полученные нами решения справедливы для вытянутого вдоль своей оси цилиндра, когда длина цилиндра l существенно больше его радиуса R .

Для кубических кристаллов допустимой формой представления магнитно-индуцированной электрической поляризации [20, 21] является выражение, которое связано с производной магнитоэлектрического вклада в свободную энергию (2) по $\mathbf{E}$, и имеет вид:

$$\mathbf{p} = \gamma((\mathbf{m} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{m} - \mathbf{m} \cdot (\nabla \cdot \mathbf{m})), \quad (6)$$

где γ – константа. Выражение получено для случая, когда электрическая поляризация обусловлена спин-орбитальным взаимодействием [20, 22, 23] или спиновым флексоэлектричеством [16, 18, 19].

Найдём поляризацию частицы цилиндрической формы с радиусом R и длиной $l > R$, подставив выражения для намагниченности (4) в (6). Локальная поляризация тогда имеет вид:

$$\mathbf{p}(\rho) = -\gamma C^2 \frac{J_1^2(\beta_1 \rho / R)}{\rho} \mathbf{e}_\rho \quad (7)$$

и не зависит от z и α . Здесь $\mathbf{e}_\rho$ – единичный вектор, направленный вдоль оси ρ цилиндрической системы координат. $J_1(x)$ – функция Бесселя 1-го порядка; γ , C и $\beta_1 = 1.8$ – константы. Локальная поляризация отлична от нуля, а суммарная поляризация всей частицы при этом равна нулю, как и для частицы сферической формы [24], так как внутри частицы цилиндрической формы $\mathbf{p}(\rho, \alpha, z) = -\mathbf{p}(\rho, \alpha + \pi, z)$. Из выражения (7) видно, что векторы поляризации направлены против $\mathbf{e}_\rho$, то есть лежат в плоскости, перпендикулярной к оси z , и направлены к этой оси.

Поместим магнитную частицу цилиндрической формы, имеющую локальную намагниченность (5) и локальную поляризацию (7), в небольшое постоянное внешнее магнитное поле $\mathbf{H}$. Рассмотрим, как при этом изменятся намагниченность частицы и её поляризация. Будем считать, что намагниченность при этом изменится на небольшую величину $\delta \mathbf{m}$, пропорциональную внешнему магнитному полю $\mathbf{H}$. Тогда $\mathbf{m} = \mathbf{m}_0 + \delta \mathbf{m}$, где $\mathbf{m}_0$ – намагниченность в отсутствие магнитного поля (5), а $\delta \mathbf{m} = \chi \mathbf{H}$ (где χ – магнитная восприимчивость, $\chi = \text{const}$) – добавка к намагниченности. Тогда поляризация также изменится на величину $\Delta \mathbf{p}$, и $\mathbf{p} = \mathbf{p}(\mathbf{m}) = \mathbf{p}(\mathbf{m}_0) + \Delta \mathbf{p}$. Предположим, что $\mathbf{p}(\mathbf{m})$ и $\mathbf{p}(\mathbf{m}_0)$ имеют вид выражений (7). Тогда для дополнительной поляризации мы получим [25]:

$$\Delta \mathbf{p} = \gamma \chi ((\mathbf{H} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{m}_0 - \mathbf{H} \cdot (\nabla \cdot \mathbf{m}_0)). \quad (8)$$

Дополнительная поляризация $\Delta \mathbf{p} = \mathbf{p}(\mathbf{H}) - \mathbf{p}(\mathbf{H} = 0)$ в слабом внешнем магнитном поле $\mathbf{H} = H \mathbf{e}_z$, направленном вдоль оси цилиндра, будет равна нулю внутри цилиндра и отлична от нуля только на верхнем и нижнем основаниях цилиндра, причём суммарная дополнительная поляризация частицы будет равна нулю. Для слабого внешнего магнитного поля, лежащего в плоскости оснований цилиндрической частицы, например, направленного вдоль оси x декартовой системы координат $\mathbf{H} = H \mathbf{e}_x$, подставив (5) в (8), получим, что дополнительная поляризация равна:

$$\Delta \mathbf{p} = \gamma \chi C H \left(\frac{J_1(\beta_1 \rho / R)}{\rho} \sin(\alpha) \mathbf{e}_\rho + \frac{\partial J_1(\beta_1 \rho / R)}{\partial \rho} \cos(\alpha) \mathbf{e}_\alpha \right). \quad (9)$$

Здесь $\mathbf{e}_\rho$ и $\mathbf{e}_\alpha$ – единичные векторы, направленные вдоль осей ρ и α цилиндрической системы координат соответственно. Это же выражение, записанное в виде проекций на оси декартовой системы координат, имеет вид:

$$\Delta \mathbf{p} = \gamma \chi C H \left[\left(\frac{J_1(\beta_1 \rho / R)}{\rho} - \frac{\partial J_1(\beta_1 \rho / R)}{\partial \rho} \right) \sin(\alpha) \cos(\alpha) \mathbf{e}_x + \left(\frac{\partial J_1(\beta_1 \rho / R)}{\partial \rho} \cos^2(\alpha) + \frac{J_1(\beta_1 \rho / R)}{\rho} \sin^2(\alpha) \right) \mathbf{e}_y \right]. \quad (10)$$

Суммарная дополнительная поляризация всей частицы будет отлична от нуля и направлена вдоль оси y декартовой системы координат ($\Delta p_y \neq 0$, $\Delta p_x = 0$). Тогда некоторые компоненты магнитоэлектрической восприимчивости частицы, имеющей форму вытянутого вдоль своей оси цилиндра, будут отличны от нуля и равны:

$$\chi_{yx} = -\chi_{xy} \approx 1.827\gamma\chi CRl. \quad (11)$$

Выражение (11) вычислялось по формуле:

$$\chi_{ij} = \int (\partial \Delta p_i / \partial H_j) dV. \quad (12)$$

При получении значения выражения (11) для магнитоэлектрической восприимчивости интегрирование проводилось по объёму частицы цилиндрической формы (см. (12)). Здесь γ – магнитоэлектрическая константа, определённая в формуле (6), χ – магнитная восприимчивость ферромагнетика, C – константа, определяющая амплитуду намагниченности (см. (5)), а R и l размеры частицы цилиндрической формы. R – радиус основания цилиндра, а l – высота.

Область существования

Ферромагнитные частицы нанометрового или микрометрового размера в нулевом внешнем магнитном поле при температуре ниже температуры Кюри могут быть намагничены по-разному. Самые маленькие частицы намагничены однородно, то есть они состоят из одного домена. Относительно большие частицы разбиваются на несколько доменов. Описываемое нами вихревое состояние намагниченности характерно для частиц промежуточного размера. Однородные состояния ферромагнитных частиц возникают в том случае, если магнитная энергия равномерно намагниченной частицы меньше энергии неоднородно намагниченной частицы [26]. Если в нулевом внешнем магнитном поле частица, имеющая форму бесконечно длинного цилиндра, однородно намагничена в направлении, перпендикулярном к оси цилиндра, то внутри неё существует постоянное магнитное поле $\mathbf{h} = -(\mu + 1)^{-1}\mathbf{M}$, и стабильность состояния с однородной намагниченностью теряется при $A < -(\mu + 1)^{-1}$. В этом выражении μ – магнитная проницаемость ферромагнетика. Если цилиндр имеет бесконечную длину вдоль оси z , и если он намагничивается вдоль этой оси, то размагничивающий фактор равен нулю, и постоянное магнитное поле внутри цилиндра также будет равно нулю $\mathbf{h} = 0$ [26]. Тогда $A = 0$, и $T_{SC} = T_C$. И состояние, описанное выше формулами (5) и (7), энергетически не выгодно. В более общем случае, то есть если цилиндр имеет конечные размеры, можно ввести константу $s = l/2R$, которая характеризует относительные размеры цилиндра. Чем больше s , тем более вытянутым вдоль оси z является цилиндр. Коэффициент размагничивания такого цилиндра равен [27]:

$$N_z = \frac{\sqrt{\pi}}{4s + \sqrt{\pi}}, \quad N_x = N_y = \frac{2s}{4s + \sqrt{\pi}}. \quad (13)$$

Тогда, если цилиндр намагничен вдоль оси i , то постоянное магнитное поле внутри цилиндра будет равно $h_i = -(\mu + (1 - N_i)/N_i)^{-1}M_i$, где $i = x, y, z$. Выражение $A = -(\mu + (1 - N_{\min})/N_{\min})^{-1}$ (здесь $N_{\min}$ – минимальное значение из N_x , N_y и N_z) определяет критическую температуру $T_{CS} = T_C - \Delta T_S$, где $\Delta T_S = [A'(\mu + (1 - N_{\min})/N_{\min})]^{-1}$ (для вытянутого вдоль оси z цилиндра $N_{\min} = N_z$). Поэтому для критической длины вытянутого вдоль оси z цилиндра мы имеем $L = L_C = \beta_1 g^{1/2}(\mu + (1 - N_z)/N_z)^{1/2}$. Выше температуры T_{CS} основным становится неоднородное вихревое состояние, так как энергия неоднородного магнитного состояния становится меньше, чем энергия однородного магнитного состояния. Вихревое магнитное состояние вытянутого вдоль оси z цилиндра существует в диапазоне температур выше T_{CS} и ниже T_{CV} (рис. 2). Такое магнитное состояние является стабильным, потому что является основным и соответствует минимуму свободной энергии системы. Верхняя граничная температура существования неоднородного вихревого состояния T_{CV} определяется из равенства $A = -g(\beta_1/R)^2$. Существует критический радиус R_C , ниже которого существуют только однородные магнитные состояния, для которого получаем выражение $R_C = L_C/(2s)$. Величина R_C имеет порядок величины 10–20 нм [5]. В результате мы получили выражение для верхней температурной границы области существования вихревого состояния $T_{CV} = T_C - \Delta T_V$, где $\Delta T_V = 3.24g(A'R^2)^{-1}$. Так как величина g/A' достаточно мала для магнетиков ($g/A' \approx 5 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2 \cdot \text{К}$), то T_{CV} порядка T_C . Например, $\Delta T_V \approx 0.035 \text{ К}$ для $R \approx 100 \text{ нм}$. Иными словами, верхняя граница области существования неоднородных состояний находится вблизи T_C . Поэтому температурный интервал области существования основного вихревого состояния имеет порядок ΔT_S . По нашим оценкам ΔT_S

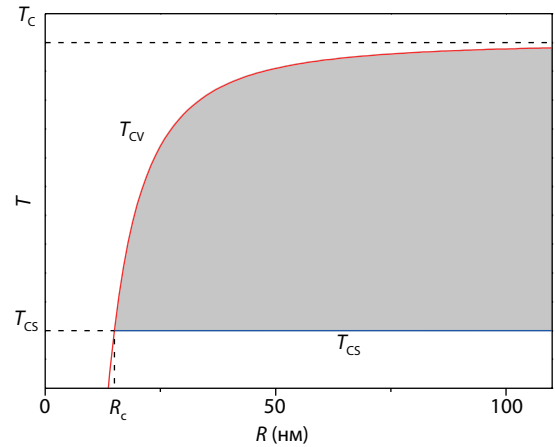


Рис. 2. Область существования неоднородного вихревого состояния намагниченности в координатах температура – радиус цилиндрической частицы. R_C – критический радиус. $T_{CS} = T_C - \Delta T_S$ и $T_{CV} = T_C - \Delta T_V$ – температурные границы области неоднородного вихревого состояния. Область неоднородного вихревого состояния отмечена серым цветом.

составляет несколько градусов К. Выше $T_C \approx T_{CV}$ однородное парамагнитное состояние является основным состоянием, а ниже T_{CS} основным состоянием является однородное магнитное состояние. Следует отметить, что если в области существования основного вихревого состояния в температурном интервале ΔT_S возникает неоднородное вихревое состояние, то он будет существовать и при более низких температурах, только оно будет не основным, но устойчивым. Поэтому интересующие нас состояния надо генерировать в области фазового перехода, а потом можно производить с ними различные манипуляции при более низких температурах. Такой алгоритм мы предлагаем для создания объектов для компьютерных вычислений. Так как эти объекты обладают магнитными свойствами и электрической поляризацией, на них можно воздействовать магнитным полем, спин-поляризованным током, а также и электрическим полем.

Заключение

В рамках феноменологической теории фазовых переходов исследовано возникновение неоднородных состояний намагниченности в малых магнитных частицах и ферромагнитных областях цилиндрической формы. Для таких частиц и образований получены выражения для распределения намагниченности в вихревом состоянии в нулевом внешнем магнитном поле и определена область существования вихревых состояний. Полученные решения справедливы для цилиндрических частиц, вытянутых вдоль своей оси. Для таких частиц и областей определены критические размеры, меньше которых будет существовать только однородное магнитное состояние. Получены выражения для неоднородной электрической поляризации, обусловленной неоднородным распределением намагниченности в исследуемой системе. Показано, что локальная электрическая поляризация малых магнитных частиц изменяется при приложении малого внешнего магнитного поля, и определяется магнитоэлектрическая восприимчивость. Таким образом, показано, что в малых магнитных частицах возникают состояния с неоднородным распределением намагниченности, причём энергия таких состояний меньше, чем энергия

состояния с однородной намагниченностью. Показано возникновение магнитоэлектрического отклика для такого состояния при воздействии малого внешнего магнитного поля. В нашей системе возникают магнитоэлектрические свойства, и электрической поляризацией можно управлять путём приложения внешнего магнитного поля.

Литература

1. Peixoto L., Magalhaes R., Navas D., Moraes S., Redondo C., Morales R., Araújo J.P., Sousa C.T.: *Appl. Phys. Rev.* **7**, 011310 (2020)
2. Stapper Jr. C.H.: *J. Appl. Phys.* **40**, 798 (1969)
3. Usov N.A., Nesmeyanov M.S.: *Scientific Reports* **10**, 10173 (2020)
4. Hehn M., Ounadjela K., Bucher J.-P., Rousseaux F., Decanini D., Bartenlian B., Chappert C.: *Science* **272**, 1782 (1996)
5. Cowburn R.P., Koltsov D.K., Adeyeye A.O., Welland M.E., Tricker D.M.: *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1042 (1999)
6. Sergienko I.A., Dagotto E.: *Phys. Rev. B* **73**, 094434 (2006)
7. Cheong S.-W., Mostovoy M.: *Nat. Mater.* **6**, 13 (2007)
8. Rößler U.K., Bogdanov A.N., Pfleiderer C.: *Nature* **442**, 17 (2006)
9. Levanyuk A.P., Blinc R.: *Phys. Rev. Lett.* **111**, 097601 (2013)
10. Hill N.A.: *J. Phys. Chem. B* **104**, 6694 (2000)
11. Khanh N.D., Abe N., Sagayama H., Nakao A., Hanashima T., Kiyangi R., Tokunaga Y., Arima T.: *Phys. Rev. B* **93**, 075117 (2016)
12. Ma C., Zhang X., Xia J., Ezawa M., Jiang W., Ono T., Piramanayagam S.N., Morisako A., Zhou Y., Liu X.: *Nano Lett.* **19**, 353 (2019)
13. Zheng F., Rybakov F.N., Borisov A.B., Song D., Wang S., Li Zi-An, Du H., Kiselev N.S., Caron J., Kovacs A., Tian M., Zhang Y., Brugel S., Dunin-Borkowski R.E.: *Nature Nanotechnology* **13**, 451 (2018)
14. Гуревич Л.Э., Филиппов Д.А.: *ФТТ* **28**, № 9, 2696 (1986)
15. Zhang X., Zhou Y., Song K.M., Park T.-E., Xia J., Ezawa M., Liu X., Zhao W., Zhao G., Woo S.: *J. Phys.: Condens. Matter* **32**, 143001 (2020)
16. Пятаков А.П., Звездин А.К.: *УФН* **182**, № 6, 593 (2012)
17. Логинов А.С., Мешков Г.А., Николаев А.В., Пятаков А.П.: *Письма в ЖЭТФ* **86**, № 2, 124 (2007)
18. Звездин А.К., Пятаков А.П.: *УФН* **179**, № 8, 897 (2009)
19. Pyatakov A.P., Sergeev A.S., Mikailzade F.A., Zvezdin A.K.: *JMMM* **383**, 255 (2015)
20. Mostovoy M.: *Phys. Rev. Lett.* **96**, 067601 (2006)
21. Levanyuk A.P., Blinc R.: *Phys. Rev. Lett.* **111**, 097601 (2013)
22. Дзялошинский И.Е.: *ЖЭТФ* **37**, № 3, 881 (1960)
23. Moriya T.: *Phys. Rev.* **120**, 91 (1960)
24. Шапошникова Т.С., Мамин Р.Ф.: *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* № 12, 31 (2021)
25. Шапошникова Т.С., Мамин Р.Ф.: *Изв. РАН. Сер. физ.* **88**, № 5, 817–822 (2024)
26. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.: *Электродинамика сплошных сред*, с. 620. М.: Наука, 1982.
27. Sato M., Ishii Y.: *J. Appl. Phys.* **66**, 983 (1989)

Новый подход к получению бозе-эйнштейновского конденсата

К. М. Салихов

Лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Показано, что в условиях обменного сужения спектров ЭПР разбавленных растворов парамагнитных частиц создаются условия и может реализоваться бозе-эйнштейновская конденсация квазичастиц. Эти квазичастицы являются элементарными возбуждениями коллективных мод движения спинов неспаренных электронов парамагнитных частиц. Эти коллективные моды формируются за счёт эффекта переноса спиновой когерентности от партнёра по столкновению (“эффекта отдачи”) в результате гейзенберговского обменного взаимодействия между частицами в ходе случайного столкновения. Показано, что связанные с этими коллективными модами элементарные возбуждения (квазичастицы) являются бозонами. Таким образом в условиях экспериментов спектроскопии электронного парамагнитного резонанса создаётся смесь бозе-газов. С ростом скорости переноса спиновой когерентности происходит коллапс спектра в узкую однородно уширенную линию (эффект обменного сужения спектра), СВЧ-поле накачивает квазичастицы только одной из коллективных мод. И это создаёт предпосылки для бозе-эйнштейновской конденсации идентичных квазичастиц.

A new approach to reach Bose-Einstein condensate

K. M. Salikhov

Laboratory of spin physics and spin chemistry

It is shown that under conditions of exchange narrowing of the EPR spectra of dilute solutions of paramagnetic particles, conditions are created and Bose-Einstein condensation of quasiparticles can occur. These quasiparticles are elementary excitations of collective modes of spin motion of unpaired electrons of paramagnetic particles. These collective modes are formed due to the effect of the transfer of spin coherence from the collision partner (the “recoil effect”) as a result of the Heisenberg exchange interaction between particles during a random collision. It is shown that elementary excitations (quasiparticles) associated with these collective modes are bosons. Thus, under the conditions of electron paramagnetic resonance spectroscopy experiments, a mixture of Bose gases is created. As the rate of spin coherence transfer increases, the spectrum collapses into a narrow, uniformly widened line (the effect of exchange narrowing of the spectrum), and the microwave field pumps quasiparticles of only one of the collective modes. And this creates the prerequisites for the Bose-Einstein condensation of identical quasiparticles.

Введение

Бозе-эйнштейновским конденсатом (БЭК) называется состояние атомов при очень низких температурах, когда достаточно большое число атомов находится в основном электронном состоянии [1].

БЭК формируют не только атомы, но и квазичастицы (коллективные возбуждённые состояния). Сегодня известно немало примеров формирования БЭК квазичастиц, например, магнонов в магнитоупорядоченных твёрдых телах [2, 3]. Формирование БЭК квазичастиц означает, что фотоны накачивают в системе возбуждённые коллективные состояния, которые все находятся в одинаковом квантовом состоянии. В результате в системе в макроскопическом масштабе проявляется когерентность состояния квазичастиц.

БЭК квазичастиц имеет важное отличие от БЭК атомов в основном состоянии: в отличие от атомов квазичастицы имеют конечное время жизни.

Для формирования БЭК квазичастицы должны удовлетворять нескольким условиям:

- Квазичастицы должны быть бозонами, чтобы много идентичных квазичастиц могло находиться в одном и том же состоянии.
- Квазичастицы должны быть достаточно долгоживущими.
- Должна быть достаточно высокая концентрация квазичастиц, чтобы бозе-газ квазичастиц мог превратиться в конденсат.

В этой работе показано, что формирование БЭК магнитных возбуждённых состояний может происходить не только в магнитоупорядоченных твёрдых телах, но и в разбавленных растворах парамагнитных частиц.

На основе современной парадигмы спинового обмена в разбавленных растворах парамагнитных частиц [4–6] показано, что в ситуации обменного сужения спектра ЭПР выполняются приведённые выше условия для формирования БЭК квазичастиц. В качестве квазичастиц выступают возбуждённые состояния коллективных мод движения намагниченности спинов неспаренных электронов парамагнитных частиц в разбавленном растворе. Для накачки этих квазичастиц используется электронный парамагнитный резонанс (ЭПР).

Откуда берутся коллективные (согласованные) движения спинов электронов (квазичастицы) в разбавленных растворах парамагнитных частиц?

Наличие квазичастиц является одним из условий для формирования БЭКа.

Это нетривиальный вопрос для разбавленных растворов. Парамагнитные частицы в жидкости быстро диффундируют. Время от времени пары частиц случайно сталкиваются. При столкновениях включается обменное взаимодействие. В результате столкновения частицы расходятся уже с изменившимися состояниями спинов неспаренных электронов. И трудно представить, что эти случайные столкновения могут привести к какой-то наблюдаемой согласованности, когерентности в движении спинов разных радикалов. В связи с этим можно отметить замечание А. Абрагама в его книге “Ядерный магнетизм” (см. [7], VIII, 5в, стр. 259): “Нельзя ожидать, что когерентность может быть введена в систему благодаря взаимодействию, описываемому случайным гамильтонианом.”

Коллективные моды движения появляются при переходе от рассмотрения движения отдельных спинов в фазовом пространстве резонансных частот к анализу движения усреднённых парциальных намагниченностей подансамблей спинов с заданными резонансными частотами. Этот переход в описании состояния спинов достигается с помощью методов кинетической теории.

Коллективные моды движения спинов неспаренных электронов в разбавленных растворах радикалов выявляются естественным образом из кинетических уравнений для парциальных намагниченностей спинов системы.

Для иллюстрации приведённых выше утверждений выберем простейшую систему. Рассмотрим радикалы, в которых неспаренный электрон взаимодействует только с одним магнитным ядром со спином $I = 1/2$. В жидкостях в типичных условиях ЭПР экспериментов такой радикал имеет две резонансные частоты $\omega_{01} = \omega_0 + a/2$ и $\omega_{02} = \omega_0 - a/2$. Здесь ω_0 – ларморовская частота прецессии спина в постоянном магнитном поле B_0 , a – константа изотропного сверхтонкого взаимодействия (СТВ) неспаренного электрона с магнитным ядром. Ансамбль радикалов разобьём на два равных подансамбля, в одном подансамбле спины имеют частоту $\omega_{01} = \omega_0 + a/2$, а в другом – частоту $\omega_{02} = \omega_0 - a/2$. Предположим, что

поперечная намагниченность спина электрона индивидуального радикала в обоих подансамблях описывается временем релаксации T_2 (по Блоху [7]). Также для упрощения задачи предположим, что можно пренебречь вкладом спин-спиновой диполь-дипольного взаимодействия в парамагнитную релаксацию. Обсуждение вклада диполь-дипольного взаимодействия дано в [4–6, 8–10].

Для выбранной модели кинетические уравнения для поперечной парциальной намагниченности спинов электронов двух подансамблей имеют вид [11]:

$$\begin{aligned} \partial M_{1-}/\partial t = & (-i(\omega_0 + a/2 - \omega) - 1/T_2)M_{1-} \\ & - (1/2)V_{\text{ex}}M_{1-} + (1/2)V_{\text{ex}}M_{2-}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \partial M_{2-}/\partial t = & (-i(\omega_0 - a/2 - \omega) - 1/T_2)M_{2-} \\ & - (1/2)V_{\text{ex}}M_{2-} + (1/2)V_{\text{ex}}M_{1-}, \end{aligned}$$

$M_- = M_x - iM_y$, V_{ex} – скорость спинового обмена.

Введём вектор $\mathbf{M}_-$ с проекциями $\{M_{1-}, M_{2-}\}$. Из коэффициентов системы уравнений (2) составляем матрицу $\mathbf{L}$. Уравнения (2) можно записать в форме (ω – несущая частота СВЧ-поля в ЭПР-эксперименте):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{M}_-}{\partial t} &= \mathbf{L} \mathbf{M}_-, \\ \mathbf{L} &= \begin{pmatrix} -i(\omega_0 + \frac{a}{2} - \omega) - \frac{1}{T_2} - \frac{1}{2}V_{\text{ex}} & \frac{1}{2}V_{\text{ex}} \\ \frac{1}{2}V_{\text{ex}} & -i(\omega_0 - \frac{a}{2} - \omega) - \frac{1}{T_2} - \frac{1}{2}V_{\text{ex}} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

Находим собственные значения $\{\lambda_k\}$ оператора эволюции $\mathbf{L}$ с помощью уравнения:

$$|\mathbf{L} - \lambda \mathbf{E}| = 0, \quad (3)$$

где $\mathbf{E}$ – единичный оператор. Каждому собственному значению соответствует собственный вектор $\mathbf{X}_k$, который удовлетворяет уравнению:

$$\begin{aligned} \mathbf{L} \mathbf{X}_k &= \lambda_k \mathbf{X}_k, \\ \mathbf{X}_k &= u_{k1}M_{1-} + u_{k2}M_{2-}, \quad k = 1, 2. \end{aligned} \quad (4)$$

Для двухчастотной модельной системы имеем:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -i(\omega_0 - \omega) - R/2 - 1/T_2 - V_{\text{ex}}/2, \\ \lambda_2 &= -i(\omega_0 - \omega) + R/2 - 1/T_2 - V_{\text{ex}}/2, \\ X_1 &= c_1 \{-(ia + R)/(V_{\text{ex}})M_{1-} + M_{2-}\}, \\ X_2 &= c_2 \{-(ia - R)/(V_{\text{ex}})M_{1-} + M_{2-}\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь введены обозначения $R = (-a^2 + V_{\text{ex}}^2)^{1/2}$; c_1, c_2 – нормировочные коэффициенты.

В области сравнительно медленного спинового обмена (при условии $V_{\text{ex}} \ll a$) коллективные моды (6) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} X_1 &= -iM_{1-} + (V_{\text{ex}}/(2a))M_{2-}, \\ X_2 &= i(V_{\text{ex}}/(2a))M_{1-} + M_{2-}. \end{aligned} \quad (6)$$

Отсюда видно, что в области сравнительно медленного обмена коллективные моды в первом приближении по параметру $V_{\text{ex}}/a < 1$ сводятся практически к движению одной парциальной намагниченности с малым вкладом другой.

В области быстрого спинового обмена (при условии $V_{\text{ex}} \gg a$) коллективные моды (6) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} X_1 &= (1/2^{1/2})\{-M_{1-} + M_{2-}\}, \\ X_2 &= (1/2^{1/2})\{M_{1-} + M_{2-}\}. \end{aligned} \quad (7)$$

В этой ситуации проявляется эффект обменного сужения спектра. Уравнения (7) показывают, что при этом в коллективные моды обе парциальные намагниченности вносят одинаковый вклад. В рассматриваемой двухчастотной модельной системе в условиях обменного сужения спектра парциальные намагниченности двух ансамблей прецессируют с одинаковой фазой (X_2) или фазы прецессии двух парциальных намагниченностей отличаются на 180° (X_1), так как $\exp(i\pi) = -1$.

Собственные вектора X_k представляют собой такое согласованное движение векторов поперечных парциальных намагниченностей спинов в подансамблях спинов, при котором несмотря на случайные столкновения поддерживается определённое, характерное только для данного собственного вектора X_k соотношение между модулями векторов поперечной парциальной намагниченности спинов и фазой прецессии этих векторов.

Опережая изложение, мне хочется анонсировать, что в условиях обменного сужения СВЧ-поле накачивает только возбуждение коллективной моды X_2 .

Собственные вектора $\mathbf{L}$ являются суперпозицией парциальных поперечных намагниченностей спинов M_{k-} , принадлежащих разным компонентам спектра ЭПР. Собственные вектора являются независимыми коллективными модами (степенями свободы) эволюции квантовых когерентностей системы (см. (7)). Каждая коллективная мода в приближении линейного отклика системы на микроволновое поле с несущей частотой ω может дать эффект резонансного отклика на внешнее воздействие.

Резонансные частоты коллективных мод и ширины этих резонансов можно найти из условия минимума λ_k при изменении несущей частоты СВЧ-поля ω [4, 5, 11]. Например, для рассматриваемой двухчастотной модельной системы имеем следующие значения резонансных частот Ω_k и ширину этих резонансов $\Delta\omega_k$ (см. (5), [11]):

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= \omega_0 - (1/2)\text{Im}\{R\}, \\ \Omega_2 &= \omega_0 + (1/2)\text{Im}\{R\}, \\ \Delta\omega_1 &= 1/T_2 + V_{\text{ex}}/2 + (1/2)\text{Re}\{R\}, \\ \Delta\omega_2 &= 1/T_2 + V_{\text{ex}}/2 - (1/2)\text{Re}\{R\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Детальный анализ этих резонансных частот, уширения резонансов и в целом формы спектра ЭПР в зависимости от скорости спинового обмена можно найти в [4, 5, 11].

Эффект обменного сужения на уровне феноменологии

В спектроскопии ЭПР хорошо известен эффект так называемого обменного сужения спектров парамагнитных частиц в разбавленных растворах с ростом концентрации частиц. Он возникает благодаря переносу квантовой когерентности между парамагнитными частицами при их случайных бимолекулярных столкновениях. При столкновении включается гейзенберговское обменное взаимодействие, и это приводит к изменению состояния спинов электронов столкнувшихся частиц. Этот бимолекулярный процесс называют спиновым обменом.

С ростом концентрации парамагнитных частиц растёт скорость спинового обмена. И это вызывает замечательные изменения в форме спектра ЭПР.

При малых концентрациях частиц спектр ЭПР имеет неоднородное уширение. Например, очень часто спектр имеет свертонковую структуру (СТС): спектр состоит из отдельных компонент, каждая из которых отвечает конкретной конфигурации спинов магнитных ядер парамагнитных частиц, которые взаимодействуют с неспаренными электронами.

С повышением концентрации частиц отдельные компоненты спектра уширяются и сдвигаются к центру тяжести спектра.

При достаточно высокой концентрации частиц спектр схлопывается, наблюдается одна однородно уширенная линия поглощения. И самое удивительное, ширина этой линии не растёт, а падает с дальнейшим повышением концентрации парамагнитных частиц C , т. е. с повышением скорости спинового обмена. Этот эффект и называют обменным сужением.

Детальное обсуждение современной парадигмы спинового обмена в разбавленных растворах парамагнитных частиц и его проявления в форме спектра ЭПР можно найти в [4–6].

Наблюдаемый спектр ЭПР является суммой вкладов резонансных откликов всех коллективных мод на воздействие внешнего переменного поля. В ситуации линейного отклика частота и ширина резонансных линий задаётся собственными числами оператора $\mathbf{L}$ (5), (8).

Расчёты для модельных систем показывают, что даже в условиях обменного сужения разные коллективные моды имеют разные резонансные частоты (исключение составляет только двухчастотная система). Например, спектр ЭПР радикалов с одним магнитным ядром со

спином $I = 1$, например, ^{14}N , при малых скоростях спинного обмена ($C \rightarrow 0$) имеет три сверхтонких компонента с резонансными частотами $\omega_0 + a$, ω_0 , $\omega_0 - a$. В условиях обменного сужения спектра ЭПР резонансные частоты коллективных мод, которые дают крайние линии с резонансными частотами $\omega_0 + a$ и $\omega_0 - a$, сдвигаются к центру тяжести спектра ω_0 , но этот сдвиг даже при очень высоких скоростях спинного обмена оказывается меньше половины исходного расщепления линий, равного удвоенной константе сверхтонкого взаимодействия $2a$ [11].

Каждая коллективная мода, которая является собственным состоянием оператора $\mathbf{L}$, даёт резонансную линию. Однако интенсивность этих линий определяется тем, как внешнее магнитное поле (в случае регистрации спектра ЭПР это микроволновое магнитное поле с амплитудой B_1) возбуждает ту или иную коллективную моду.

Одна наблюдаемая линия не означает, что в условиях обменного сужения в системе все коллективные моды имеют одну и ту же резонансную частоту. На самом деле наблюдаемое обменное сужение спектра в одну узкую однородно уширенную линию связано с тем, что при этом внешнее переменное магнитное поле B_1 эффективно возбуждает только одну из коллективных (согласованных) мод движения намагниченностей спинов ансамбля [11].

Остальные коллективные моды в ситуации обменного сужения имеют малую силу осциллятора и поэтому дают резонансные линии с малой интенсивностью. Их можно рассматривать как запрещённые линии, которые тонут на крыльях обменно-суженной линии, которая связана с возбуждением конкретной моды коллективного движения парциальных намагниченностей подансамблей неспаренных электронов с разными резонансными частотами индивидуальных радикалов (в случае двухчастотной модели такой модой движения является собственный вектор X_2 (см. (7)).

Статистика рассматриваемых квазичастиц

Элементарные возбуждения коллективных мод движения являются квазичастицами, которые подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна.

Согласно уравнениям (3) и (5) коллективные моды движения парциальных намагниченностей подчиняются уравнениям

$$\partial^2 \mathbf{X}_k / \partial t^2 = \lambda_k^2 \mathbf{X}_k, \quad (9)$$

так как собственные вектора $\mathbf{X}_k$ (4) оператора $\mathbf{L}$ (2) являются линейной суперпозицией парциальных намагниченностей M_{k-} (5)–(7).

Движение рассматриваемых квазичастиц описывается уравнением гармонического осциллятора с затуханием. Следовательно, эти квазичастицы подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна, и в системе одновременно разрешено

быть много одинаковых квазичастиц. И они могут сформировать БЭК.

Время жизни коллективной моды, наблюдаемой в условиях обменного сужения спектра ЭПР

Как уже отмечалось, с точки зрения реализации БЭКа важно, чтобы время жизни возбуждения коллективной моды было большим. Время жизни фазовой когерентности между парциальными намагниченностями подансамблей спинов для всех коллективных мод определяется собственной скоростью декогеренции спинов индивидуальных частиц ($1/T_2$) и вкладом спинного обмена при случайных столкновениях в декогеренцию (фазовую релаксацию) спинов.

В разбавленных растворах в условиях обменного сужения спектра СВЧ-поле накачивает квазичастицы с максимально возможным временем жизни T_2 . В предельной ситуации обменного сужения случайные бимолекулярные столкновения частиц и включение обменного взаимодействия во время столкновения пары частиц пренебрежимо слабо влияют на фазовую релаксацию спинов и на время жизни возбуждения наблюдаемой коллективной моды движения. Поэтому можно утверждать, что обменное сужение свидетельствует о благоприятной возможности для формирования БЭКа квазичастиц в разбавленных растворах.

Отметим для сравнения, что в области медленного спинного обмена, вдали от ситуации обменного сужения спектра, в спектре ЭПР проявляются все квазичастицы (все коллективные моды движения поперечных компонент парциальных намагниченностей). В этом случае спиновый обмен уменьшает время фазовой релаксации спинов (время жизни квазичастиц, возбуждаемых СВЧ-полем) в сотни раз.

Заключение

За последние полвека довольно интенсивно изучался так называемый спиновый обмен между радикалами (парамагнитными частицами) в их разбавленных растворах. Это бимолекулярный процесс, индуцированный включением гейзенберговского обменного взаимодействия при случайных столкновениях двух радикалов [12–14].

Принципиально важным результатом исследований спинного обмена является установление факта, что случайный процесс бимолекулярных столкновений частиц формирует коллективные моды движения (прецессии) парциальных намагниченностей подансамблей парамагнитных частиц, которые дают, например, отдельные компоненты спектра ЭПР. Каждая коллективная мода движения характеризуется определённым согласованием фаз (когерентностью) прецессии парциальных намагниченностей радикалов в разных подансамблях частиц [4–6].

Уместно отметить, что в физике хорошо известны примеры формирования организованных форм движения частиц в макроскопическом масштабе, вызванных случайным движением частиц. Например, движение частиц в растворах при неравномерном распределении их концентрации подчиняется законам Фика.

Форма спектров ЭПР разбавленных растворов радикалов сильно зависит от концентрации радикалов. Это происходит потому, что с ростом концентрации спинов увеличивается скорость бимолекулярного спинового обмена.

При малых концентрациях радикалов спектр ЭПР имеет значительное неоднородное уширение: он состоит из многих однородно уширенных линий (спиновых пакетов) [15]. Например, в нитроксильных радикалах спектр ЭПР имеет расщепление за счёт сверхтонкого взаимодействия неспаренного электрона со спином ядра азота. Для ^{15}N нитроксильных радикалов спектр расщепляется на две компоненты, которые соответствуют двум возможным значениям проекции ядерного спина изотопа азота ^{15}N ($m = 1/2, m = -1/2$). Для ^{14}N нитроксильных радикалов наблюдаются три разрешённые компоненты, которые соответствуют трём возможным значениям проекции ядерного спина изотопа азота ^{14}N ($m = 1, 0, -1$).

С ростом концентрации радикалов происходит коллапс наблюдаемого спектра ЭПР: наблюдается одна обменно-суженная линия.

Спектр ЭПР представляет собой сумму вкладов коллективных мод движения парциальных намагниченностей. Каждая такая мода имеет свою резонансную частоту и ширину.

Эффект обменного сужения спектра ЭПР объясняется не тем, что в условиях обменного сужения все коллективные моды имеют одинаковые резонансные характеристики. За редкими исключениями, они имеют разные резонансные частоты даже в условиях обменного сужения спектра.

Обменное сужение наблюдается благодаря тому, что при больших скоростях спинового обмена (например, при больших концентрациях радикалов) “сила осцилляторов” для разных коллективных мод сильно отличаются. В результате оказывается, что практически только одна из коллективных мод движения парциальных намагниченностей спинов эффективно возбуждается СВЧ-импульсом.

Остальные моды коллективного движения дают вклады в спектр на других резонансных частотах. Но их интегральные интенсивности пренебрежимо малы по сравнению с интенсивностью вклада коллективной моды с максимальной “силой осциллятора”.

Уравнение движения для обсуждаемых коллективных мод движения парциальной намагниченности спинов системы совпадают с уравнением движения для осциллятора. Поэтому элементарные возбуждения рассматриваемых коллективных мод (квазичастицы) являются бозонами.

Таким образом, в условиях обменного сужения спектров радикалов (парамагнитных частиц) реализуются условия для накачки определённых квазичастиц-бозонов

(элементарных возбуждений одной конкретной моды коллективного движения парциальных намагниченностей электронных спинов). Фактически создаются предпосылки для формирования БЭКа.

Обычно принято ассоциировать введение коллективных мод, например магнонов, с магнитоупорядоченными твёрдыми телами. Поэтому, на первый взгляд может показаться странным, что случайные столкновения также формируют коллективные моды движения спинов. В рассматриваемом здесь случае речь идёт о статистических закономерностях, о средних по подансамблям радикалов намагниченностях спинов.

Формирование коллективных мод движения парциальных намагниченностей спинов в разбавленных растворах обязано эффекту отдачи квантовой когерентности от партнёра по столкновению благодаря включению обменного взаимодействия. И эта отдача когерентности не является случайной. Это нечто напоминающее третий закон Ньютона.

В заключение можно отметить, что приведённые выше результаты и выводы можно распространить на другие механизмы парамагнитной релаксации. Это так называемый химический обмен или любой другой механизм спектральной диффузии. Утверждение следует из того факта, что во всех этих случаях кинетические уравнения для парциальных намагниченностей спинов являются линейными уравнениями того же вида, как и кинетические уравнения для парамагнитной релаксации, вызванной спиновым обменом для разбавленных растворов парамагнитных частиц.

Эта работа была ориентирована на спиновый обмен в разбавленных растворах радикалов, так как для спинового обмена в разбавленных растворах были получены экспериментальные данные, которые прямо подтверждают образование коллективных мод, вызванных случайными столкновениями радикалов (см., например, [10, 16–19]).

Литература

1. Giorgini F.S., Pitaevskii L.P., Stringari S.: *Rev. Mod. Phys.* **80**, 1215 (2008)
2. Borovik-Romanov A.S., Bunkov Yu.M., Dimitriev V.V., Mukharskiy Y.M.: *JETP Letters* **40**, 1033 (1984)
3. Bunkov Yu.M.: *J. Low Temp.* **150**, 135–144 (2016)
4. Салихов К.М.: *УФН* **189**, 1017–1043 (2019)
5. Salikhov K.M.: *Fundamentals of Spin Exchange. Story of a Paradigm Shift.* Springer 2019.
6. Салихов К.М.: Новая парадигма спинового обмена между парамагнитными частицами в разбавленных растворах и его проявления в спектрах ЭПР. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2019. Ежегодник, с. 38–44. Казань: ФИЦ КазНЦ РАН 2020.
7. Абрагам А.: *Ядерный магнетизм.* Перевод с англ. под ред. Г. В. Скроцкого. Москва: ИЛ 1963.
8. Salikhov K.M.: *Appl. Magn. Reson.* **38**, 237–256 (2010)
9. Bales B.L., Bakirov M.M., Galeev R.T., Kirilyuk I.A., Kokorin A.I., Salikhov K.M.: *Appl. Magn. Reson.* **48**, 1399–1447 (2017)
10. Салихов К.М.: Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского. Сходства и различия во влиянии диполь-дипольного и обменного взаимодействий на форму спектра ЭПР разбавленных растворов. Ежегодник **23**, 47–53 (2024)

11. Salikhov K.M.: *Appl. Magn. Reson.* **47**, 1207–1228 (2016)
12. Замаев К.И., Молин Ю.Н., Салихов К.М.: Спиновый обмен, с. 317. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1977.
13. Molin Yu.N., Salikhov K.M., Zamaraev K.I.: *Spin Exchange. Principles and Applications in Chemistry and Biology*. Heidelberg, Berlin: Springer Verlag, p. 419, 1980.
14. Bales B.L.: Berliner L.J., Reuben J. (eds.): *Biological Magnetic Resonance*, Vol. 8, p. 77. New York: Plenum Publishing Corporation, 1989.
15. Portis A.M.: *Phys. Rev.* **91**, 1071–1078 (1953)
16. Bales B.L., Peric M., Dagutan I., Bowman M.K., Bakirov M.M., Schwartz R.N.: *J. Phys. Chem. Letters* **13**, 10952–1057 (2022)
17. Salikhov K.M., Bakirov M.M., Zaripov R.B., Khairutdinov I.T.: *Phys. Chem. Chem. Phys.* **25**, 17966 (2023)
18. Салихов К.М., Бакиров М.М., Зарипов Р.Б., Хайрутдинов И.Т.: Экспериментальное подтверждение образования спинового поляритона в разбавленных растворах нитроксильных радикалов. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского. Ежегодник **22**, 66–72 (2023)
19. Bales B.L., Peric M., Schwartz R.N.: *J. Phys. Chem. Letters* (2024)

ЭПР-исследование содержания оксида азота в спинном мозге крыс через семь суток после сочетанной травмы головного и спинного мозга

В. В. Андрианов, Л. В. Базан, А. И. Арсланов, Х. Л. Гайнутдинов

Лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Методом ЭПР-спектроскопии было показано, что через семь суток после сочетанной травмы головного и спинного мозга продукция NO в отделе спинного мозга, находящемся рострально по отношению к области с очагом травмы, достоверно снижается на 60%. В то время как в травмированном участке (в очаге травмы) спинного мозга и в отделе спинного мозга каудальнее травмы продукция NO изменяется недостоверно с тенденцией к снижению.

EPR study of nitric oxide content in the spinal cord of rats seven days after combined brain and spinal cord injury

V. V. Andrianov, L. V. Bazan, A. I. Arslanov, Kh. L. Gainutdinov

Laboratory of spin physics and spin chemistry

EPR spectroscopy showed that seven days after combined brain and spinal cord injury, NO production in the spinal cord significantly decreased by 60% in the region located rostral to the area with the injury focus. While in the injured area (in the injury site) of the spinal cord and in the spinal cord caudal to the injury, NO production changes unreliably with a tendency to decrease.

Введение

В последние годы появилось много фактов, свидетельствующих о том, что изменение биосинтеза оксида азота (II) (NO) и, возможно, изменение его содержания в организме, являются одними из ключевых факторов в патофизиологическом ответе мозга на гипоксию-ишемию [1–3], а также при травмах головного и спинного мозга [4, 5]. При ишемии, кровоизлиянии, травмах головного или спинного мозга нарушаются метаболические процессы и функционирование нейромедиаторных систем, включая систему NO. В итоге развиваются фазные патологические процессы, ведущие к нарушению целостности нервных и глиальных клеток, а также разрушению межклеточного матрикса и повреждению кровеносных сосудов [6].

NO участвует не только в физиологических процессах, но и в механизмах развития различных патологических состояний организма. Он включается в механизмы вторичной травмы спинного мозга (СМ) [7], когда активные формы кислорода и азота инициируют процессы вторичного повреждения [8]. Имеющиеся противоречивые сведения позволяют утверждать, что в настоящее время нет единого мнения о роли эндоген-

ного NO в процессах, протекающих при повреждениях нервной системы [9]. Церебральная ишемия вызывает множественные и разнонаправленные изменения содержания NO в мозге и в передаче сигналов [10, 11]. Двойственность механизмов действия NO определяется количеством NO, остротой, характером и фазностью патологических процессов в мозге и многими другими факторами, требующими углублённых исследований [4]. Таким образом, одной из перспективных мишеней для терапевтических вмешательств при травмах спинного и головного мозга выступает система NO. Роль NO на разных этапах травматической болезни СМ зависит от диапазона концентрации, типа клетки-источника и среды, в которой был получен NO [2, 12, 13].

Целью данной работы было исследование методом ЭПР-спектроскопии интенсивности продукции NO в разных отделах СМ крыс при моделировании сочетанной травмы головного и спинного мозга. Эти исследования проводились коллективом, в котором участвовали также сотрудники Института физиологии НАН Беларуси проф. В. А. Кульчицкий, А. В. Нагибов и сотрудники Казанского федерального университета Г. Г. Яфарова, И. Б. Дерябина, Т. Х. Богодвид, Д. И. Силантьева.

Материалы и методы исследования

Эксперименты проводили на белых беспородных крысах. Формирование сочетанной травмы головного и спинного мозга производили в Институте физиологии НАН Беларуси, г. Минск (первая серия экспериментов) и в НИЛ нейромодуляции Института фундаментальной медицины и биологии Казанского федерального университета (вторая серия экспериментов) в соответствии с утверждённым протоколом комиссии Института по этике. Животных содержали в стандартных условиях вивария (с поддержанием 12/12-часового ритма освещения и темноты, температуры воздуха на уровне 23 ± 1 °C и стабильной приточно-вытяжной вентиляции) при свободном доступе к воде и пище (*adlibitum*) и одинаковом рационе питания в соответствии с нормами содержания лабораторных животных. Все операционные процедуры проводили на наркотизированных животных (55.6 мг/кг кетамина, 5.5 мг/кг ксилазина, 1.1 мг/кг ацепромазина, внутривенно) [14].

Протокол эксперимента описан нами ранее [15]. У наркотизированных лабораторных крыс после формирования хирургического доступа к тканям мозга осуществляли локальное разрушение участков мозга – сначала головного, затем (через 3–4 мин) спинного. Травма головного мозга осуществлялась стилетом в прецентральной области левого полушария на глубину 2 мм с формированием поверхностной области травмы площадью 1×1 мм². На следующем этапе продолжали проводить операцию, но уже на уровне поясничного отдела СМ. Стилетом осуществляли локальное разрушение участка СМ на уровне первого поясничного позвонка (L1). Через неделю (семь суток) после операции извлекали ткани трёх участков СМ (по 100–150 мг): 1) в месте локализации травмы ($n = 5$), 2) ростральнее (“выше”) травмы ($n = 5$), 3) кадуальнее (“ниже”) травмы ($n = 5$). Контрольная группа животных ($n = 5$) не подвергалась хирургическим вмешательствам. Компоненты спинной ловушки для оксида азота (ДЭТК-Na, FeSO₄, sodium citrate) вводили животным за 40 мин до извлечения исследуемых тканей. Ткани извлекались также под наркозом [14, 16], образцы сразу замораживались при температуре жидкого азота. Фрагменты тканей хранились и перевозились из Минска в Казань при температуре жидкого азота.

Измерения интенсивности продукции NO методом ЭПР-спектроскопии [17] производились в Казанском физико-техническом институте ФИЦ КазНЦ РАН. Метод ЭПР-спектроскопии с использованием методики спинных ловушек позволяет детектировать NO в малых концентрациях [18–20]. Авторы определения NO методом спинных ловушек (А. Ф. Ванин и др.) предложили применение сверхвысоких концентраций NO-ловушек в клетках и тканях [17, 18]. Такой подход позволяет измерить максимальное количество NO, однако влечёт за собой значительные нарушения в клеточном метаболизме [18, 21]. Нами в качестве спинной ловушки был применён комплекс Fe²⁺ с диэтилдитиокарбаматом – (ДЭТК)₂-Fe²⁺.

Для формирования спинной ловушки внутривенно вводили ДЭТК-Na в дозе 500 мг/кг (в объёме 2 мл воды на 300 г веса животного). Далее смесь растворов сульфата железа (FeSO₄·7H₂O, Sigma, USA) в дозе 37.5 мг/кг и цитрата натрия в дозе 187.5 мг/кг (в объёме 1.5 мл воды на 300 г веса животного), приготовленную непосредственно перед введением, вводили подкожно в три точки – правое и левое бедро и в ростральную часть межлопаточной области]. Все компоненты вводили животным за 40 мин до извлечения исследуемых тканей. Комплекс спинной ловушки с NO ((ДЭТК)₂-Fe²⁺-NO) в замороженном состоянии хорошо сохраняется, и сигнал от комплекса не изменяется в течение не менее месяца [22]. Измерения спектров комплекса биологических образцов (ДЭТК)₂-Fe²⁺-NO проводили на спектрометре EMX/plus фирмы Брукер X-диапазона (9.5320 ГГц). Образец в пальчиковом Дьюаре фирмы Брукер помещали в полость двойного резонатора (ER 4105DR) при частоте модуляции магнитного поля 100 кГц, амплитуды модуляции 2 Гс, мощности СВЧ-излучения 2 мВт, временной константе 327 мс и температуре 77 К. Амплитуда модуляции, усиление и мощность СВЧ во всех экспериментах подбирались с условием отсутствия перемодуляции и насыщения сигнала ЭПР и сохранялись одинаковыми на протяжении всех измерений. Эталонный образец помещался в другую полость того же резонатора. Так как каждый исследуемый образец находился в одинаковых условиях с эталонным образцом, это позволяло определять относительные удельные интенсивности исследуемых образцов и в последующем сравнивать их друг с другом. Амплитуду спектров ЭПР нормировали на вес образца [2].

При статистической обработке получали среднее значение измеряемой величины и стандартную ошибку среднего $M \pm SEM$. С применением t-критерия Стьюдента и U-критерия Манна-Уитни [23] проверяли достоверность отличия средних значений уровней NO у контрольных крыс и у крыс после моделирования травм головного и спинного мозга. Различия считали значимыми при $p < 0.05$.

Результаты исследования и обсуждение

Были получены спектры ЭПР образцов СМ, по которым определяли относительную удельную интенсивность сигнала от NO в составе спинной ловушки ((ДЭТК)₂-Fe²⁺-NO), характеризующую интенсивность продукции NO в разных отделах СМ после сочетанной травмы головного и спинного мозга. В области магнитного поля от 330 до 337 мТл наблюдается сигнал от комплекса спинной ловушки с NO (ДЭТК)₂-Fe²⁺-NO, который характеризуется распознаваемым спектром ЭПР со значением g-фактора $g = 2.038$ и тремя компонентами сверхтонкой структуры [15, 18, 19]. Для (ДЭТК)₂-Fe²⁺-NO мы определяли g-фактор по точке, где первая производная центральной компоненты сверхтонкой структуры пересекается с нулевой линией фонового сигнала. В наблюдаемом диапазоне магнитного поля присутствует также сигнал ЭПР от комплекса

Cu^{2+} -(ДЭТК)₂ со значением g-фактора 2.04, который приводит к наложению сигналов в области $g = 2.038$. Как известно, спектр этого комплекса расщеплён на четыре компоненты СТС [24].

Относительную интенсивность сигналов от комплексов (ДЭТК)₂-Fe²⁺-NO и Cu^{2+} -(ДЭТК)₂ в наблюдаемом спектре образца определяли последовательно. Сначала определяли относительную интенсивность спектра ЭПР комплекса Cu^{2+} -(ДЭТК)₂ по амплитуде его крайней высокополевой компоненты сверхтонкой структуры (по разнице между минимумом и максимумом первой производной линии поглощения) [25, 26]. Затем из спектра ЭПР образца вычитали спектр ЭПР комплекса Cu^{2+} -(ДЭТК)₂ с определённой таким образом амплитудой. Таким способом избавлялись от вклада сигнала от комплекса Cu^{2+} -(ДЭТК)₂ в области, где наблюдается сигнал от комплекса (ДЭТК)₂-Fe²⁺-NO. Затем относительную интенсивность сигнала от комплекса (ДЭТК)₂-Fe²⁺-NO определяли по его крайним компонентам сверхтонкой структуры (три линии в области $g = 2.038$) – по разности между максимумом первой производной линии поглощения низкополевой компоненты и минимумом первой производной линии поглощения высокополевой компоненты). На рис. 1 показаны сигнал от исходного образца СМ интактной крысы, а также отдельно показаны сигналы от комплексов (ДЭТК)₂-Fe²⁺-NO и Cu^{2+} -(ДЭТК)₂ с амплитудами, определёнными таким образом.

На рис. 2 показаны спектры ЭПР тканей СМ контрольной крысы (вверху), а также крысы через 7 суток после сочетанной травмы головного и спинного мозга (внизу). Сплошной жирной линией представлен спектр образца, тонкая линия – сигнал от оксида азота, связан-

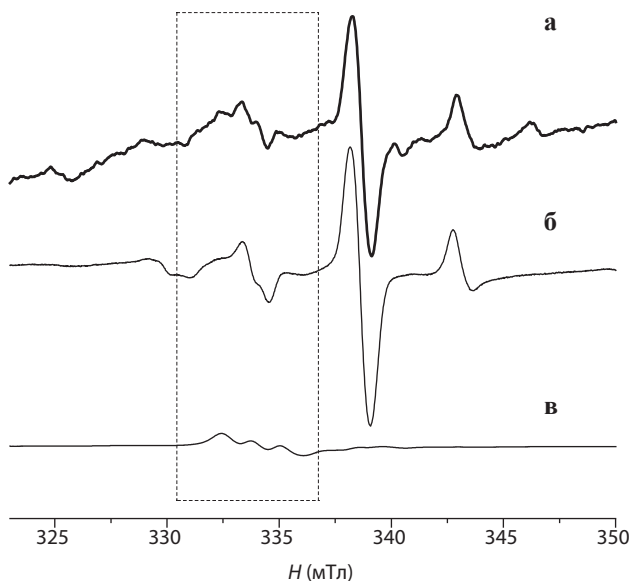


Рис. 1. Определение величины сигнала (ДЭТК)₂-Fe²⁺-NO в спектре ЭПР ткани СМ. Жирной линией (а) представлен спектр образца, тонкие линии ниже – сигналы от комплексов Cu^{2+} -(ДЭТК)₂ (б) и (ДЭТК)₂-Fe²⁺-NO (в). Рамкой показана область трёх линий сигнала (ДЭТК)₂-Fe²⁺-NO в районе $g = 2.038$. Спектры регистрировались при 77 К.

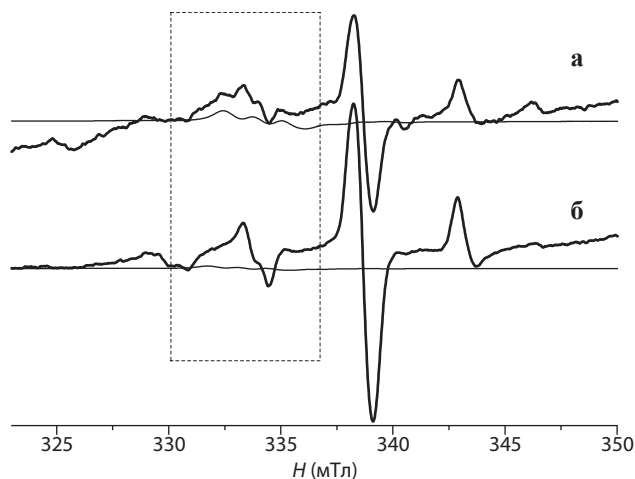


Рис. 2. Примеры спектров ЭПР тканей спинного мозга взятых ро-стральнее очага травмы СМ у контрольной крысы (а) и у крысы через 7 суток после сочетанной травмы (б). Жирной линией представлен спектр образца, тонкая линия – сигнал от комплекса (ДЭТК)₂-Fe²⁺-NO. Рамкой показана область сигнала (ДЭТК)₂-Fe²⁺-NO в районе $g = 2.038$. Спектры регистрировались при 77 К.

ного со спиновой ловушкой, в составе спектра комплекса (ДЭТК)₂-Fe²⁺-NO), с амплитудой, равной его вкладу в спектр образца. Было определено, что в исследуемых трёх участках СМ интактных животных (место травмы, отделы “выше” и “ниже” травмы) содержание NO достоверно не отличалось. Через 7 суток после моделирования сочетанной травмы головного и спинного мозга наблюдалось недостоверное снижение продукции NO в травмированном отделе СМ (в отделе СМ, содержащем очаг травмы) и в отделе ниже травмы СМ (рис. 3). В то же время в отделе ро-стральнее травмы СМ наблюдается

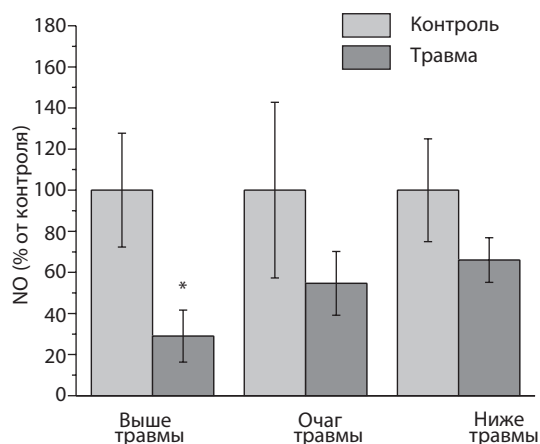


Рис. 3. Изменение содержания NO в тканях разных участков СМ по отношению к локализации травмы (в очаге травмы, ро-стральнее (“выше”) и каудальнее (“ниже”) очага травмы) через 7 суток после сочетанной травмы головного и спинного мозга. * – Отличие от контроля (t-test, $p < 0.05$). Ось ординат – интегральная относительная интенсивность сигнала комплекса (ДЭТК)₂-Fe²⁺-NO в спектрах образцов (в процентах относительно содержания в соответствующем отделе мозга контрольной группы).

достоверное снижение продукции NO на 60% ($p < 0.05$). Таким образом показано, что сочетанная травма головного и спинного мозга сопровождается снижением продукции NO в отделе СМ, находящемся роstralнее (“выше”) участка СМ, где был сформирован очаг травмы.

Таким образом, полученные нами результаты показывают, что сочетанная травма головного и спинного мозга приводит к различным по величине последствиям в содержании NO в различных отделах СМ относительно очага травмы. Это может свидетельствовать о важной роли центральной регуляции в восстановительных процессах нервной системы после повреждений, и, в свою очередь, может иметь важное значение для внедрения принципиально новых эффективных терапевтических и реабилитационных стратегий при патологии СМ [14, 27].

Литература

- Garry P.S., Ezra M., Rowland M.J., Westbrook J., Pattinson K.T.: *Exp. Neurol.* **263**, 235–243 (2015)
- Andrianov V.V., Kulchitsky V.A., Yafarova G.G., Zamaro A.S., Tokalchik Y.P., Bazan L.V., Bogodvid T.K., Iyudin V.S., Pashkevich S.G., Dosina M.O., Gainutdinov Kh.L.: *Appl. Magn. Reson.* **52**, no. 11, 1657–1669 (2021)
- Wierónska J.M., Ciéslik P., Kalinowski L.: *Biomolecules* **11**, no. 8, 1097 (2021)
- Яфарова Г.Г., Андрианов В.В., Ягудин Р.Х., Шайхутдинов И.И., Гайнутдинов Х.Л.: *Бюлл. экпер. биол. мед.* **162**, № 9, 295–299 (2016)
- Andrianov V.V., Yafarova G.G., Pashkevich S.G., Tokalchik Y.P., Dosina M.O., Zamaro A.S., Bogodvid T.K., Iyudin V.S., Bazan L.V., Denisov A.A., Kulchitsky V.A., Gainutdinov Kh.L.: *Appl. Magn. Reson.* **51**, no. 4, 375–387 (2020)
- Lundberg J.O.; Weitzberg E.: *Cell* **185**, 2853–2878 (2022)
- Kundi S., Bicknel R., Ahmeda Z.: *Neurosci. Res.* **76**, 1–9 (2013)
- Шлапакова Т.И., Костин Р.К., Тягунова Е.Е.: *Биоорганическая химия* **46**, № 5, 466–485 (2020)
- Calabrese V., Mancuso C., Calvani M., Rizzarelli E., Butterfield D.A., Stella A.M.G.: *Nature Rev. Neurosci.* **8**, 767–775 (2007)
- Terpolilli N.A., Moskowitz M.A., Plesnila N.J.: *Cerebral Blood Flow & Metabolism* **32**, no. 7, 1332–1346 (2012)
- Salykina M.A., Sorokina E.G., Krasilnikova I.A., Reutov V.P., Pine-lis V.G.: *Bull. Exp. Biol. Med.* **155**, no. 1, 40–43 (2013)
- Tardivo V., Crobeddu E., Pilloni G., Fontanella M., Spena G., Panciani P., Berjano P., Ajello M., Bozzaro M., Agnoletti A., Altieri R., Fiumefreddo A., Zenga F., Ducati A., Garbossa D.: *Intern. J. Neurosci.* **125**, no. 2, 81–90 (2015)
- Deryagin O.G., Gavrilova S.A., Gainutdinov Kh.L., Golubeva A.V., Andrianov V.V., Yafarova G.G., Buravkov S.V., Koshelev V.B.: *Front. Neurosci.* **11**, 427 (2017)
- Shanko Y., Zamaro A., Takalchik S.Y., Koulchitsky S., Pashkevich S., Panahova E., Navitskaya V., Dosina M., Denisov A., Bushuk S., Kulchitsky V.: *Biomed. J. Sci. Tech. Res.* **7**, no. 5, MS.ID.001567 (2018)
- Базан Л.В., Андрианов В.В., Арсланов А.И., Силантьева Д.И., Богодвид Т.Х., Яфарова Г.Г., Дерябина И.Б., Муранова Л.Н., Нагибов А.В., Рубахова В.М., Федорова Е.В., Филипович Т.А., Кульчицкий В.А., Гайнутдинов Х.Л.: *Журнал технической физики* **94**, № 10, 1756–1764 (2024)
- Chari A., Hentall I.D., Papadopoulos M.C., Pereira E.A.C.: *Brain Sci.* **7**, 18 (2017)
- Микоян В.Д., Кубрина Л.Н., Ванин А.Ф.: *Биофизика* **39**, 915–918 (1994)
- Vanin A.F., Huisman A., Van Faassen E.E.: *Methods in Enzymology* **359**, 27–42 (2003)
- Hogg N.: *Free Radical Biology & Medicine* **49**, 122–129 (2010)
- Яфарова Г.Г., Андрианов В.В., Базан Л.В., Иудин В.С., Гайнутдинов Х.Л.: ЭПР-исследование содержания оксида азота и меди в гиппокампе крыс после геморрагического инсульта и травмы головного мозга. *Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского, Ежегодник* **21**, 40–43 (2022)
- Гайнутдинов Х.Л., Андрианов В.В., Иудин В.С., Юртаева С.В., Яфарова Г.Г., Файзуллина Р.И., Ситдилов Ф.Г.: *Биофизика* **58**, № 2, 276–280 (2013)
- Andrianov V.V., Pashkevich S.G., Yafarova G.G., Denisov A.A., Iyudin V.S., Bogodvid T.Kh., Dosina M.O., Kulchitsky V.A., Gainutdinov Kh.L.: *Appl. Magn. Reson.* **47**, no. 9, 965–976 (2016)
- Лакин Г.Ф.: *Биометрия*, 113 с. М.: Высшая школа, 1990.
- Jakubowska M.A., Pyka J., Michalczyk-Wetula D., Baczyński K., Cieśla M., Susz A., Ferdek P.E., Plonka B.K., Fiedor L., Plonka P.M.: *Redox Biol.* **34**, 101566 (2020)
- Plonka P.M., Chlopicki S., Wisniewska M., Plonka B.K.: *Acta Biochimica Polonica* **50**, no. 3, 807–813 (2003)
- Suzuki Y., Fujii S., Tominaga T., Yoshimura T., Kamada H.: *Biochim. Biophys. Acta* **1335**, 242–245 (1997)
- Andrianov V.V., Kulchitsky V.A., Yafarova G.G., Bazan L.V., Bogodvid T.K., Deryabina I.B., Muranova L.N., Silantjeva D.I., Arslanov A.I., Paveliev M.N., Fedorova E.V., Filipovich T.A., Nagibov A.V., Gainutdinov Kh.L.: *Molecules* **28**, no. 21, 7359 (2023)

Особенности применения гауссова импульса для измерения времени фазовой релаксации в многоимпульсной последовательности

Р. Б. Зарипов, И. Т. Хайрутдинов

Лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Проведено моделирование сигналов спинного эха от последовательности пяти гауссовых импульсов. Задержки между импульсами подобраны так, чтобы выделить моменты времени формирования первичного спинного эха и его рефокусированных сигналов от всех остальных сигналов эха. Это позволяет облегчить нахождение в эксперименте времени фазовой релаксации T_2 по спаду амплитуды сигналов первичного эха и его рефокусировок, так как они релаксируют только со временем T_2 . Численной аппроксимацией получены эффективные углы поворота гауссова импульса по аналогии с углом поворота неселективного импульса в зависимости от амплитуды СВЧ-поля.

Features of the application of a Gaussian pulse for measuring the phase relaxation time in a multi-pulse sequence

R. B. Zaripov, I. T. Khairutdinov

Laboratory of spin physics and spin chemistry

The simulation of spin echo signals from a sequence of five Gaussian pulses was performed. The delays between the pulses were selected so as to isolate the moments of time of formation of the primary spin echo and its refocused signals from all other echo signals. This makes it easier to find the phase relaxation time T_2 in the experiment based on the decay of the amplitude of the refocused echo signals, since their relaxation process depends only on time T_2 . The effective rotation angles of the Gaussian pulse were obtained by numerical approximation by analogy with the rotation angle of a non-selective pulse depending on the microwave field amplitude.

Введение

При проведении операций квантовой информатики важно наличие достаточно долгой квантовой памяти. В качестве носителей информации можно использовать квантовые состояния ядерных и электронных спинов. На практике эти состояния сохраняются лишь определённое время из-за присутствия процессов релаксации. Эти процессы вызваны взаимодействием спинов с окружающей средой либо друг с другом. Связанные с этими взаимодействиями потери квантовой информации называются “декогеренцией”. Возможность манипулирования спиновой системой способом, при котором минимизируется вредное взаимодействие с окружением, позволяет сохранять квантовые состояния длительное время. При этом важно уметь достаточно точно оценивать время декогеренции спинов для оценки качества их как единиц квантовой памяти.

Селективный и неселективный импульс

Метод спинного эха является распространённым для определения времени фазовой релаксации T_2 . Первичное

эхо (ПЭ) образуется двумя импульсами, разделёнными интервалом времени τ , и наблюдается в момент времени 2τ . Процесс уменьшения амплитуды ПЭ с увеличением τ характеризует необратимую расфазировку прецессии спина и спиновую декогеренцию. Этот процесс позволяет определить характерное время T_2 спиновой когерентности. Однако на практике на затухание сигналов эха влияют процессы спектральной диффузии, из-за которых измеряемое время T_2 становится меньше. Многоимпульсные последовательности такие как последовательность Карра-Парселла-Мейбума-Гилла (КПМГ) рефокусируют много раз одну и ту же стартовую когерентность, что минимизирует вклад спектральной диффузии [1–5]. В этом протоколе первый возбуждающий 90° -ый импульс направлен вдоль оси X . Рефокусирующие импульсы в идеале имеют угол поворота 180° и приложены вдоль оси Y . Теоретически рефокусирующие импульсы должны восстанавливать сигнал ПЭ с несколько меньшей амплитудой, которая падает из-за спин-спиновой релаксации. По спаду этой амплитуды можно определить время T_2 . В экспериментах импульсного ЭПР из-за недостаточно полного возбуждения спектра в моменты наблюдения рефокусированных сигналов ПЭ появляются другие

сигналы, амплитуда которых зависит ещё и от времени спин-решёточной релаксации T_1 [6–8]. Эти нежелательные сигналы можно отделить от рефокусируемых сигналов ПЭ циклированием или же просто отделив по моментам времени, подбирая специальным образом задержки между импульсами [3–5]. Однако даже после такого выделения сигналы рефокусируемых ПЭ релаксируют в экспериментах ЭПР несколько быстрее, чем с характерной скоростью $1/T_2$. Это происходит из-за селективности рефокусирующих импульсов. Нельзя сказать, что каждый импульс рефокусирует все спины спектра, то есть угол его поворота меньше 180° .

Существует значительная разница между неселективными и селективными импульсами. Импульс считается неселективным при выполнении условий: $2\pi\nu_1 \gg \Delta\Omega$ и $\Delta\Omega t_p \ll 1$, где $\Delta\Omega$ – неоднородное уширение спектра в единицах частоты, t_p – длительность импульса и ν_1 является частотой Раби. Неселективный импульс вращает все спины системы независимо от их резонансной частоты под одинаковым углом $\varphi = 2\pi\nu_1 t_p$. Значения углов поворота импульса $\varphi < \pi$ приводят к тому, что в момент наблюдения появляется суперпозиция различных сигналов эха. В случае селективных импульсов φ зависит ещё от резонансной частоты спина. Следовательно, при $2\pi\nu_1 \lesssim \Delta\Omega$ селективные импульсы всегда приводят к суперпозиции сигналов эха в момент наблюдения. В спектроскопии ЯМР часто технически возможно выполнить вышеуказанные условия и реализовать неселективное возбуждение спинов импульсами. В ЭПР-спектроскопии возбуждение спинов СВЧ-импульсами обычно является селективным по частоте [7]. Такая суперпозиция сигналов затрудняет определение значения времени T_2 при использовании протокола КПМГ [2, 9].

В данной работе в ходе моделирования выделены три сигнала рефокусируемого ПЭ методом разделения по моментам времени. Из-за селективности импульсов по частоте полного восстановления амплитуды ПЭ не происходит даже при отсутствии процессов релаксации. Эта неполная рефокусировка сигнала ПЭ подталкивает к введению эффективного угла поворота импульса $\varphi_{\text{эф}}$, значение которого зависит от соотношения $\Delta\Omega$ и ν_1 .

Методика численного расчёта

Начальную матрицу плотности ρ_0 в высокотемпературном приближении с точностью до постоянного множителя можно принять как $\rho_0 = S_z$ [9]:

$$\rho_0 = \begin{pmatrix} 1/2 & 0 \\ 0 & -1/2 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Спин-гамильтониан во время действия неселективного импульса поворота вокруг осей X , Y имеет вид:

$$\hat{\mathcal{H}}_{IX,Y} = (\omega_0 - \omega)S_z + \omega_1 S_{X,Y}, \quad (2)$$

где $\omega_1 = 2\pi\nu_1$, ω_0 – зеемановская частота прецессии спина, ω – несущая частота СВЧ импульса.

Спин-гамильтониан свободной эволюции спина представляет собой вращение вокруг оси Z , вдоль которой направлено постоянное магнитное поле, и не включает в себя процессы релаксации:

$$\hat{\mathcal{H}}_0 = \omega_0 S_z. \quad (3)$$

Оператор действия импульса

$$U_{X,Y}(t_p) = \exp(-i\hat{\mathcal{H}}_{IX,Y}t_p). \quad (4)$$

Оператор свободной эволюции

$$F(\tau) = \exp(-i\hat{\mathcal{H}}_0\tau), \quad (5)$$

где τ – время свободной эволюции.

Состояние системы ρ после действия пяти импульсов может быть описано выражением:

$$\rho = F(\tau_5)U_Y(t_p)...F(\tau_2)U_Y(t_p)F(\tau_1)U_X(t_{p0}) \times \\ \rho_z U_X^\dagger(t_{p0})F^\dagger(\tau_1)U_Y^\dagger(t_p)F^\dagger(\tau_2)...U_Y^\dagger(t_p)F^\dagger(\tau_5), \quad (6)$$

где τ_i – времена свободной эволюции, t_{p0} – время действия первого импульса, t_p – время действия рефокусирующего импульса.

Сигнал эха в нужный момент времени определяется выражением:

$$\text{Sig} = \text{Sp}[\rho S_Y]. \quad (7)$$

Параметры численного моделирования

В качестве линии спектра ЭПР был выбран гауссов контур с довольно типичной шириной $\Delta B = \Delta\Omega/\gamma = 6.6$ Гс на половине высоты. Усреднение сигналов по параметру ω_0 проводилось согласно этому гауссовому распределению. Число точек по контуру бралось от 40000 и более. Амплитуда действующих импульсов B_{1t} тоже задавалась в виде гауссовой кривой, зависящей от времени:

$$B_{1t} = B_1 \exp[-(t - t_0)^2/\delta t^2], \quad (8)$$

где δt определяет длительность действия импульса, t_0 – время действия, B_1 – максимальную амплитуду по времени. Были рассчитаны 4 показательных случая: слабого возбуждения спектра $B_1 = 2\pi\nu_1/\gamma = 0.3$ Гс ($B_1 \ll \Delta B$), неполного возбуждения $B_1 = 1$ Гс ($B_1 < \Delta B$), почти полного возбуждения $B_1 = 10$ Гс ($B_1 \approx \Delta B$) и практически полного возбуждения $B_1 = 100$ Гс ($B_1 \gg \Delta B$). При этом для инвертирующих импульсов параметр δt подбирался, исходя из условия:

$$\int \gamma B_1 \exp(-t^2/\delta t^2) dt = \pi. \quad (9)$$

Расчёты были также проведены с прямоугольными импульсами с таким же набором B_1 . Условие эффективности возбуждения в случае прямоугольных импульсов имело вид:

$$\gamma B_1 t_p = \pi. \quad (10)$$

Обсуждение результатов моделирования

На рис. 1 показаны результаты моделирования сигналов эха от пяти СВЧ-импульсов при различных величинах амплитуды СВЧ-импульсов B_1 при фиксированной ширине спектра ΔB . Релаксация в расчётах не учитывалась. Это означает, что в случае идеальных СВЧ-импульсов должна происходить полная рефокусировка ПЭ и амплитуда сигналов не должна уменьшаться после каждого следующего импульса. Вариацией методом наименьших квадратов были найдены φ_{eff} для неселективных импульсов, амплитуды сигналов которых оптимально описывают амплитуды сигналов от селективных импульсов.

Из рис. 1г видно, что при $B_1 = 100$ Гс импульсы можно считать практически идеальными для заданной ширины спектра $\Delta B = 6.6$ Гс. В этом случае φ_{eff} довольно близок к значению 180° . Далее при уменьшении B_1 до величины примерно равной ΔB появляются сигналы других эхо в других моментах времени. Их величина возрастает на фоне сигналов ПЭ по мере уменьшения B_1 (см. рис. 1б, в). Угол φ_{eff} также уменьшается. Видно, что сигналы рефокусированных ПЭ из-за неполной рефокусировки визуально спадают со временем и без процесса релаксации. Это связано с тем, что намагниченность уходит в другие сигналы. В случае $B_1 = 0.3$ Гс происходит уширение всех сигналов эха, наложение сигналов свободной индукции на сигналы эха, что затрудняет усреднение при расчёте. Наложения сигналов свободной индукции можно избежать, если увеличивать задержки между импульсами. Но при этом надо учитывать, что сигналы ПЭ могут просто исчезнуть, если время фазовой релаксации слишком короткое по сравнению с интервалом между импульсами.

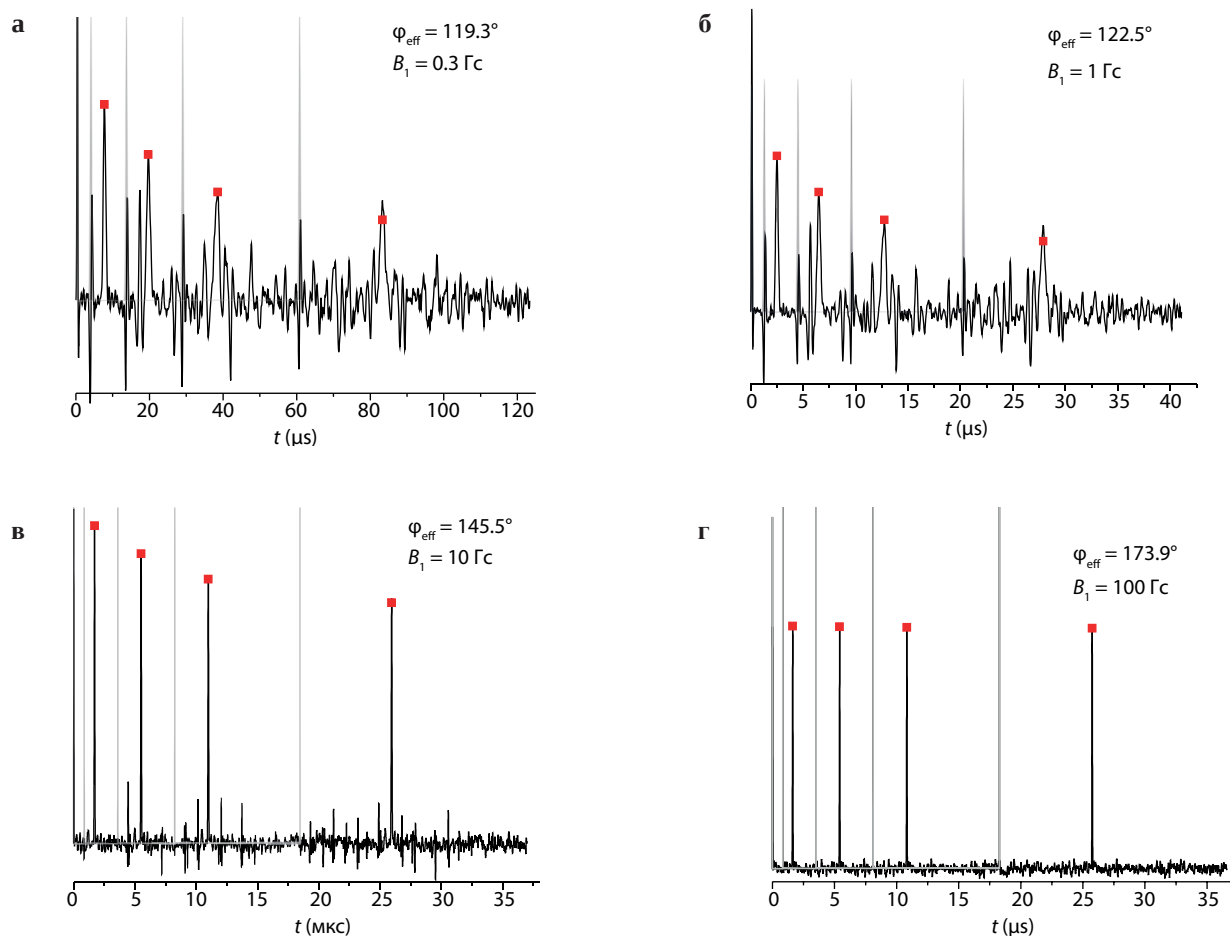


Рис. 1. Моделирование сигналов эха после действия пяти СВЧ-импульсов с гауссовой формой (показаны серым цветом). Квадратами отмечены амплитуды рефокусированных сигналов ПЭ от неселективных импульсов с углом поворота φ_{eff} , найденные вариацией относительно амплитуд рассчитанных сигналов методом наименьших квадратов. Амплитуды первого сигнала ПЭ полагались одинаковыми.

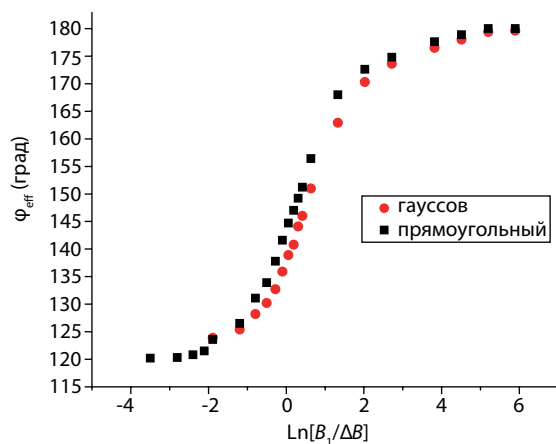


Рис. 2. Численно найденная кривая зависимости φ_{eff} для гауссовых и прямоугольных импульсов в зависимости от отношения амплитуды СВЧ-импульсов B_1 и неоднородной ширины спектра ΔB .

На рис. 2 показаны зависимости φ_{eff} при различных соотношениях между B_1 и ΔB . Расчёты проведены как для гауссовских импульсов, так и СВЧ-импульсов прямоугольной формы. Ожидается, при максимальных значениях B_1 угол φ_{eff} стремится к предельному значению 180° . При минимальных B_1 он должен стремиться к 0, но этого не происходит. Это связано с тем, что в этой области приближение амплитуд сигналов ПЭ от неселективных импульсов не работает (см. рис. 1а, б). В этом случае можно считать, что φ_{eff} стремится к значению 120° . Такая неполная рефокусировка ПЭ из-за неидеальности импульсов приводит к занижению оценки времени T_2 на 20–30% в рамках заданного диапазона параметров моделирования. При этом следует отметить, что прямоугольные импульсы демонстрируют несколько большую эффективность рефокусирующего действия, их φ_{eff} на несколько процентов выше.

Выводы

Проведено моделирование сигналов рефокусированных ПЭ от последовательности пяти СВЧ-импульсов гауссовой и прямоугольной формы для достаточно типичной ширины спектра ЭПР $\Delta B = 6.6$ Гс при широком диапазоне значений амплитуды СВЧ-импульсов B_1 . Показано, что происходит неполная рефокусировка сигналов ПЭ, что приводит к уменьшению их амплитуды после каждого следующего импульса. Такое уменьшение приводит к занижению оценки времени фазовой релаксации. С помощью параметра φ_{eff} была оценена эффективность рефокусирующего действия селективных импульсов. Кривая для параметра φ_{eff} может быть использована в качестве калибровочной кривой для амплитуд сигналов ПЭ для более точной оценки времени T_2 .

Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-72-10063, <https://rscf.ru/project/22-72-10063/>.

Литература

1. Carr H.Y., Purcell E.M.: Phys. Rev. **94**, 630 (1954)
2. Meiboom S., Gill D.: Rev. Sci. Instrum. **29**, 688 (1958)
3. Зарипов Р.Б., Хайрутдинов И.Т., Салихов К.М.: Химическая физика **40**, 38 (2021)
4. Зарипов Р.Б., Вавилова Е.Л., Салихов К.М., Катаев В.Е.: Проявление квантового эффекта Зенона в импульсных экспериментах ЭПР в системе биядерных комплексов марганца. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2013. Ежегодник, с. 24–28. Казань: ФизтехПресс, 2014.
5. Зарипов Р.Б., Хайружидинов И.Т., Вавилова Е.Л., Воронкова В.К., Салихов К.М., Катаев В.Е.: Модификация протокола Карра-Парселла-Мейбума-Гилла для измерения времён фазовой релаксации. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2017. Ежегодник, с. 29–31. Казань: ФизтехПресс, 2018.
6. Kandrashkin Yu.: J. Magn. Reson. **352**, 107464 (2023)
7. Kurshev V.V., Raitsimring A.M.: J. Magn. Reson. **88**, 126 (1990)
8. Зарипов Р.Б., Хайружидинов И.Т.: Методика использования трёх-импульсного протокола Карра-Парселла-Мейбума-Гилла для измерения времён фазовой релаксации. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2018. Ежегодник, с. 47–50. Казань: ФизтехПресс, 2019.
9. Салихов К.М., Семенов А.Г., Цветков Ю.Д.: Электронное спиновое эхо и его применение. Новосибирск: Наука, 1976.

Магнитные свойства $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$

И. В. Яцык, Р. М. Еремина, Р. Ф. Ликеров, Р. Г. Батулин¹

Лаборатория спиновой физики и спиновой химии, лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков

¹ Казанский федеральный университет

Проведены измерения спектров магнитного резонанса керамики $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$ в широком температурном диапазоне. При температурах ниже 250 К в $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$ наблюдается изменение формы линии спектра магнитного резонанса, при дальнейшем понижении температуры линия делится на три, что свидетельствует о фазовом расслоении в образце. По значению температуры, при которой наблюдается максимум в температурной зависимости обратной интегральной интенсивности сигналов, определены температуры фазовых переходов в упорядоченное состояние в спиновых подсистемах 197 и 165 К. Из температурной зависимости восприимчивости определены значения температуры Кюри-Вейсса $\theta = -764$ К и эффективного магнитного момента, равного $5.38\mu_B$, что указывает на антиферромагнитный характер обменных взаимодействий между ионами кобальта со спином $5/2$ и $3/2$.

Magnetic properties of $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$

I. V. Yatsyk, R. M. Eremina, R. F. Likеров, R. G. Batulin¹

Laboratory of spin physics and spin chemistry, Laboratory of radiospectroscopy of dielectrics

¹ Kazan Federal University

The magnetic resonance spectra of ceramics $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$ have been measured in a wide temperature range. At temperatures below 250 K in $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$ a change in the shape of the magnetic resonance spectrum line is observed; with a further decrease in temperature, the line is divided into three, which indicates a phase separation in the sample. The temperatures of phase transitions to an ordered state in spin subsystems at 197 and 165 K are determined from the temperature at which the maximum in the temperature dependence of the inverse integral intensity of the signals is observed. The values of the Curie-Weiss temperature $\theta = -764$ K and the effective magnetic moment equal to $5.38\mu_B$ were determined from the temperature dependence of the susceptibility, which indicates the antiferromagnetic nature of the exchange interactions between cobalt ions with spin $5/2$ and $3/2$.

Введение

В последние несколько лет учёные проявляют огромный интерес к высокоэнтропийным соединениям типа перовскитов, в которых твёрдые растворы образуются из пяти или более элементов в относительно равных концентрациях, поскольку могут стабилизироваться за счёт высокой энтропии смешивания. Свойства таких материалов сильно зависят от кристаллической структуры. Высокоэнтропийные соединения имеют широкий спектр применения [1, 2], включая сенсоры [3], катализаторы [4], а также некоторые из них потенциально привлекательны для применения при высоких температурах в таких отраслях как аэрокосмическая и автомобильная промышленность, в производстве энергии, создании турбин и др., то есть там, где материалы должны выдерживать экстремально высокие температуры [5].

Первыми высокоэнтропийными веществами, которые привлекли внимание учёных, были высокоэнтропийные

сплавы. Начиная с 2015 года начали получать оксиды с высокой энтропией [6], а затем и высокоэнтропийные металлические дибориды [7], карбиды [8], фториды [9] и сульфиды [10].

Целью данной работы является изучение магнитных свойств высокоэнтропийного соединения $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$ методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и магнитометрии, определение температур фазовых переходов, построение фазовых диаграмм.

Метод ЭПР позволяет исследовать динамику магнитных свойств изучаемых соединений как в упорядоченном состоянии, так и в парамагнитной области.

Образцы и условия экспериментов

Поликристаллическое соединение $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$ было синтезировано путём твёрдофазного синтеза с

использованием высокочистых ($\geq 99.9\%$) ингредиентов BaCO_3 , SrCO_3 , CaCO_3 , La_2O_3 , Na_2CO_3 и Co_3O_4 от Sigma Aldrich. Первоначально исходные порошки смешивали в шаровой мельнице с шарами из циркония в среде этанола. Затем полученную смесь сушили в течение ночи в печи с горячим воздухом. Высушенный порошок подвергали прокаливанию при температуре 1323 К в течение 10 ч в воздушной атмосфере. Затем прокалённый порошок прессовали в таблетки с помощью гидравлического пресса под давлением 8 тонн и спекали при температуре 1373 К в течение 6 ч в воздушной атмосфере. Подробно условия выращивания образцов приведены в [11].

Данные рентгеноструктурного анализа получены на дифрактометре LANScientific FRINGE XRD-602, мощность трубки 600 Вт, время накопления 5 с, с шагом 0.05° .

Измерения электронного магнитного резонанса производились на спектрометре EMXplus фирмы Брукер при частоте 9.34 ГГц в цилиндрическом резонаторе ER4122SHQE (Bruker) с распределением СВЧ-волны TE_{011} . Для температурных измерений в диапазоне от 5 и до 150 К использовался гелиевый криостат ESR900 (Oxford Instruments) с ПИД регулятором ITC 503S, в температурном диапазоне от 112 до 340 К – азотный продув ER 4131VT (Bruker) и регулятор температуры BVT3000 (Bruker).

Измерения намагниченности проводились при помощи прибора PPMS-9. Намагниченность измерялась в режимах охлаждения в нулевом магнитном поле (ZFC) и охлаждения в магнитном поле (FC) при 100, 1000 и 10000 Э и в диапазоне температур 5–300 К.

Результаты и обсуждение

Рентгеноструктурный анализ на основе программы Maud показал (рис. 1), что синтезированный образец состоит из двух кубических кристаллических структур одинаковой симметрии $\text{Pm}\bar{3}\text{m}$, но с различными параметрами решётки: для первой фазы $a = 3.904 \text{ \AA}$, для второй фазы

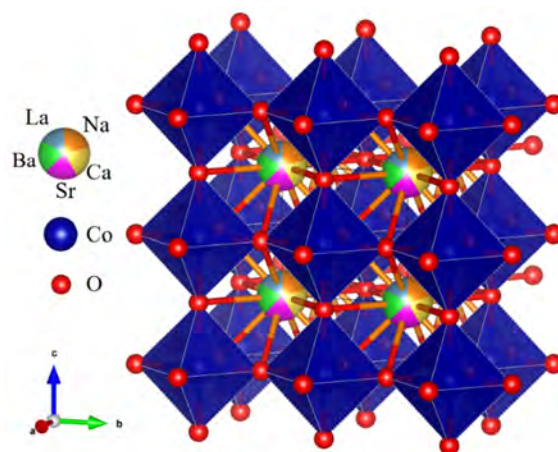


Рис. 2. Кристаллическая структура $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$.

$a = 4.276 \text{ \AA}$. Содержание первой фазы в образце равно 76%, а второй фазы 24%. Пики Брэгга от второй фазы на рис. 1 отмечены звёздочкой. На рис. 2 представлена кристаллическая структура соединения. Ионы кобальта находятся в окружении из ионов кислорода, формирующих октаэдр.

На рис. 3 представлены спектры магнитного резонанса для керамики $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$ при изменении температуры от 25 до 184 К, а на рис. 4 в температурном диапазоне от 169 до 326 К. Спектр магнитного резонанса состоит из трёх линий до 250 К. Для описания формы спектров магнитного резонанса выше 250 К использовалась одна линия. Линии были аппроксимированы выражением [12]:

$$\frac{\partial P}{\partial B} = \frac{\partial}{\partial B} \left[\frac{\Delta B + \alpha(B - B_{\text{res}})}{4(B - B_{\text{res}})^2 + \Delta B^2} + \frac{\Delta B - \alpha(B + B_{\text{res}})}{4(B + B_{\text{res}})^2 + \Delta B^2} \right]. \quad (1)$$

С помощью аппроксимации были определены ширина линии ΔB , положение линии B_{res} и интегральная интенсивность спектральных линий. Построены темпе-

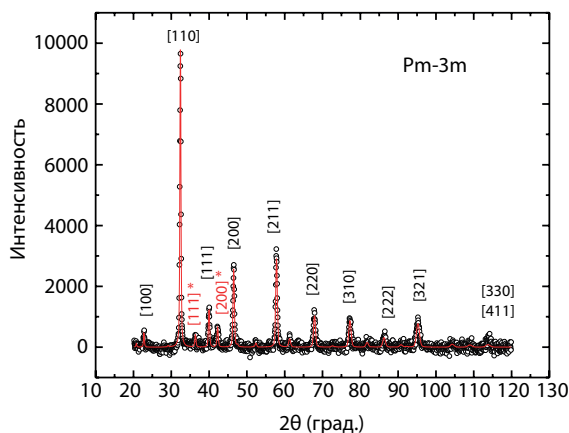


Рис. 1. Дифрактограмма образца $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$ при комнатной температуре. Кружки – эксперимент, сплошная линия – расчёт.

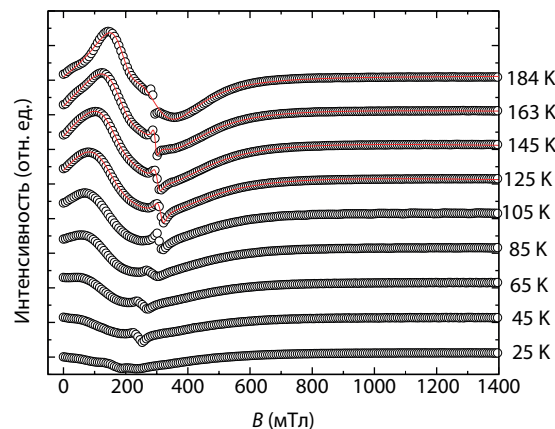


Рис. 3. Температурная зависимость вида спектров магнитного резонанса в керамике $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$. X-диапазон при температурах от 25 до 184 К.

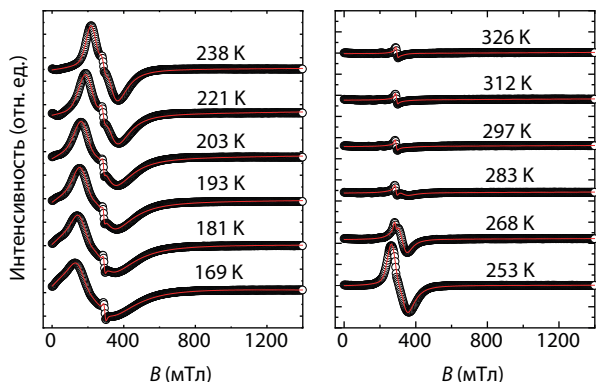


Рис. 4. Температурная зависимость вида спектров магнитного резонанса в керамике $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$, X-диапазон при температуре от 169 до 326 K.

ратурные зависимости каждого из этих параметров для трёх линий (рис. 5).

Как видно из рисунка, положение линии 1 (круги), практически не меняется при понижении температуры, а ширина линии составляет 16 мТл. В спектре ЭПР наблюдалась линия, ширина которой значительно увеличивалась при понижении температуры от 20 до 250 мТл (2, квадраты). Данная линия уширяется ниже 65 K и однозначно её аппроксимировать не удаётся. Как следует из рис. 5, обратные интегральные интенсивности линий демонстрируют максимумы при 197 и 165 K. Можно предположить, что это температуры фазовых переходов в спиновых подсистемах образца.

На рис. 6 приведена температурная зависимость магнитной восприимчивости в керамике $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$. Данные по магнитной восприимчивости, полученные в режимах ZFC и FC, начинают расходиться при температуре ниже 250 K. При этой же температуре в спектре магнитного резонанса вместо одной линии начинают наблюдаться три. Можно сделать вывод, что ниже 250 K в керамике $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$ наблюдается

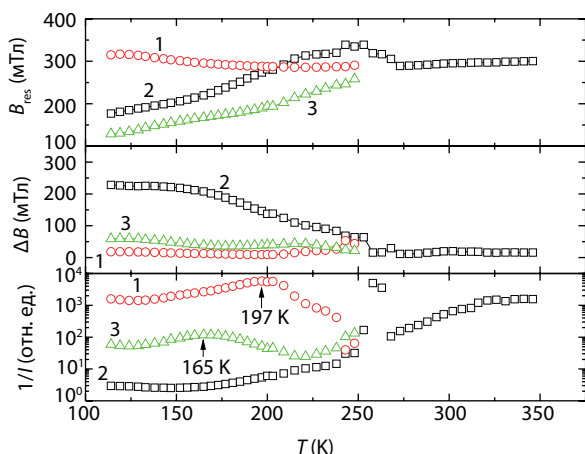


Рис. 5. Температурные зависимости резонансного значения магнитного поля, ширины линии и обратной интегральной интенсивности для трёх линий магнитного резонанса в керамике $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$.

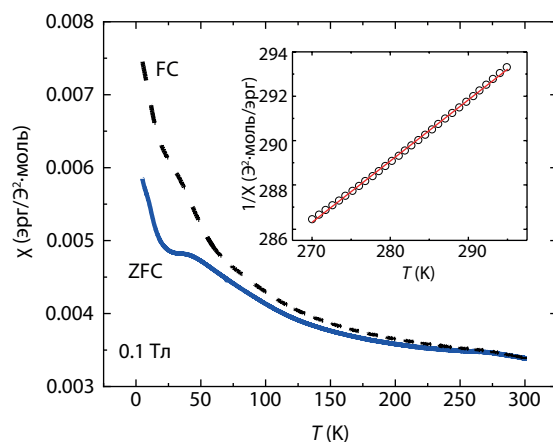


Рис. 6. Температурная зависимость магнитной восприимчивости в керамике $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$. На вставке приведена зависимость обратной магнитной восприимчивости от температуры, сплошная линия – аппроксимация по закону Кюри-Вейсса.

фазовое расслоение и часть образца переходит в упорядоченное ферромагнитное состояние. Предположение о ферромагнитном упорядоченном состоянии основывается на резком возрастании интегральной интенсивности широкой линии. При температуре 50 K в ZFC-данных наблюдается максимум, что может свидетельствовать о низкоразмерном характере обменных взаимодействий в керамике $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$.

На вставке к рис. 6 представлена зависимость обратной магнитной восприимчивости от температуры в различных режимах (ZFC и FC) при значении внешнего магнитного поля 0.1 мТл. При высоких температурах, примерно выше 270 K, можно наблюдать зависимость, которая подчиняется закону Кюри-Вейсса:

$$\chi = \frac{C}{T - \theta}, \quad (2)$$

где C – постоянная Кюри, а θ – температура Кюри-Вейсса. Из аппроксимации экспериментальных данных получены следующие значения: $C = 3.62 \text{ Эрг} \cdot \text{K} / \text{Э}^2 \cdot \text{моль}$, $\theta = -764 \text{ K}$.

Отрицательное значение температуры Кюри означает, что в системе преобладает антиферромагнитное взаимодействие между спинами. Из постоянной Кюри определяем эффективный магнитный момент согласно выражению:

$$\mu_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{3k_B}{N_A} C}, \quad (3)$$

где k_B – постоянная Больцмана, N_A – постоянная Авогадро. Используя полученную выше константу Кюри, получаем $\mu_{\text{eff}} = 5.38\mu_B$, где μ_B – магнетон Бора. Оценим эффективный магнитный момент:

$$\mu_{\text{eff}}^{\text{theor}} = g\sqrt{NS(S+1)}\mu_B, \quad (4)$$

где g – g -фактор, N – количество магнитных ионов, S – спин магнитного иона [13].

Ион кобальта может иметь различную степень окисления. При этом при одной и той же электроотрицательности ион может иметь различный спин. Рассмотрим спиновые варианты для иона кобальта, которые могут реализоваться в данном соединении.

Если рассмотреть зарядовое состояние каждого иона в соединении $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$, то получится следующее: $\text{Ba}_{0.2}^{2+}\text{Sr}_{0.2}^{2+}\text{Ca}_{0.2}^{2+}\text{La}_{0.2}^{3+}\text{Na}_{0.2}^{1+}\text{Co}^{x+}\text{O}_{3-}^{2-}$.

Степень окисления иона кобальта составляет $4+$. Спиновое состояние может быть различным: высокоспиновое состояние ($\text{HS } t_{2g}^3 e_g^2$) $S = 5/2$, промежуточное спиновое состояние ($\text{IS } t_{2g}^4 e_g^1$) $S = 3/2$, низкоспиновое состояние ($\text{LS } t_{2g}^5 e_g^0$) $S = 1/2$. Применяя формулу (4) и учитывая, что g -фактор равен 2, можно определить эффективный магнитный момент. Значение эффективного магнитного момента при $S = 5/2$ (HS) равно $\mu_{\text{eff}}^{\text{theor}} = 5.92\mu_B$. Данное значение превышает экспериментальное значение $\mu_{\text{eff}} = 5.38\mu_B$. Следовательно, можно сделать вывод, что часть спинов в соединении имеет более низкий спин. Наличие трёх сигналов в спектре ЭПР свидетельствует о также трёх возможностях для спинового состояния кобальта.

Заключение

Проведено рентгеноструктурное исследование соединения $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$. Анализ показал, что образец имеет кристаллическую структуру Pm-3m, но содержит две фазы: одну с параметром решётки $a = 3.904 \text{ \AA}$, вторую с параметром решётки $a = 4.276 \text{ \AA}$. Содержание первой фазы в образце равно 76%, второй – 24%.

Проведены измерения спектров ЭПР в керамике $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$. Установлено, что температура фазового перехода из парамагнитного состояния в упорядоченное ферромагнитное составляет 250 К. Ниже 250 К наблюдается фазовое расслоение на три магнитные фазы. Были построены графики температурных зависимостей ширины и положения линий магнитного резонанса. Анализ температурной зависимости обратной магнитной восприимчивости свидетельствует об антиферромагнитном

характере обменных взаимодействий между спинами. Определён эффективный магнитный момент $\mu_{\text{eff}} = 5.38\mu_B$. Данное значение указывает на вероятность того, что в соединении ионы кобальта имеют спиновые состояния как $S = 5/2$, так и $S = 3/2$.

Благодарности

Авторы выражают признательность проф. Танмой Маити (Индия) за предоставленные образцы. Работа выполнена за счёт гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан “Научно-технологическое развитие Республики Татарстан”.

Литература

1. Albedwawi S., Al-Jaberi A., Haidemenopoulos G., Polychronopoulou K.: *Materials & Design* **202**, 109534 (2021)
2. Musicó B., Gilbert D., Ward T., Page K., et al.: *APL Materials* **8**, 040912 (2020)
3. Zhang Y., Wang D., Wang S.: *Small* **18**, 2104339 (2021)
4. Li K., Chen W.: *Materials Today Energy* **20**, 100638 (2021)
5. Sathiyamoorthi P., Kim H.: *Advanced Engineering Materials* **20**, 1700645 (2017)
6. Sarkar A., Wang Q., Schiele A., Chellali M., et al.: *Adv. Mater.* **31**, 1806236 (2019)
7. Gild J., Zhang Y., Harrington T., Jiang S. et al.: *Scientific Reports* **6**, 37946 (2016)
8. Alvi S., Zhang H., Akhtar F.: *High-Entropy Materials*. IntechOpen, 2019. – ISBN 978-1-78985-947-8.
9. Chen X., Wu Y.: *Journal of the American Ceramic Society* **103**, 750–756 (2019)
10. Kuang J., Zhang P., Wang Q., Hu Z. et al.: *Corrosion Science* **198**, 110134 (2022)
11. Bhattacharya T., Banerjee R., Maiti T.: *Phys. Chem. Chem. Phys.* **26**, 28874–28883 (2024)
12. Janhavi P. Joshi, Bhat S.V.: *Communication/Journal of Magnetic Resonance* **168**, 284–287 (2004)
13. Kittel C.: *Introduction to Solid State Physics*, 8th edn. p. 704. John Wiley & Sons, 2005.

Гептаядерный комплекс Fe(II)–Fe(III) как многофункциональный магнитный материал

А. Р. Шарипова, Е. Е. Батуева, Е. Н. Фролова, Л. В. Базан, О. А. Туранова

Лаборатория молекулярной радиоспектроскопии, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Изучены магнитные свойства и релаксация протонов гептаядерного разновалентного комплекса $[\text{Fe(II)}(\text{CN})_6\{\text{Fe(III)}(\text{L})\}_6](\text{SCN})_2$, где L = дианион N,N'-бис[(2-гидроксифенил)метилен]-4-азагептан-1,7-диамина. Обнаружены спин-переменные свойства. Изучена зависимость скорости релаксации от концентрации, рассчитана релаксивность соединения.

Heptanuclear Fe(II)–Fe(III) complex as a multifunctional magnetic material

A. R. Sharipova, E. E. Batueva, E. N. Frolova, L. V. Bazan, O. A. Turanova

Laboratory of molecular radiospectroscopy, Laboratory of spin physics and spin chemistry

Magnetic properties and proton relaxation of the heptanuclear mixed-valence $[\text{Fe(II)}(\text{CN})_6\{\text{Fe(III)}(\text{L})\}_6](\text{SCN})_2$ complex, where L is the dianion of N,N'-bis[(2-hydroxyphenyl)methylene]-4-azaheptane-1,7-diamine, have been studied. Spin-crossover properties have been discovered. The dependence of the relaxation rate on concentration is studied, and the relaxivity of the compound is calculated.

Введение

Полиядерные комплексы являются перспективными соединениями для создания многофункциональных материалов. Они находят применение в медицине в качестве антимикробных агентов [1], в противоопухолевой терапии [2]. Для ряда многоядерных систем характерны спин-переменные свойства [3–6], ферромагнетизм [7], термохромизм [8]; включение алкильных цепочек в лиганды способствует появлению жидкокристаллических свойств [9]. Совокупность физико-химических свойств, а также возможность их переключения при внешнем воздействии увеличивает потенциальную область применения соединений. В последнее время появился интерес к многоядерным системам, где спиновый переход сосуществует с обменным взаимодействием [6].

Благодаря высокому магнитному моменту гептаядерные комплексы Fe(II)-Fe(III) имеют реальный потенциал использования в медицине в качестве контрастного агента (КА) при диагностических исследованиях в МРТ. В настоящее время при проведении МРТ в качестве КА используются хелаты гадолиния, оказывающие негативное воздействие на организм. Гадолиний – тяжёлый металл, который, высвобождаясь из хелатов, имеет свойство накапливаться в различных органах и тканях, включая головной мозг, кости, кожу и др.; также известно о возникновении нефрогенного системного фиброза у

пациентов с почечной дисфункцией с возможностью летального исхода [10].

Таким образом, поиск альтернативного КА, оказывающего меньшее воздействие на организм, является актуальной задачей. В данной работе описан синтез гептаядерного разновалентного комплекса Fe(II)-Fe(III) состава $[\text{Fe(II)}(\text{CN})_6\{\text{Fe(III)}(\text{L})\}_6](\text{SCN})_2$, где L = дианион N, N'-бис[(2-гидроксифенил)метилен]-4-азагептан-1,7-диамина, представлены результаты исследования магнитных свойств методом ЭПР. С помощью ЯМР определена релаксивность комплекса.

Эксперимент

Синтез многоядерного комплекса проходит в несколько этапов. На начальной стадии получают моноядерный комплекс Fe(III), который далее реагирует с $[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]^{4-}$ с образованием гептаядерного соединения (рис. 1). Гептаядерный комплекс Fe(II)-Fe(III) получен в виде порошка по методике [11]. Состав комплекса подтверждён данными элементного анализа.

Спектры ЭПР порошкового образца записаны в стационарном режиме на спектрометре Bruker EMXplus (X-диапазон) с гелиевой приставкой ER4112HV и цифровой системой контроля температуры ER4131VT. Микроволновая мощность выбиралась таким образом,

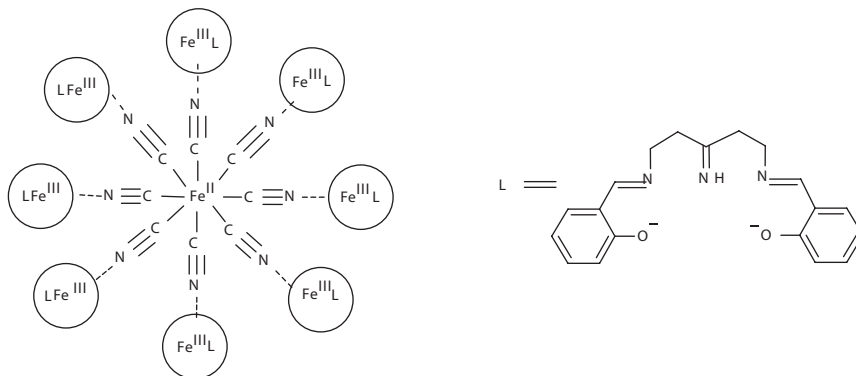


Рис. 1. Гептаядерный комплекс Fe(II)-Fe(III).

чтобы насыщение не происходило во всём исследованном диапазоне температур 4–340 К. Моделирование ЭПР-спектров проведено с использованием пакета программ EasySpin [12].

ЯМР-измерения времени релаксации T_1 протонов водных коллоидных растворов комплекса Fe(II)-Fe(III) и додецилсульфата натрия (ДСН) при концентрации комплекса 0.16, 0.28 и 0.47 ммоль/л выполнены на спектрометре Bruker AVANCE III (700.13 МГц) при температуре 300 К методом инверсия-восстановление.

Результаты

Скорости спин-решётной $1/T_1$, и спин-спиновой $1/T_2$ релаксации ЯМР увеличиваются при добавлении парамагнитных соединений к раствору. Наблюдаемая для такой системы скорость релаксации $(1/T_i)_{\text{obs}}$

$$(1/T_i)_{\text{obs}} = (1/T_i)_d + (1/T_i)_p, \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

представляет собой сумму диамагнитного $(1/T_i)_d$ и парамагнитного $(1/T_i)_p$ вкладов [13]. В отсутствие взаимодействий

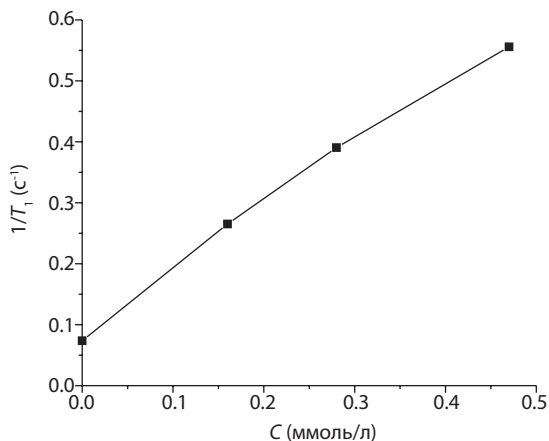


Рис. 2. Концентрационная зависимость времени продольной релаксации протонов воды в коллоидных растворах комплекса Fe(II)-Fe(III) и додецилсульфата натрия.

между частицами растворённого вещества зависимости скоростей релаксации на ядрах растворителя от концентрации парамагнетика линейны. Релаксивность R_i , является индивидуальной характеристикой парамагнетика при выбранной температуре и напряжённости поля [14]:

$$R_i = (1/T_i)_{\text{obs}} - (1/T_i)_d, \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

Релаксивность в МРТ относится к способности КА укорачивать время продольной релаксации близлежащих протонов воды, тем самым влияя на контрастность изображений, взвешенных по T_1 .

$(1/T_i)_{\text{obs}}$ повышалась при увеличении концентрации комплекса Fe(II)-Fe(III) (рис. 2), а $R_1 = 1.08 \pm 0.03 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$, что сравнимо с $4.58 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ при 310 К препарата “Гадовист”, используемого для повышения контрастности

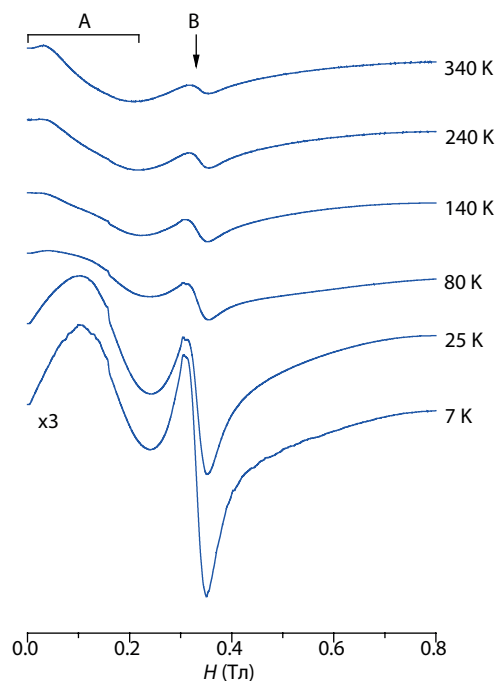


Рис. 3. ЭПР-спектры комплекса при разных температурах.

изображения при проведении МРТ тела человека [16]. Релаксивность комплекса Fe(II)-Fe(III) несколько уступает используемому на данный момент КА по величине [15], однако неизбежная замена ДСН на безопасную для человека оболочку значительно повысит R_1 .

ЭПР-спектр комплекса содержит два хорошо разделённых сигнала в низкополевой (А) и средней части спектра (В) (рис. 3). Линии в области А характерны для высокоспиновых (ВС) комплексов Fe(III) с параметрами тонкой структуры $D \gg h\nu$, $E/D < 1/3$. Отнесение линии В не является однозначным, поскольку в этой части спектра могут находиться линии как от низкоспиновых (НС), так и от ВС-центров Fe(III). Для получения представления об этой системе исследовано изменение интегральной интенсивности данного сигнала при изменении температуры. Оказалось, что зависимость величины обратной интегральной интенсивности сигнала В от температуры отклоняется от закона Кюри, что позволяет предположить как суперпозицию сигналов от ВС- и НС-комплексов в этой области, так и возможность магнитных перестроений в исследуемых образцах. Вклады от разных центров разделены моделированием спектров с помощью пакета программ EasySpin для неориентированных систем. Полученные в результате анализа относительные величины интегральной интенсивности сигналов для НС- и ВС-центров представлены на рис. 4. Эти данные соответствуют плавному неполному спиновому переходу, что согласуется с выводами, полученными при исследованиях подобных систем (см., например, [6]). Спиновый переход в комплексе является неполным, но основные изменения в системе происходят ниже температуры 100 К.

Следует отметить, что сигнал НС-комплексов имеет слабую анизотропию и линии недостаточно разрешены, что не позволяет с большей точностью определить индивидуальные параметры комплексов, $g_{\text{ср}} = 2.015\text{--}2.040$.

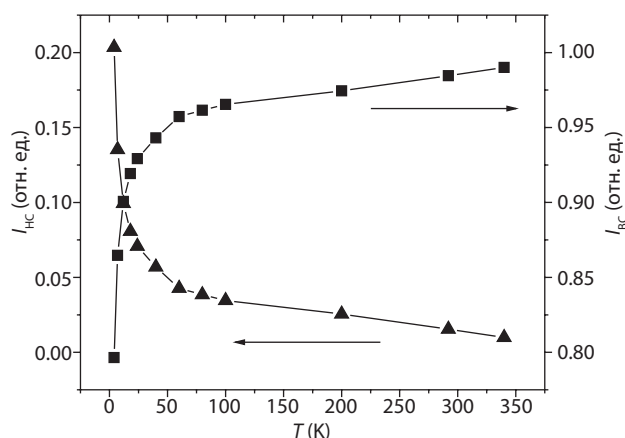


Рис. 4. Температурная зависимость относительных интегральных интенсивностей выделенных компонент спектра, квадраты – ВС-компоненты, треугольники – НС-компоненты.

Линия от ВС-центров Fe(III) соответствует комплексам с параметрами тонкой структуры $D \gg h\nu$, $E/D \ll 1/3$, причём при $T < 12$ К сигнал хорошо описывается значениями параметров $D = 40$ ГГц и $E/D \gg 0.095$. При более высоких температурах наряду с этой линией появляется и растёт по интенсивности сигнал с $E = 0$, при $T > 80$ К сигнал ВС-комплексов уширяется и сдвигается в сторону низких полей. Уширение и сдвиг линии может быть связан с ускорением релаксационных процессов и увеличением внутреннего магнитного поля, воздействующего на ионы Fe(III), с ростом температуры [17].

Выводы

В данной работе представлен синтез гептаядерного разновалентного комплекса Fe(II)-Fe(III). Методом ЭПР изучены магнитные свойства данного комплекса. Установлено, что спиновый переход в комплексе не является полным, основные изменения в системе происходят ниже температуры 100 К. С помощью ЯМР исследована зависимость релаксирующей способности комплекса от концентрации.

Литература

- Salishcheva O.V., Prosekov A.Yu.: *Foods and Raw Materials* **8**, 298–311 (2020)
- Felder P.S., Keller S., Gasser G.: *Advanced Therapeutics* 1900139 (2019)
- Salitros I., Madhu N.T., Boca R. et al.: *Monatshefte für Chemie* **140**, 695–733 (2009)
- Овчинников И.В., Иванова Т.А., Туранова О.А. и др.: *Коорд. химия* **39**, 502–507 (2013)
- Boca R., Nemec I., Salitros I. et al.: *Pure Appl. Chem.* **81**, 1357–1383 (2009)
- Boca R., Salitros I., Kozisek J. et al.: *Dalton Trans.* **39**, 2198–2200 (2010)
- Salitros I., Boca R., Herchel R. et al.: *Inorg. Chem.* **51**, 12755–12767 (2012)
- Liu J.L., Ji X.Y., Xue J.P. et al.: *Cryst. Growth Des.* **22**, 5092–5099 (2022)
- Batueva E.E., Sharipova A.R., Frolova E.N., et al.: *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* **88**, 1153–1157 (2024)
- Ramalho J., Ramalho M., Jay M. et al.: *Magnetic Resonance Imaging* **34**, 1394–1398 (2016)
- Gembicky M., Boca R., Renz F.: *Inorg. Chem. Commun.* **3**, 662–665 (2000)
- Stoll S., Schweiger A.: *J. Magn. Reson.* **178**, 42–55 (2006)
- Амиров Р.Р.: *Соединения металлов как магнитно-релаксационные зонды для высокоорганизованных сред: применение в МР-томографии и химии растворов*, 316 с. Казань: Новое знание, 2005.
- Xin Z., Lian Y., Guoping Y. et al.: *J. Rare Earths* **30**, 884–889 (2012)
- Yan G.-P., Robinson L., Hogg H.: *Magnetic resonance imaging contrast agents: Overview and perspectives* **13**, e5–e19 (2007)
- Shen Y., Goerner FL, Snyder C et al.: *T. Invest Radiol.* **50**(5), 330–338 (2015)
- Иванова Т.А., Мингалиева Л.В., Овчинников И.В. и др.: *Журн. общ. химии* **86**, 1170–1176 (2016)

Самосборка циклических дипептидов на основе аланина и фенилаланина в тонких плёнках по данным АСМ

А. С. Морозова, Е. О. Кудрявцева, А. А. Камалетдинова¹, С. А. Зиганшина, М. А. Зиганшин², А. А. Бухараев

Лаборатория физики и химии поверхности

¹ Институт физики Казанского федерального университета

² Химический институт им. А. М. Бутлерова Казанского федерального университета

В работе исследован процесс самосборки циклических дипептидов на основе фенилаланина и аланина с формированием кристаллических структур.

Self-assembly of cyclic dipeptides based on alanine and phenylalanine in thin films as by AFM

A. S. Morozova, E. O. Kudryavtseva, A. A. Kamaletdinova¹, S. A. Ziganshina, M. A. Ziganshin², A. A. Bukharaev

Laboratory of surface physics and chemistry

¹ Institute of Physics, Kazan Federal University

² Butlerov Institute of Chemistry, Kazan Federal University

The process of self-assembly of cyclic dipeptides based on phenylalanine and alanine with the formation of crystal structures is investigated.

Введение

Биомолекулярная самосборка является популярным методом получения биоматериалов и наноматериалов, которые находят применение в биологии, медицине и нанотехнологии. Олигопептиды, выступающие в роли природных или синтетических строительных блоков, позволяют создать такие материалы [1]. Особый интерес среди олигопептидов вызывают циклические пептиды [2]. Наноматериалы, полученные в результате молекулярной самосборки этих соединений, имеют перспективы применения в различных областях: доставке лекарств, химиотерапии рака, накоплении энергии, изготовлении оптических волноводов [2]. Провести анализ морфологии поверхности и свойств образующихся структур с нанометровым пространственным разрешением позволяет атомно-силовая микроскопия (АСМ) [3].

На сегодняшний день наиболее изученным дипептидом является дифенилаланин. Благодаря способности к самосборке на его основе можно получить нано- и микроструктуры с различными свойствами, например, пьезоэлектрическими. Однако процесс самосборки дипептидов, содержащих в своём составе аминокислотный остаток фенилаланин, изучен недостаточно. Исследование самосборки наноструктур на основе олигопептидов, содержащих также и другие аминокислотные остатки, даст

возможность создания новых материалов с заданными свойствами. В связи с этим цель данного исследования состояла в изучении процесса самосборки циклических дипептидов на основе фенилаланина и аланина с формированием кристаллических структур, которые могли бы быть применены в различных областях.

Методика и техника эксперимента

Объекты исследования

В качестве объектов исследования были использованы циклические пептиды аланил-фенилаланин (Ala-Phe) и фенилаланил-аланин (Phe-Ala).

Методика получения плёнок циклических дипептидов

Образцы представляли собой плёнки дипептидов, нанесённые на подложки гидрофильного кремния. Для получения плёнок циклических дипептидов на поверхность подложки наносили 10 мкл раствора олигопептида с последующим испарением растворителя. Сушку раствора на подложке проводили несколькими способами: при самостоятельном испарении растворителя на подложке,

методом принудительной сушки тёплым воздухом (45 °C); при сушке раствора на подложке в печи при 60 °C и методом вращающейся подложки со скоростью вращения 6000 об/мин [4]. После испарения растворителя плёнка дополнительно сушилась 2 мин потоком тёплого воздуха при 45 °C.

Методика насыщения плёнок циклических дипептидов

Плёнки насыщались несколькими растворителями: этанолом и водой. Подложку с высушенным образцом и 200 мкл растворителя помещали в чашку Петри. Чашку герметизировали парафиновой плёнкой и выдерживали образец в течение часа. После того как плёнки были насыщены парами органических соединений, была проведена сушка тёплым воздухом при температуре 45 °C в течение двух минут.

Метод исследования поверхности

Исследование структуры поверхности циклических дипептидов проводилось с использованием атомно-силового микроскопа Solver P47 Pro (NT-MDT, Россия). Каждый полученный скан представлял собой массив 512×512 точек. Измерения проводились в полуконтактном режиме. Были использованы кремниевые кантилеверы NSC11 (NT-MDT, Россия) с резонансной частотой около 180 кГц [4].

Результаты и обсуждения

Получение плёнок циклических дипептидов *цикло(Ala-Phe)* и *цикло(Phe-Ala)* на кремниевых подложках

Для получения нано- и микроструктур на основе олигопептидов были получены плёнки циклических дипептидов *цикло(Ala-Phe)* и *цикло(Phe-Ala)* на кремниевых подложках. Ранее было показано, что аморфные плёнки олигопептидов можно получить методами самостоятельной [5, 6] и принудительной [5, 7] сушки, а также методом вращающейся подложки [6]. Эти способы были применены и для *цикло(Ala-Phe)*, и для *цикло(Phe-Ala)*.

Методом АСМ были получены изображения поверхности плёнок *цикло(Ala-Phe)*. С помощью методов самостоятельной и принудительной сушки сформировались крупные структуры. При самостоятельной сушке длина структур достигает ~3.7 мкм, ширина ~270 нм, высота ~350 нм, рис. 1а. При принудительной сушке ширина структур варьируется от 175 до 190 нм, длина от 1.5 до 2.7 мкм. Высота структур достигает 300 нм. На рис. 1б представлены изображения плёнок, полученные с помощью метода вращающейся подложки. На поверхности образца сформировались мелкие кристаллы. Их ширина составляет примерно ~35 нм, длина ~800 нм, высота ~60 нм, рис. 2б.

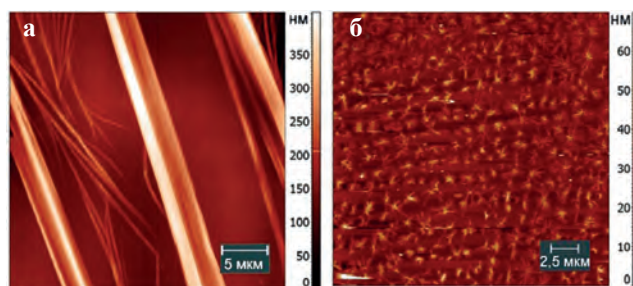


Рис. 1. АСМ-изображения плёнок *цикло(Ala-Phe)*, полученные методом самостоятельной сушки (а) и методом вращающейся подложки (б).

На рис. 2 представлены изображения поверхности плёнок *цикло(Phe-Ala)*. При самостоятельной сушке на поверхности образца образовались крупные лучеобразные структуры, схожие со структурами, полученными на поверхности плёнок *цикло(Ala-Phe)* при таком же методе сушки. Ширина лучей достигает ~150 нм, длина ~5 мкм, высота структур ~200 нм. На рис. 2а представлены изображения плёнок, полученных методом принудительной сушки. На поверхности образца сформировалась сетчатая структура, ширина отдельных частиц достигает 120 нм, а длина 1.8 мкм, высота ~200 нм. Сушка с помощью метода вращающейся подложки привела к образованию мелких структур шириной до 130 нм и длиной до 1.5 мкм, с высотой до 200 нм, рис. 2б.

По данным АСМ-изображений можно сделать вывод, что такие способы (самостоятельная и принудительная сушка, сушка в печи, метод вращающейся подложки) не подходят для получения аморфных плёнок циклических дипептидов, рис. 1 и 2, так как на поверхности образуются крупные структуры.

Исследование влияния органических соединений на плёнки циклических дипептидов *цикло(Ala-Phe)* и *цикло(Phe-Ala)*

Для насыщения парами органических соединений были выбраны образцы, полученные методом вращающейся подложки. Плёнки насыщались несколькими растворителями: этанолом и водой.

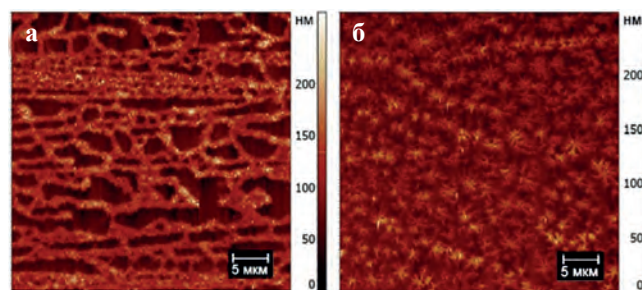


Рис. 2. АСМ-изображения плёнок *цикло(Phe-Ala)*, полученные методом принудительной сушки (а) и методом вращающейся подложки (б).

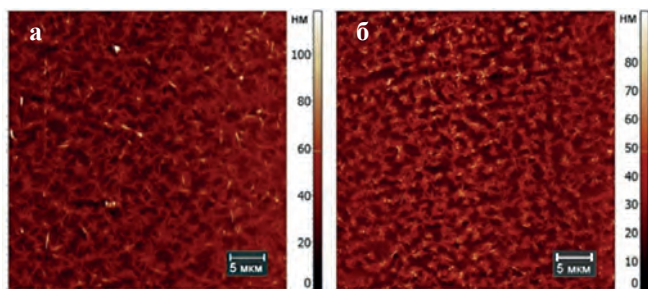


Рис. 3. АСМ-изображение плёнки *цикло*(Phe-Ala), высушенной методом вращающейся подложки после насыщения парами воды (а) и этанола (б).

При насыщении плёнки водой на поверхности *цикло*(Ala-Phe) сформировались мелкие структуры шириной до 80 нм и длиной до 500 нм, высота структур достигает 120 нм. После того как плёнка была насыщена парами этанола, на её поверхности образовались структуры, ширина которых достигает ~150 нм, а длина ~2.4 мкм. Высота полученных структур составляет ~100 нм. Сравнивая с начальной плёнкой дипептида *цикло*(Ala-Phe), рис. 2б, после насыщения парами воды или этанола на поверхности плёнки происходило увеличение геометрических параметров структур *цикло*(Ala-Phe). В случае насыщения парами этанола произошло увеличение ширины структур практически в 3 раза.

После насыщении плёнок *цикло*(Phe-Ala) водой образовались мелкие дендритные структуры шириной до 45 нм и длиной до 1.2 мкм, высотой до 100 нм, плотно прилегающие друг к другу, рис. 3а. На рис. 3б показаны изображения плёнки *цикло*(Phe-Ala) после насыщения парами этанола. На поверхности образца сформировалось большое количество мелких дендритных структур, ширина которых достигает ~50 нм и длина ~500 нм, высота составляет ~80 нм. После насыщения плёнок *цикло*(Phe-Ala) были получены интересные результаты: насыщение изначальной плёнки *цикло*(Phe-Ala) парами воды привело к увеличению латерального размера структур, рис. 3а. Однако насыщение плёнки *цикло*(Phe-Ala), рис. 2б, парами этанола напротив привело к уменьшению геометрических параметров структур. Например, ширина структур уменьшилась практически в три раза.

Выводы

В данной работе изучена самосборка *цикло*(Phe-Ala) и *цикло*(Ala-Phe) на поверхности гидрофильного кремния методом атомно-силовой микроскопии. На поверхности плёнок *цикло*(Ala-Phe) и *цикло*(Phe-Ala), полученных методами самостоятельной, принудительной сушки и сушки в печи, образовывались крупные кристаллы разной формы. На поверхности образца, полученного методом вращающейся подложки, образовались более мелкие структуры, которые подходили для насыщения парами органических соединений.

Установлено, что насыщение парами органических соединений приводит к образованию мелких структур. В случае *цикло*(Ala-Phe) при насыщении парами как воды, так и этанола, происходит увеличение размера структур. В случае *цикло*(Phe-Ala) насыщение парами воды также приводит к увеличению размера изначальных структур, однако насыщение парами этанола приводит к уменьшению геометрических параметров.

Полученные данные могут быть использованы для улучшения процессов получения органических структур на основе циклических олигопептидов, которые могут быть применены в биомедицине, энергетике и т. д.

АСМ-измерения выполнены на оборудовании Solver P47 Pro ЦКП-САЦ ФИЦ КазНЦ РАН.

Литература

1. Yan X., Zhua P., Li J.: Chemical Society Reviews **39**, 1861–2336 (2010)
2. Fan T., Yu X., Shen B., Sun L.: J. Nanomaterials **2017** (2017)
3. Антипин И.С., Алфимов М.В., Арсланов В.В., Бурилов В.А., Вападзе С.З.: Успехи химии **90**, 895–1107 (2021)
4. Морозова А.С.: Самосборка ряда короткоцепных олигопептидов с образованием микро- и нанообъектов и их свойства по данным сканирующей зондовой микроскопии. Канд. дис., с. 110. Казань 2023.
5. Larionova R., Akhmetshina S., Gerasimova A., Morozova A., Ziganshina S., Khayarova K., Gorbachuk V., Ziganshina M.: Russian Journal of Organic Chemistry **58**, 1076–1083 (2022)
6. Морозова А.С., Кудрявцева Е.О., Зиганшина С.А., Зиганшин М.А., Бухараев А.А.: Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки **165**, 37–48 (2023)
7. Ziganshin M., Morozova A., Ziganshina S., Vorobev V., Suwińska K., Bukharaev A., Gorbachuk V.: Molecular Crystals and Liquid Crystals **690**, 67–83 (2019)

Методы оптимизации для совмещения систем квантовой памяти на оптических резонаторах

Н. С. Перминов, С. А. Моисеев

Лаборатория нелинейной оптики

Предложена схема соединения двух ячеек квантовой памяти на высокодобротных оптических микрорезонаторах через центральные буферные резонаторы, используя контролируемый переключатель. Исследован спектр системы в зависимости от частот и сил связей между резонаторами и предложена оптимизация динамики на разных стадиях хранения сигнала в подсистемах. Показано, что возможен трансфер поля из второго блока памяти в первый с высокой эффективностью, близкой к 100%, что открывает возможности эффективного совмещения нескольких систем квантовой памяти.

Optimization methods for combining quantum memory systems on optical resonators

N. S. Perminov, S. A. Moiseev

Laboratory of nonlinear optics

A scheme for connecting two quantum memory cells on high-quality optical microresonators through central buffer resonators using a controlled switch is proposed. The spectrum of the system is studied depending on the frequencies and coupling forces between the resonators. Optimization of dynamics at different stages of signal storage in subsystems is proposed. It is shown that it is possible to transfer the field from the second memory block to the first one with high efficiency close to 100%, this opens up the possibility of effectively combining several quantum memory systems.

Введение

Реконфигурируемая и высокоэффективная квантовая память (КП), работающая в оптическом диапазоне частот, представляет интерес для решения широкого круга задач практической квантовой информатики [1, 2]. Большое внимание привлекает проблема создания многокубитового квантового компьютера, использующего твёрдотельные и ионные кубиты, демонстрирующая перспективные возможности масштабирования в реализации квантовых вычислений [3]. Однако в таких квантовых вычислителях пока отсутствует КП, позволяющая существенно увеличить их вычислительную мощность [4]. Более того, недавно было показано, что для круга задач из сферы квантовых алгоритмов использование КП малой информационной ёмкости способно экспоненциально улучшить даже вычислительные возможности квантовых вычислений [5]. Таким образом, построение высокоэффективной реконфигурируемой оперативной КП является важной задачей, способной дать новое развитие для сферы квантовых вычислений.

Появление квантового компьютера с КП представляется возможным только при использовании КП, обладающей высокой эффективностью. В настоящее время пока отсутствует КП с параметрами, которые удовлетворяют критериям её эффективного использования в квантовых вычислениях. В создании КП ключевой проблемой остаётся реализация интерфейса [6], способного обеспечивать эффективный обратимый перенос кубитов из волноводного тракта или квантовых процессоров в КП с последующим восстановлением фотонов в произвольный момент времени. Ниже мы изучаем возможность реализации высокоэффективной оптической резонаторной КП, обладающей реконфигурируемыми спектральными характеристиками, позволяющими совмещать её несущие частоты с частотами квантовых процессоров и обладающей высокой эффективностью и программируемым временем хранения.

Здесь мы следуем подходу, предложенному в наших работах [7, 8], где показано, что система связанных резонаторов, обладающая заданной спектральной структурой резонансных линий, способна выполнять роль высокоэффективного интерфейса при работе с импульсными световыми полями. В этой работе предложена схема

соединения многорезонаторных систем квантовой памяти на высокодобротных оптических микрорезонаторах через центральные буферные резонаторы с помощью переключаемой связи между подсистемами, реализующими хранение записанной информации на произвольное заданное время. Исследован спектр системы в зависимости от частот и сил связей между резонаторами и предложена оптимизация динамики на разных стадиях хранения сигнала в подсистемах. Показано, что возможен перенос сигнального поля из второго блока памяти в первый её блок с высокой эффективностью, близкой к 100%, что открывает возможности эффективного совмещения нескольких систем квантовой памяти.

Теоретическая модель

На рис. 1 представлена схема соединения двух блоков оптической резонаторной КП, связанных с внешним волноводом, которая позволяет загружать световой сигнал из внешнего волновода в КП при включённой связи между первым блоком и волноводом $k_1 \neq 0$ и выключенной связи между блоками $k_2 = 0$, выполнять отключение связи k_1 и перебрасывать сигнал во второй блок памяти для $k_2 \neq 0$.

На рис. 1 $k_1(t)$, $k_2(t)$ – динамически управляемые связи между резонаторами с модами $x_1(t)$, $x_2(t)$, a_{in} , a_{out} – входной и выходной сигналы, $s_1(t)$, $s_2(t)$, $s_3(t)$ – полевые моды минирезонаторов, связанных с общими буферными резонаторами связями g_1 , g_2 . Тема оптических переключателей активно развивается в последние годы [9, 10] и при ставшем доступном быстром переключении связей со временем меньше обратной величины связи между резонаторами $\sim 1/100$ МГц = 10 нс, становится возможным эффективный трансфер квантового состояния между различными конфигурациями подблоков КП за счёт внешнего динамического контроля связей. Для медленных полевых мод резонаторов (основная мода получается умножением на $\exp(i\omega_0 t)$), соответствующих слабому световому сигналу (в частности однофотонное возбуждение) в изучаемой системе в приближении высокой добротности оптических микрорезонаторов [11] и малых потерь в резонаторах мы имеем следующую систему линейных уравнений:

$$\begin{aligned} \partial_t x_1(t) + i g_1(s_1 + s_2) + i k_2 x_2 &= \text{sqrt}(k_1) a_{in}, \\ \partial_t x_2(t) + i g_2 s_3 + i k_1 x_1 &= 0, \\ [\partial_t - i \Delta] s_1 + i g_1 x_1 &= 0, \\ [\partial_t + i \Delta] s_2 + i g_1 x_1 &= 0, \\ \partial_t s_3 + i g_2 x_2 &= 0, \\ a_{in} + a_{out} &= \text{sqrt}(k_1) x_1, \end{aligned} \quad (1)$$

где Δ – частотная отстройка микрорезонаторов s_1 , s_2 от центральной частоты ω_0 , общей для всех остальных резонаторов.

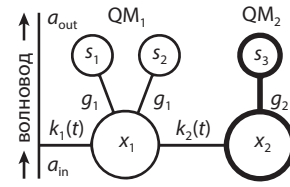


Рис. 1. Схема соединения двух экземпляров КП на оптических микрорезонаторах друг с другом и волноводом.

Спектроскопия и методы оптимизации

Решение уравнений (1) доступно для анализа в фурье-представлении, после чего возникает задача о нелинейной алгебраической оптимизации для загрузки сигнала в первый блок памяти при выключенной связи k_2 , а затем задача о перебросе квантовой когерентности при отключённой связи k_1 . При выключенной связи k_2 спектр собственных частот E_n для первого блока КП на стадии загрузки определяется по комплексным корням $v = E_n + i D_n$ характеристического уравнения

$$2v^3 + i v^2 k_1 - 2\Delta^2 v - i \Delta^2 k_1 = 0, \quad (2)$$

где введена нормировка $g_1 = \text{sqrt}(3/2)$. На рис. 2 в трёхмерной форме представлены спектры E_n как функции от Δk_1 , отвечающие решению уравнения (2). Полученная зависимость позволяет настраивать характеристики первого блока КП, когда в нём нет энергии внешнего сигнала, в том числе и когда информация находится во втором блоке. При слиянии энергетических линий системы мы получаем отсутствие осцилляций на стадии хранения, что может быть интересно для короткого хранения сигнала. А для оптимизации эффективности высвечи-

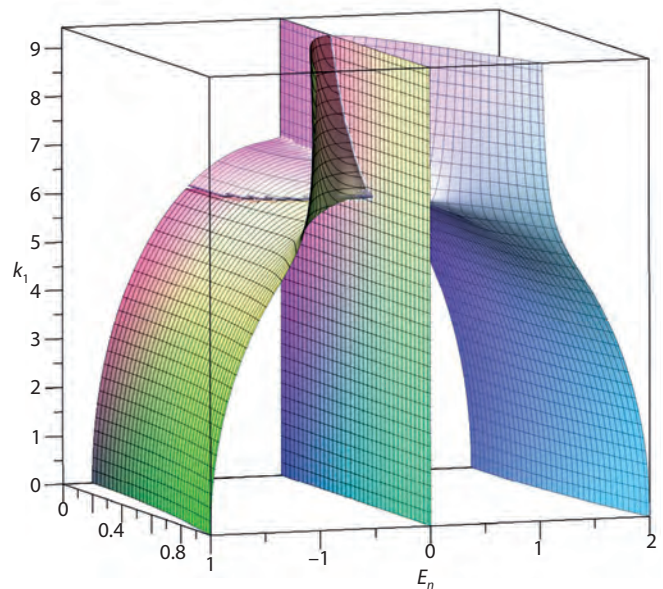


Рис. 2. Зависимость спектра первой КП от параметров частотной отстройки между резонаторами Δ и силы связи с волноводом k_1 .

вания энергии из минирезонаторов первого блока КП в волноводный тракт при наличии ненулевой частотной отстройки можно использовать условия оптимизации, представленные в работе [8]. Отметим, что существует несколько вариантов оптимизации стадии загрузки, и здесь мы выбрали дополнительные параметры в форме $\Delta = 1$, для которых существует оптимальное значение $k_1 = g_1^2/(2\pi)$ для загрузки/выгрузки импульсо-подобного волнового пакета из внешнего волновода в КП.

Таким образом, меняя параметры первого блока КП можно реализовать эффективное алгебраическое управление спектром этой подсистемы для реализации загрузки, а также для многоциклового хранения информации в этом блоке КП. Однако при выключенной связи $k_1 = 0$ и включении связи k_2 мы уже получаем общую композитную систему из 5 взаимодействующих резонаторов, которая характеризуется общим набором мод, обладающих изменённым спектром собственных частот. В этом случае задача о полном переносе излучения из первого блока КП во второй становится нетривиальной.

Трансфер информации между блоками КП

Для решения задачи от переносе излучения между двумя блоками КП мы зафиксировали ранее обозначенные оптимальные значения параметров первого блока и для них подобрали такие значения k_2 , g_2 , которые удовлетворяют условию получения кратных частот, что является первым необходимым условием для получения замкнутых циклов в композитной системе. Для композитной системы оказывается существует несколько вариантов эффективной оптимизации этого условия и один из параметров (g_2) может быть свободным. Например, для $g_2 = 1$ мы можем численно получить оптимальное значение $k_2 = 1.564$, для которого выполняется условие наличия замкнутых осцилляций в системе. Для полученных значений теперь требуется удовлетворить ещё одному условию, которое заключается в полной выгрузке первого блока, и которое не является следствием эквидистантности, а возникает как дополнительное требование в задаче оптимизации.

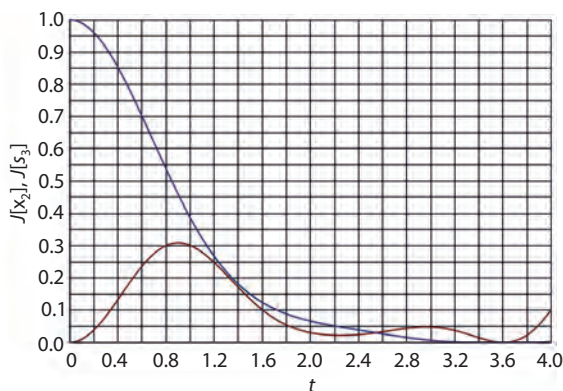


Рис. 3. Динамика трансфера энергии из второго блока КП в первый при оптимальных значениях параметров.

Оказывается, что для найденных параметров этот переброс реализуется автоматически в некоторой небольшой области времени. На рис. 3 показано, что возможен трансфер поля из второго блока КП в первый с высокой эффективностью, близкой к 100%, когда энергия $J[x_2]$, $J[s_3]$ в обоих элементах второй КП становится равной 0, и становится доступно бесшумное выключение/выключение связи между блоками. Переброс из первого блока во второй является симметричным во времени, и в итоге мы полностью решаем задачу об оптимальном трансфере энергии между подчастями композитной КП.

Таким образом, за счёт оптимизации связей и их динамического переключения удаётся реализовать как загрузку сигнала в систему, так и его трансфер между блоками КП с высокой эффективностью. При этом для каждого из блоков за счёт переключения связей возможно многоциклового хранение информации для увеличения общей длительности хранения. Отдельно отметим, что для предложенной схемы в результате остаётся свободным один из параметров системы g_2 , что позволяет динамически менять время переброса и хранения сигнала во втором блоке КП гладким непрерывным образом за счёт его изменения пока энергия находится в первом блоке. Это существенно отличает текущую модель от предложенной ранее схемы многоциклового хранения [12], где были доступны фиксированные времена, и делает память полноценной в плане возможности считывания сигнала в произвольный момент времени.

Выводы

Нами предложена схема из двух различных видов КП на оптических резонаторах, которая благодаря оптимизации параметров связи допускает как полную загрузку сигнала в систему, так и полный перенос излучения из одного блока КП в другой. Наличие высокой эффективности одновременно всех стадий хранения и когерентного переноса излучения в многочастичной системе является нетривиальным для композитных многорезонаторных систем, что делает рассматриваемую схему резонаторов привлекательной для дальнейших исследований и приложений в сфере квантового процессинга. Благодаря современным достижениям в изготовлении интегральных высокодобротных резонаторов [11] и появлению малошумных оптических квантовых переключателей схема из небольшого числа резонаторов может быть выполнена на чипе с малыми суммарными потерями и шумами. Кроме этого, при наличии динамически контролируемой связи g_2 появляется возможность менять время хранения с любой точностью непосредственно на протяжении времени нахождения сигнала в композитной системе. Ранее была предложена КП с многоцикловым хранением [12], где время хранения было фиксировано определёнными моментами времени, а здесь мы можем проводить подстройку времени без ограничений, используя второй блок управляемой КП. Существенным отличием от работы

[13], где контроль времени хранения реализуется смещением частоты резонаторов, нагруженных энергией, является уменьшение шумов из-за меньшего контакта нагруженных подсистем с переключаемыми подсистемами и снижение требований к количеству динамически управляемых элементов, необходимых для программирования времени вылета сигнала, которые вносят основные шумы и являются технологически достаточно сложными в изготовлении и управлении.

Время хранения квантовой информации даже в самых лучших технологических образцах оптических микрорезонаторов значительно ограничено значениями в несколько миллисекунд, что существенно ограничивает круг применения памяти, содержащей только резонаторы. Для увеличения времени жизни в резонаторную КП необходимо интегрировать долгоживущие носители квантовой информации, например, атомные ансамбли или одиночные атомы, обладающие большим временем жизни когерентности электрон-ядерных спиновых переходов, способном достигать нескольких минут [14]. В конфигурации с атомами как основными носителями квантовой информации реконфигурируемая платформа из резонаторов выступает как система для программирования когерентности в атомах. В недавних исследованиях также было показано, что в резонаторных системах можно реализовать квантовую частотную конверсию с очень высокой эффективностью [15], что открывает принци-

пиальную возможность для использования различных видов атомных систем с разными частотами на одной платформе для решения задач хранения и обработки квантовой информации.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках темы лаборатории нелинейной оптики КФТИ – ОСП ФИЦ КазНЦ РАН (алгебраические методы оптимизации квантовых систем) и финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Регистр. № НИОКР 125012300688-6) – построение модели и анализ результатов.

Литература

1. Moody G. et al.: J. Phys. Photonics **4**, 012501 (2022)
2. Bravyi S. et al.: Nature **627**, 8005 (2024)
3. Bluvstein D. et al.: Nature **62**, 7997 (2024)
4. Ichimura K.: Optics communications **196**, 1–6 (2001)
5. King R. et al.: PRX Quantum **5**, 4 (2024)
6. De Riedmatten H. et al.: Nature **456**, 7223 (2008)
7. Moiseev S.A. et al.: JETP Letters **111** (2020)
8. Perminov N.S. et al.: Scientific reports **9**, 1 (2019)
9. Chen X. et al.: Laser & Photonics Reviews **17**, 4 (2023)
10. Guo Q. et al.: Nature Photonics **16**, 9 (2022)
11. Yang K.Y. et al.: Nature Photonics **12**, 5 (2018)
12. Perminov N.S. et al.: Radiophysics and Quantum Electronics (2025)
13. Bao Z. et al.: Phys. Rev. Lett. **127**, 010503 (2021)
14. Moiseev S.A. et al.: JETP Letters **115**, 6 (2022)
15. Kundu M. et al.: arXiv preprint arXiv:2501.07010 (2025)

Влияние спиновых корреляций на транспортные свойства кристаллов $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$

Д. Е. Железнякова, И. И. Гимазов, Ю. И. Таланов

Лаборатория проблем сверхпроводимости и спинтроники

Представлены результаты измерений микроволнового поглощения и удельного сопротивления монокристаллов BaFe_2As_2 , легированных кобальтом. Описано изменение амплитуды микроволнового поглощения с учётом температурной зависимости удельного сопротивления, магнитной восприимчивости и скорости рассеяния на спиновых флуктуациях. Предложено альтернативное объяснение нелинейной зависимости удельного сопротивления выше температуры магнитного упорядочения. Оценки скорости рассеяния указывают на нематическую природу флуктуаций выше температуры упорядочения.

The impact of spin correlations on the transport properties of $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$

D. E. Zhelezniakova, I. I. Gimazov, Y. I. Talanov

Laboratory of problems of superconductivity and spintronics

The results of microwave absorption and resistivity measurements of cobalt-doped BaFe_2As_2 single crystals are presented. The behavior of the microwave absorption amplitude is described accounting for the temperature dependence of resistivity, magnetic susceptibility, and the scattering rate by spin fluctuations. An alternative explanation for the nonlinear dependence of resistivity above the magnetic ordering temperature is proposed. Estimates of the scattering rate indicate a nematic nature of fluctuations above the ordering temperature.

Введение

В сверхпроводниках на основе железа, в частности в соединениях арсенидов железа, спиновые корреляции рассматриваются как основной механизм, связывающий электроны в куперовские пары. Это предположение связано с тем, что спиновые корреляции определяют поведение многих физических параметров, включая сопротивление и его температурную зависимость в диапазоне выше температуры сверхпроводящего перехода $T > T_c$ [1–4]. В нескольких теоретических работах [5–8] было продемонстрировано, что экспериментально наблюдаемая линейная зависимость удельного сопротивления от температуры $\rho(T) \propto T$ (вместо характерной для рассеяния квазичастиц в ферми-жидкости квадратичной зависимости $\rho(T) \propto T^2$) является следствием рассеяния электронов только за счёт спиновых флуктуаций. В связи с тем, что антиферромагнитные спиновые корреляции характеризуются сильноанизотропным параметром порядка, который соответствует упорядочению в виде волн спиновой плотности (SDW), они способствуют установлению нематического порядка в температурной области, близкой к точке упорядочения в форме SDW T_N и появлению нематических флуктуаций при температуре выше T_N [9]. Последние проявляются как в магнитных измерениях, так и в электронной проводи-

мости в широком диапазоне температур, охватывающем десятки градусов Кельвина выше T_N . Существует предположение, что нематические флуктуации инициируют структурный переход от симметричной тетрагональной кристаллической структуры C_4 к анизотропной орторомбической структуре с симметрией C_2 [10, 11]. Этот переход происходит с понижением температуры при $T = T_s$, которая на несколько градусов выше, чем температура магнитного перехода T_N .

Кроме того, некоторые исследователи отмечают взаимосвязь между транспортными свойствами, в частности, вкладом спиновых флуктуаций в рассеяние носителей заряда, и сверхпроводящими параметрами, такими как критическая температура T_c и симметрия параметра порядка [3]. Для понимания различных факторов, влияющих на процесс рассеяния, важно оценить и сравнить скорости рассеяния на центрах различных типов: дефектах τ_d^{-1} , примесях τ_{imp}^{-1} , фононах τ_{ph}^{-1} и спиновых флуктуациях τ_{sf}^{-1} . Суммарная скорость рассеяния τ_{total}^{-1} может быть определена на основе измерений сопротивления материала постоянному току. Однако, чтобы оценить вклад спиновых флуктуаций необходимо исследовать отклик на переменное электромагнитное поле, изменяющееся с частотой ω , которая сопоставима со скоростью рассеяния на спиновых флуктуациях τ_{ph}^{-1} . В нашей работе мы использовали метод регистрации микроволнового по-

глощения на частоте около 10^{10} Гц для изучения влияния спиновых флуктуаций на рассеяние носителей заряда в сверхпроводниках.

Экспериментальные методы и техника

В соответствии с классической теорией Друде, удельное сопротивление материалов с металлической проводимостью можно описать с помощью нескольких физических параметров:

$$\rho = \frac{m^*}{e^2 n} \tau^{-1}, \quad (1)$$

где m^* , e и n — эффективная масса, заряд и концентрация носителей тока (электронов или дырок). Как уже упоминалось ранее, скорость рассеяния τ^{-1} зависит от нескольких факторов: рассеяние на дефектах и примесях, обозначаемое как τ_d^{-1} (а), “электрон-электронное рассеяние”, происходящее при взаимодействии (столкновении) квазичастиц ферми-жидкости друг с другом, τ_e^{-1} (б), рассеяние, вызванное колебаниями магнитных моментов или спиновыми корреляциями (если материал обладает магнитными моментами, взаимодействующими между собой), обозначаемое как τ_{sf}^{-1} (в). Также возможны и другие процессы рассеяния, но в исследованных нами соединениях преобладают те, что были упомянуты выше. Зависимость удельного сопротивления от температуры в основном определяется изменением скоростей рассеяния. Эту зависимость можно представить в виде суммы трёх слагаемых: $\rho(T) = \rho_0 + \rho_e(T) + \rho_{sf}(T)$. Первый член ρ_0 , связанный с рассеянием на примесях и дефектах, не зависит от температуры. Он определяет остаточное удельное сопротивление при температуре $T = 0$. Температурные зависимости последних двух слагаемых — ρ_e , которое отвечает за рассеяние на электронах, и ρ_{sf} , возникающее из-за рассеяния на спиновых флуктуациях, имеют различную форму: $\rho_e(T) \propto T^2$ [12], в то время как $\rho_{sf}(T) \propto T$ [5, 7, 8]. В общем случае зависимость удельного сопротивления от температуры можно описать следующим выражением:

$$\rho(T) = \rho_0 + A_1 T + A_2 T^2. \quad (2)$$

Таким образом, исследуя экспериментальную зависимость удельного сопротивления образца от температуры, можно определить преобладающий механизм рассеяния. Зная эффективную массу и концентрацию носителей заряда, можно оценить общую скорость рассеяния τ^{-1} , используя уравнение (1).

В данном исследовании была изучена температурная зависимость удельного электрического сопротивления $\rho(T)$ на основе измерений сопротивления $R(T)$ в диапазоне от 4.2 до 200 К. Сопротивление измерялось стандартным четырехконтактным методом при постоянном токе около 1 мА. Токовые и потенциальные контакты были закреплены на плоскости ab кристалла с помощью серебряной токопроводящей пасты. В результате была определена

продольная составляющая сопротивления R_{ab} , которая затем была преобразована в удельное сопротивление ρ , учитывая размеры кристалла.

Для измерения микроволнового поглощения (МВП) мы использовали стандартный ЭПР-спектрометр BER-418s фирмы Bruker, который работает на частоте около 9.5 ГГц. Мы измерили амплитуду микроволновых потерь $A_{\text{МВП}}$ в резонаторе спектрометра с образцом в диапазоне температур от 4.2 до 175 К.

Известно, что в проводящих материалах микроволны поглощаются в поверхностном слое. Поэтому амплитуда МВП прямо пропорциональна объёму этого слоя. Это происходит при условии, что глубина скин-слоя δ значительно больше, чем длина свободного пробега электрона l_e [13]. Изменение глубины скин-слоя с понижением температуры приводит к температурной зависимости сигнала амплитуды микроволнового поглощения $A_{\text{МВП}}$. Скин-слой связан с удельным сопротивлением ρ через уравнение

$$\delta = c \sqrt{\frac{\rho}{2\pi\omega\mu_0}},$$

где c — скорость света, ω — частота, а μ_0 — магнитная проницаемость вакуума. Это означает, что $A_{\text{МВП}} \propto \rho^{1/2}$, что свидетельствует о вкладе омических потерь в микроволновое поглощение. Кроме того, на амплитуду МВП влияют магнитные потери, которые пропорциональны статической магнитной восприимчивости χ_0 . Их вклад определяется соотношением частоты измерения ω и скорости спинового рассеяния, которая приблизительно равна τ_{sf}^{-1} . Учитывая все эти факторы, амплитуда поглощения микроволн становится следующей:

$$A_{\text{МВП}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \omega_0}{2}} \sqrt{\rho} \left[1 + \frac{1}{2} (\chi'(T) - \chi''(T)) \right], \quad (3)$$

где χ' действительная и χ'' мнимая компоненты магнитной восприимчивости, которые определяются с помощью формул:

$$\chi' = \chi_0 \frac{1}{1 + (\omega\tau_{sf})^2}, \quad (4)$$

$$\chi'' = \chi_0 \frac{\omega\tau_{sf}}{1 + (\omega\tau_{sf})^2}. \quad (5)$$

Уравнение (3) было выведено по аналогии с тем, как это сделал С. Барнс для описания спинового резонанса в металлических образцах с магнитными примесями [14].

Мы исследовали влияние спиновых флуктуаций на рассеяние носителей тока в кристаллах $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ с различной концентрацией кобальта, применяя методы измерения удельного сопротивления постоянному току и микроволнового поглощения. Процесс выращивания кристаллов был подробно описан в статье [15], а их транспортные и магнитные свойства представлены в работах [15, 16].

Результаты и обсуждение

Ниже мы рассмотрим температурные зависимости удельного сопротивления постоянному току и микроволнового поглощения для двух кристаллов $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$: с $x = 0.05$, что соответствует слабо легированному состоянию, и с $x = 0.075$, соответствующему степени легирования выше оптимальной. Это позволит нам выявить их характерные особенности и провести анализ.

График зависимости удельного сопротивления от температуры для образца $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.95}\text{Co}_{0.05})_2\text{As}_2$ представлен на рис. 1. Эта зависимость отражает все ключевые особенности, характерные для кристаллов $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ с концентрацией кобальта меньше оптимальной, то есть $x < 0.07$ [1–4, 17]. В частности, наблюдается металлический ход с положительным наклоном в интервале температур $T_s < T < 200$ К, с линейной зависимостью $\rho(T) \propto T$ при $T > 115$ К и нарушением линейности при приближении к точке структурного перехода $T_s \approx 75$ К. При достижении T_s сопротивление резко возрастает, после чего изменяется незначительно, а затем падает до нуля при переходе в сверхпроводящее состояние при $T = T_c$.

Отклонение хода от линейности связано с появлением нематических флуктуаций. Магнитные флуктуации, определяющие величину удельного сопротивления, имеют сильно анизотропный параметр порядка страйпового типа. Поэтому скорости рассеяния на них для двух кристаллографических направлений (a и b) сильно различаются: $\rho_b > \rho_a$. Теоретическое описание этого эффекта дано в работе [8].

Данные измерений микроволнового поглощения дают дополнительную информацию о флуктуациях. Температурная зависимость амплитуды МВП для образца $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.95}\text{Co}_{0.05})_2\text{As}_2$ представлена на рис. 1 вместе с $\rho(T)$. Для анализа поведения $A_{\text{МВП}}(T)$ используются уравнения (3)–(5). При этом мы предполагаем линейную зависимость $\rho(T)$ и $\chi_0(T)$. Температурная зависимость скорости рассеяния используется в виде, предложенном в [18]:

$$\tau^{-1}(T) = \frac{aT}{(T + \Theta)^{1/2}} + bT^2, \quad (6)$$

где $\Theta \approx J_1/k_B \approx 500$ К – среднеполевая температура магнитного упорядочения в плоскости ab . Первое слагаемое в правой части уравнения (6) связано с рассеянием на спиновых флуктуациях, а второе описывает электрон-электронное рассеяние. Учитывая, что в микроволновое поглощение вклад вносит только рассеяние на спиновых флуктуациях τ_{sf}^{-1} (формулы (3)–(5)), для описания скорости рассеяния будем использовать только первое слагаемое в уравнении (6). Результат подгонки показан на рис. 1 сплошной кривой. Величина τ^{-1} будет обсуждаться ниже.

Изменение температурных зависимостей удельного сопротивления и амплитуды МВП в кристалле $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ при увеличении концентрации кобальта до значений, превышающих оптимальные ($x > 0.07$), будет рассмотрено ниже на примере кристалла $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.925}\text{Co}_{0.075})_2\text{As}_2$. В соответствии с фазовой диаграммой [1, 15] в образце такого состава не происходит ни структурного перехода, ни магнитного упорядочения. Полученные для этого образца зависимости $\rho(T)$ и $A_{\text{МВП}}(T)$, представленные на рис. 2, хорошо согласуются с этим утверждением. На обеих кривых нет особенностей, связанных с изменением структуры или магнитного состояния. Наблюдается лишь резкое падение значения (до 0 в случае удельного сопротивления) при переходе образца в сверхпроводящее состояние $T_c = 24$ К. Зависимость $\rho(T)$ имеет достаточно длинный линейный участок от 100 до 300 К и подъём при $T = 43$ К. Зависимость $A_{\text{МВП}}(T)$ нелинейна во всём диапазоне температур измерения от T_c до 165 К. Чёрной кривой на рис. 2 показан фиттинг этой зависимости с использованием уравнений (3)–(6).

Одним из важнейших параметров исследованных соединений, определяющим величину и поведение как удельного сопротивления (уравнение (1)), так и микроволнового поглощения (уравнения (3)–(6)), является

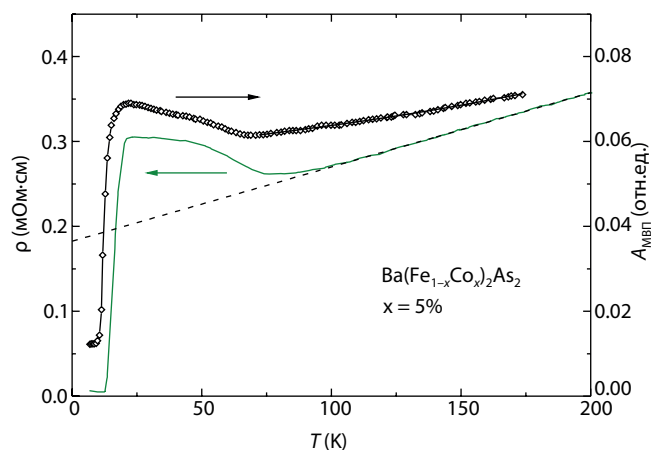


Рис. 1. Температурные зависимости амплитуды МВП (чёрные ромбы) и удельного сопротивления (зелёная кривая) кристалла $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.95}\text{Co}_{0.05})_2\text{As}_2$. Чёрная кривая – фиттинг амплитуды МВП с использованием уравнений (3)–(6) в диапазоне температуры от 75 до 175 К.

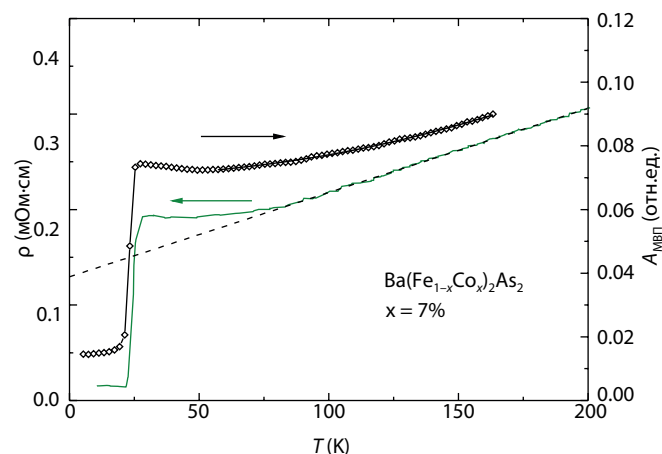


Рис. 2. Температурные зависимости амплитуды МВП (чёрные ромбы) и удельного сопротивления (зелёная кривая) кристалла $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.925}\text{Co}_{0.075})_2\text{As}_2$. Чёрная кривая – фиттинг амплитуды МВП с использованием уравнений (3)–(6) в диапазоне температуры от 60 до 165 К.

скорость рассеяния τ^{-1} (или время рассеяния τ). Значения параметров, полученные путём фиттинга теоретической зависимости $A_{\text{МВП}}(T)$ (уравнения (3)–(5)) к экспериментальным данным, составили: τ^{-1} изменяется от $2.1 \cdot 10^{10}$ до $6.3 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ при возрастании температуры в диапазоне от 75 до 185 К для образца $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.95}\text{Co}_{0.05})_2\text{As}_2$. А для образца $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.925}\text{Co}_{0.075})_2\text{As}_2$ она изменяется от $2 \cdot 10^{10}$ до $1.5 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ при возрастании температуры от 60 до 185 К. Полученные значения скоростей рассеяния существенно ниже их оценок, сделанных для аналогичных образцов на основе измерений на постоянном токе и представленных в литературе: $3 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ при 300 К [19] и $3.5 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ при 100 К [20]. Это расхождение можно понять, если принять во внимание, что оценки на основе измерений на постоянном токе дают полную скорость рассеяния τ^{-1} , которая определяется всеми механизмами, включая примесный. А значения, полученные в результате аппроксимации данных МВП, относятся только к рассеянию на спиновых флуктуациях τ_{sf}^{-1} .

Это объяснение согласуется с результатами, опубликованными в работе [21] (полученных методом “ultrafast time-resolved polarimetry” (сверхбыстрой поляриметрии с временным разрешением)). Был обнаружен двухстадийный процесс релаксации спиновой системы, возбуждённой фемтосекундным импульсом поляризованного света. На первом этапе происходит быстрая термализация зарядов за время 10^{-13} с после возбуждающего импульса. Второй этап – это медленное восстановление через нематические флуктуации за время 10^{-11} – 10^{-10} с . Видно, что величины скоростей, полученные из анализа, соответствуют второму медленному этапу релаксации спиновой системы.

Заключение

Чтобы понять, какие процессы рассеивания носителей тока влияют на сопротивление и поглощение микроволн в кристаллах $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$, мы изучили температурные зависимости удельного сопротивления (ρ) и амплитуды поглощения микроволн ($A_{\text{МВП}}$) для образцов с концентрацией кобальта $x = 0.05$ и 0.075 . Результаты анализа показали, что отклонение зависимости $\rho(T)$ от линейности при температуре ниже 100 К не связано с переходом к ферми-жидкостному состоянию, когда $\rho(T) \propto T^2$. Это отклонение обусловлено нематическими

флуктуациями, которые возникают в материале. Скорость рассеяния на спиновых флуктуациях, обозначенная как τ_{sf}^{-1} , была определена путём описания температурной зависимости $A_{\text{МВП}}$.

Литература

1. Ni N., Tillman M.E., Yan J.Q., Kracher A., Hannahs S.T., Bud'ko S.L., Canfield P.C.: Phys. Rev. B **78**, 214515 (2008)
2. Wang X.F., Wu T., Wu G., Chen H., Xie Y.L., Ying J.J., Yan Y.J., Liu R.H., Chen X.H.: Phys. Rev. Lett. **102**, 117005 (2009)
3. Doiron-Leyraud N., Auban-Senzier P., Cotret S.R.D., Bourbonnais C., Jérôme D., Bechgaard K., Taillefer L.: Phys. Rev. B **80**, 214531 (2009)
4. Nakajima M., Ishida S., Tanaka T., Kihou K., Tomioka Y., Saito T., Lee C.H., Fukazawa H., Kohori Y., Kakeshita T., Iyo A., Ito T., Eisaki H., Uchida S.: Sci. Rep. **4**, 5873 (2014)
5. Moriya T., Takahashi Y., Ueda K.: J. Phys. Soc. Jpn. **59**, 2905 (1990)
6. Hlubina R., Rice T.M.: Phys. Rev. B **51**, 9253 (1995)
7. Kemper A.F., Korshunov M.M., Devereaux T.P., Fry J.N., Cheng H.P., Hirschfeld P.J.: Phys. Rev. B **83**, 184516 (2011)
8. Fernandes R.M., Abrahams E., Schmalian J.: Phys. Rev. B **107**, 217002 (2011)
9. Böhmer A.E., Chu J.H., Lederer S., Yi M., Nat. Phys. **18**, 1412–1419 (2022)
10. Nandi S., Kim M.G., Kreyssig A., Fernandes R.M., Pratt D.K., Thaler A., Ni N., Bud'ko S.L., Canfield P.C., Schmalian J., McQueeney R.J., Goldman A.I.: Phys. Rev. Lett. **104**, 057006 (2010)
11. Fernandes R.M., Vanbeebber L.H., Bhattacharya S., Chandra P., Kepens V., Mandrus D., McGuire M.A., Sales B.C., Sefat A.S., Schmalian J.: Phys. Rev. Lett. **105**, 57003 (2010)
12. Абрикосов А.: Основы теории металлов. Москва: Мир, 1979.
13. Klein O., Donovan S., Dressel M., Grüner G.: Int. J. Infrared Milli Waves **14**, 2423–2457 (1993)
14. Barnes S.: Advances in Physics **30**, 801 (1981)
15. Aswartham S., Nacke C., Friemel G., Leps N., Wurmehl S., Wizen N., Hess C., Klingeler R., Behr G., Singh S., Behner B.: J. Cryst. Growth **314**, 341 (2011)
16. Grafe H.J., Gräfe U., Dioguardi A.P., Curro N.J., Aswartham S., Wurmehl S., Büchner B.: Phys. Rev. B **90**, 094519 (2014)
17. Ning F., Ahilan K., Imai T., Sefat A.S., Jin R., McGuire M.A., Sales B.C., Mandrus D.: J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 013711 (2009)
18. Zhang G.M., Su Y.H., Lu Z.Y., Weng Z.Y., Lee D.H., Xiang T.: EPL **86**, 37006 (2009)
19. Barisic N., Wu D., Dressel M., Li L.J., Cao G.H., Xu Z.A.: Phys. Rev. B **82**, 054518 (2010)
20. Rullier-Albenque F., Colson D., Forget A., Alloul H.: Phys. Rev. Lett. **103**, 057001 (2009)
21. Patz A., Li T., Ran S., Fernandes R.M., Schmalian J., Bud'ko S.L., Canfield P.C., Perakis I.E., Wang J.: Nat. Commun. **5**, 3229 (2014)

Идентификация компонент спектра ЭПР механоактивированного глюконата кальция в W-диапазоне

М. М. Ахметов, Г. Г. Гумаров, Р. Б. Зарипов, Ю. В. Садчиков, А. Н. Ашихмин

Лаборатория радиационной химии и радиобиологии, лаборатория спиновой физики и спиновой химии, лаборатория моделирования физико-механических процессов и систем

Методом электронного парамагнитного резонанса в X- и W-диапазонах исследован глюконат кальция, полученный при механоактивации. Спектр в W-диапазоне является трёхкомпонентным и хорошо описывается вкладами от двух типов радикалов с различными g-факторами: углеродные радикалы δ -глюконолактона и радикал $(\text{Ca}-\text{OC}_6\text{H}_{11}\text{O}_6)^\bullet\delta\text{-GL}$, содержащий атом кальция. Параметры данных спектров, полученные в результате квантово-химических расчётов, полностью согласуются с экспериментальными.

Identification of EPR spectrum components of mechanically activated calcium gluconate in the W-range

M. M. Akhmetov, G. G. Gumarov, R. B. Zaripov, Yu. V. Sadchikov, A. N. Ashikhmin

Laboratory of radiation chemistry and radiobiology, Laboratory of spin physics and spin chemistry, Laboratory for modeling physical and mechanical processes and systems

Calcium gluconate obtained by mechanical activation have been studied by the electron paramagnetic resonance method in the X- and W-ranges. The spectrum in the W-range is three-component and is well described by contributions from two types of radicals with different g-factors: carbon radicals of δ -gluconolactone and the radical $(\text{Ca}-\text{OC}_6\text{H}_{11}\text{O}_6)^\bullet\delta\text{-GL}$ containing a calcium atom. The parameters of these spectra, obtained as a result of quantum-chemical calculations, are completely consistent with the experimental ones.

Введение

Глюконаты металлов являются одними из наиболее распространённых углеводов и находят применение в самых различных отраслях промышленности. В частности, D-глюконат кальция (ГК) широко применяется в медицине, фармацевтике, и химической промышленности, поскольку он нетоксичен и полностью биоразлагаем [1]. Кроме того, он широко используется в качестве минеральной и питательной добавки в пищевой, кормовой промышленности. Известно, что мировое производство глюконатов металлов (Na, Ca, Fe, Cu и т. д.) оценивается примерно в 10^5 тонн. Удивительно, но при такой большой значимости в промышленных и медицинских применениях, кристаллическая структура D-глюконата кальция была определена недавно [2]. Оказалось, что структура глюконата кальция включает координационные полимеры, а координационное число кальция равно девяти. Окружение иона кальция является основной причиной того, что его глюконат стабилен при изменении температуры.

Известно, что механохимическая обработка глюконата кальция в планетарной шаровой мельнице приводит к значительному повышению терапевтической эффективности при лечении ряда заболеваний, связанных с дефицитом

кальция. Было установлено, что в ходе механохимической обработки глюконата кальция образуются свободные радикалы. Вместе с тем, структурные изменения, происходящие при механоактивации, были не до конца выяснены. Также известно, что взаимодействие радикалов, возникающих при механоактивации, с компонентами окружающей среды может существенно влиять на их возникновение и стабилизацию.

Метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) является одним из наиболее информативных при изучении свободных радикалов [3]. В нашем случае, для установления структуры радикалов, образующихся при механохимической активации, в работе [4] использовали импульсные методы ЭПР и квантово-химические расчёты. Было рассмотрено несколько моделей радикалов для описания ЭПР-спектров в X-диапазоне, согласно которым наиболее вероятной структурой радикала является молекулярная структура, образованная в результате разрыва связи Ca–O. Однако окончательные выводы не были сформулированы, так как экспериментальные данные можно было описать несколькими моделями. Методы квантовой химии позволяют установить связь между структурой молекулы и параметрами спектров ЭПР. В нашем случае применялся программный пакет ORCA,

реализующий, в частности, метод теории функционала плотности, в том числе содержащий широкий набор оптимизации молекулярных структур [5].

Методы исследования и образцы

В качестве исходного материала был использован глюконат кальция производства Тюменского химико-фармацевтического завода (ТХФЗ). Перед механоактивацией препарат подвергался сушке в течение 3 ч методом выдержки в предварительном вакууме (или методом откачки форвакуумным насосом). Механоактивация образцов производилась на шаровой мельнице марки “ЛАИР” в Удмуртском ФИЦ УрО РАН (МАКГ). Спектры ЭПР были записаны в X- и W-диапазоне на спектрометрах серии Elexsys фирмы Bruker, оснащённых криостатом фирмы Oxford Instruments, позволяющим изменять температуру в интервале от 4.2 до 330 K. Измерение в W-диапазоне было проведено в импульсном режиме, длительность 90° -импульса составляла 80 нс, температура 80 K.

При проведении квантово-химических расчётов структуры исследуемых молекул были взяты из базы данных химических соединений и смесей PubChem. Нумерация атомов углерода проводилась относительно карбоксильного углерода с двойной связью. Предварительная геометрическая оптимизация структур радикалов и разнообразных фрагментов молекулы глюконата кальция осуществлялась программой Avogadro. Конечная оптимизация структуры осуществлялась с применением алгоритмов, имеющихся в программе ORCA версии 5.04. Квантово-химические расчёты проводили неограниченным методом Кона-Шэма с применением различных функционалов и базисных наборов. Результаты, наиболее согласующиеся с экспериментом, были получены при расчётах с использованием функционала UB3LYP/UBP86 и базисных наборов TZVP и 6-311++g(d,p), EPR-II, EPR-III и IGLO. Наиболее сложные задачи решались на компьютерах лаборатории моделирования физико-механических процессов и систем.

Результаты исследований

Эхо-детектированный спектр ЭПР глюконата кальция в W-диапазоне состоит из двух частей (рис. 1). Среднее значение g-фактора одной из них составляет ~ 2.005 и совпадает со значением, определённым ранее в X-диапазоне. Другая часть спектра со средним значением $g \sim 2.001$ имеет форму, характерную для поликристаллов с осевой симметрией. Ширина ЭПР-спектра в X-диапазоне составляет около 10 Гс, а в W-диапазоне около 130 Гс. Для рассматриваемых спектров ЭПР форма спектра в X-диапазоне в основном определяется сверхтонким взаимодействием (СТВ) и его анизотропией, а анизотропия g-фактора практически незаметна. Напротив, в W-диапазоне форма спектра определяется в основном анизотропией g-фактора, а анизотропия СТВ оказы-

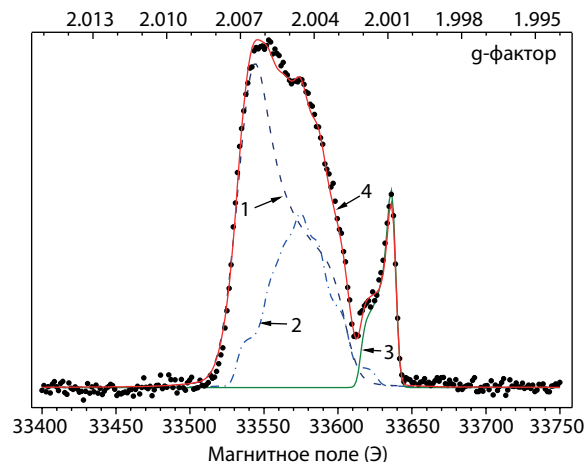


Рис. 1. ЭПР-спектр МАКГ в W-диапазоне (94.2 ГГц): экспериментальный (*), рассчитанный (линия 4) и составляющие компоненты (линии 1–3) ($T = 80$ K).

вается менее существенно. Это упрощает разложение спектров на компоненты и позволяет получить однозначное решение.

Параметры g-тензоров компонентов спектров ЭПР, полученные в результате подгонки, представлены в таблице 1. Значения g-тензоров, полученные для 1-й и 2-й компонентов спектра ЭПР (рис. 1), лежат в диапазоне значений характерных для органических радикалов. В частности, значения g-фактора радикалов в сахарозе, подвергнутой облучению [6], близки к полученным нами значениям. Эти радикалы имеют неспаренный электрон, локализованный на молекулярной π -орбитали. В сравнении с радикалами в полиолах [7], имеющих линейную структуру, радикалы в сахарозе имеют относительно меньшие значения тензора СТВ.

В ходе квантово-химических расчётов рассматривались π -радикалы, образующиеся в результате отрыва протона от атомов углерода. Наиболее подходящими для описания экспериментальных спектров ЭПР оказались углеродные радикалы на атомах углерода C3 (компонент 1) и C2 (компонент 2). В этих структурах три гидроксильных атома кислорода (при атомах C2, C3 и C4) образуют связь с атомом кальция по донорно-акцепторному механизму. В случае рассматриваемых нами углеродных радикалов, которым соответствует низкополевая часть спектра, ближайшими магнитными ядрами являются β -протоны с C–H связями. Небольшие значения констант сверхтонкого расщепления,

Таблица 1. Значения g-фактора для радикалов в МАКГ, полученные в результате моделирования спектров ЭПР (EasySpin) и квантово-химических расчётов (ORCA).

Радикал	EasySpin			ORCA		
	g_x	g_y	g_z	g_x	g_y	g_z
Компонент 1	2.0029(0)	2.0066(2)	2.0074(3)	2.0029	2.0064	2.0077
Компонент 2	2.0033(1)	2.0048(1)	2.0067(8)	2.0032	2.0049	2.0059
Компонент 3	2.0009(0)	2.0009(3)	2.0023(4)	2.0009	2.0012	2.0027

вероятно, связаны с тем, что торсионные углы между осью π -радикалов и направлением C–H связей близки к 90° . В этом случае, согласно соотношению Мак-Коннела, величина СТВ оказывается незначительной.

Для идентификации линии в высокополевой части со средним значением g -фактора 2.001 были проведены расчёты для различных радикалов, образующихся как на атомах кислорода, так и на атоме кальция. Радикалы на атомах кальция ранее наблюдались только в газовой фазе. Например, металлоорганический радикал Ca-CH_3 [8], был синтезирован в печи Бройда в потоке метилена и атомов металла в газовой фазе. Наши квантово-химические расчёты для такого радикала показали осевую симметрию g -фактора, подобную для рассматриваемой. Однако значение компонентов g -тензора такой линии сильно смещено в область сильных полей относительно нашей. Аналогичные радикалы были получены с другими двухвалентными атомами (Mg и Sr) [9, 10]. Кроме Ca-CH_3 , экспериментально в газовой фазе был также получен радикал моноксид кальция Ca-OCH_3 [11]. Для такого радикала рассчитанные значения g -тензора составили [1.9999 1.9999 2.0023].

Значения g -тензора указывают на радикал CO_2^- , предварительные расчёты дают для него g -тензор [2.0016 2.0016 2.0023]. В этом случае получается также осевая симметрия, но с меньшей анизотропией g -тензора относительно наблюдаемой в нашем эксперименте. Аргументом против такого радикала является тот факт, что ЭПР-сигналы от подобного радикала отсутствуют в натриевой соли глюконовой кислоты.

Значения g -тензора, наиболее близкие к экспериментально наблюдаемым, были получены для молекулярной структуры, показанной на рис. 2. Данная структура состоит из атома кальция, связанного с одним анионом глюконовой кислоты и с атомами кислорода, принадлежащими глюконолактону. Важно отметить, что связь атома кальция и атома кислорода образована по донорно-акцепторному механизму. Это обусловлено тем, что атомы кислорода принадлежат к гидроксильной группе. В результате у атома кальция оказывается неспаренный электрон. Как правило, величина g_z имеет тенденцию к росту, когда неспаренный электрон взаимодействует

с катионом металла. Как видно из таблицы 1, разница между расчётами квантовой химии (ORCA) и экспериментальными данными (EasySpin) оказывается крайне малой и не превышает $1\text{--}8 \cdot 10^{-4}$.

Аргументом в пользу радикала на атоме кальция служит тот факт, что линия с g -фактором 2.001 наблюдается для глюконата магния. Магний также двухвалентен – у него два s -электрона на внешней оболочке. Тем не менее, для окончательной идентификации линии с $g = 2.001$ необходимы дополнительные исследования. Такими могут послужить импульсные методы ЭПР, в частности импульсный ДЭЯР.

Высшая занятая молекулярная орбиталь молекулярной структуры радикала $(\text{Ca-OC}_6\text{H}_{11}\text{O}_6)^\bullet\delta\text{-GL}$ сосредоточена около атома кальция. Соответственно, спиновая плотность для такой молекулярной структуры также оказывается сосредоточенной в основном около атома кальция.

Выводы

Применение ЭПР-спектроскопии W-диапазона для исследования механоактивированного глюконата кальция моногидрата позволило установить, что сигнал ЭПР обусловлен тремя вкладками. Наиболее интенсивная часть спектра обусловлена π -радикалами, локализованными на δ -глюконолактоне. Для окончательной и надёжной идентификации высокополевой части спектра нужны дополнительные исследования. Такие исследования имеют особое значение со стереохимической точки зрения, так как могут выявить возможную роль конфигурации лиганда. Формирование связи между диамагнитными ионами металла и различными органическими радикалами можно эффективно исследовать с помощью методов ЭПР, поскольку g - и A -тензоры чувствительны к взаимодействию радикала с ионами металла.

Литература

- Mariam I., Nagra S.A., Haq I., Ali S.: *Bioresource Technology* **101**, no. 11, 4075–4080 (2010)
- Bugris V., Dudas C., Kutus B., Harmat V., Csanko K., Brockhauser S., Palinko I., Terner P., Sipos P.: *Acta Cryst. B* **74**, 598–609 (2018)
- Lund A., Shiotani M.: *EPR of Free Radicals in Solids*, p. 387. Dordrecht: Springer, 2012.
- Zaripov R.B., Aminova R.M., Salikhov K.M.: *Appl. Magn. Reson.* **35**, 337–358 (2008)
- Neese F.: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Molecular Science* **2**, 73–78 (2012)
- De Cooman H., Keysabyl J., Kusakovskij J., Van Yperen-De Deyne A., Waroquier M., Callens F., Vrielinck H.: *J. Phys. Chem. B* **117**, no. 24, 7169–7178 (2013)
- Кочетков Н.К., Кудряшов Л.И., Членов М.А.: *Радиационная химия углеводов*, с. 288. М.: Наука, 1978.
- El Hammadi A., El Mouhtadi M., Cardy H., Dargelos A.: *J. Mol. Structure (TheoChem)* **624**, 1–11 (2003)
- Brazier C.R., Bernath P.F.: *J. Chem. Phys.* **86**, no. 11, 5918–5922 (1987)
- Drissi El Bouzaidi R., El Hammadi A., El Mouhtadi M., Cardy H., Dargelos A.: *J. Mol. Structure (TheoChem)* **497**, 165–171 (2000)
- Elhanine M., Lawruszczuk R., Soep B.: *Chem. Phys. Lett.* **288**, 785–792 (1998)

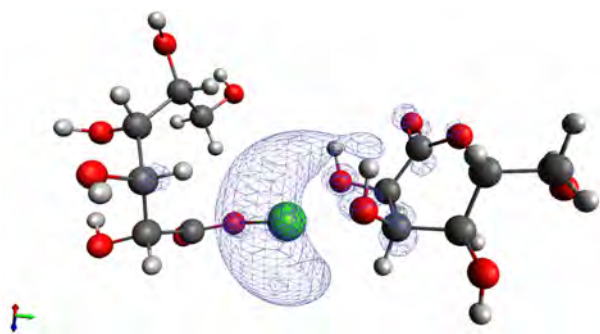


Рис. 2. Распределение спиновой плотности радикала $(\text{Ca-OC}_6\text{H}_{11}\text{O}_6)^\bullet\delta\text{-GL}$ (пунктиром указаны координационные связи).

Определение оптической нелинейности новых D-π-A хромофоров методами фемтосекундной спектроскопии

Д. Н. Петров, А. Г. Шмелев, Б. А. Хабибуллин, А. В. Леонтьев, Л. А. Нуртдинова,
Д. К. Жарков, Л. Н. Исламова¹, А. А. Калинин¹, М. Ю. Балакина¹, В. Г. Никифоров

Лаборатория квантовой оптики в алмазах

¹ Институт органической и физической химии им. А. Е. Арбузова ФИЦ КазНЦ РАН

В рамках работ по измерению нелинейно оптического коэффициента d_{33} хромофоров создана новая установка, отличающаяся использованием усиленных фемтосекундных импульсов с несущей длиной волны 800 нм в качестве излучения накачки. Исследуемые хромофоры относятся к хромофорам D-π-A типа. Образцы представлены в виде композитных материалов – тонких плёнок из полимеров с внедрёнными в них хромофорами. Показано, что полученные значения нелинейно-оптического коэффициента, измеренные с помощью фемтосекундных импульсов на длине волны 800 нм, совпадают с данными, полученными с использованием фемтосекундных импульсов на длине волны 1054 нм, что позволяет использовать данный метод для образцов, которые демонстрируют сильное поглощение или люминесценцию в областях 1000 и 500 нм.

Determination of optical nonlinearity of new d-π-A chromophores by femtosecond spectroscopy

D. N. Petrov, A. G. Shmelev, B. A. Khabibillin, A. V. Leontyev, L. A. Nurtadinova, D. K. Zharkov,
L. N. Islamova¹, A. A. Kalinin¹, M. Yu. Balakina¹, V. G. Nikiforov

Laboratory of quantum optics in diamonds

¹ Arbuzov IOPC FRC Kazan Scientific Center of RAS

As part of the work on measuring the nonlinear optical coefficient d_{33} of chromophores, a new installation has been created, characterized by the use of amplified femtosecond pulses with a carrier wavelength of 800 nm as pump radiation. The chromophores under study belong to the D-π-A type chromophores. The samples are presented in the form of composite materials – thin films of polymers with chromophores embedded in them. It is shown that the obtained values of the nonlinear optical coefficient measured using femtosecond pulses at a wavelength of 800 nm coincide with the data obtained using femtosecond pulses at a wavelength of 1054 nm, which allows using this method for samples that exhibit strong absorption or luminescence in the regions of 1000 and 500 nm.

Введение

Интерес к нелинейно-оптическим органическим материалам вызван возможностью их применения в органических светодиодах, устройствах оптической связи и в создании приборов для хранения и высокоскоростной обработки данных [1–3]. D-π-A хромофоры, являясь источниками нелинейно-оптического отклика (НЛО), представляют собой один из значимых структурных элементов НЛО-материалов. Данный тип хромофоров состоит из трёх частей: донорного и акцепторного фрагментов, соединённых между собой мостиковым фрагментом π-спейсером. В частности, от способности донорного и акцепторного фрагментов стабилизировать положительный и отрицательный заряд соответственно, меняются и нелинейно-оптические свойства самого хромофора. Подбор электроакцепторных и электродонорных

частей хромофора, а также протяжённости и строения π-спейсера, позволяет настраивать физико-химические свойства синтезируемых хромофоров.

Органические хромофоры придали новый импульс созданию материалов с высокой НЛО-активностью. Систематическое исследование свойств новых D-π-A хромофоров является актуальной задачей при создании НЛО-материалов поскольку помимо высокой НЛО-активности отдельной молекулы хромофора, необходимо добиться эффективного преобразования в материал с высокой НЛО-активностью.

В данной работе мы исследовали нелинейно-оптические свойства композиционных материалов (тонких плёнок) с внедрёнными хромофорами D-π-A типа с помощью метода генерации второй гармоники с применением усиленного фемтосекундного лазерного излучения с длиной волны несущей $\lambda = 800$ нм. Для сравнения проводились измерения с использованием фемтосекундного лазерного

излучения с длиной волны несущей $\lambda = 1028$ нм, применяемого в предыдущих работах [4].

Теоретическая часть

НЛО-композитный материал был изготовлен на основе синтезированных D- π -A хромофоров путём их внедрения в полимерную матрицу-хозяина в качестве молекул-гостей. НЛО-активность полученных материалов достигается за счёт нецентросимметричной организации хромофоров в ходе процедуры электрирования – ориентации хромофоров в электрическом поле, приложенного к материалу при температуре близкой к температуре стеклования. При этом свойства НЛО-материала имеют зависимость от условий, при которых осуществлялось электретирирование материала [5].

Метод измерения, представленный в данной работе, является методом количественной оценки нелинейных свойств плёнок. В отличие от иных методов оценки, метод генерации второй гармоники позволяет значительно легче и быстрее получить информацию о свойствах нелинейно-оптического материала, так как он не требует знания точного значения показателя преломления исследуемых образцов. Этот метод также позволяет проводить относительные измерения нелинейно-оптического отклика для образцов, в которых содержатся хромофоры со схожими структурами.

Измерение нелинейно-оптических свойств проводилось с помощью установки, представленной на рис. 1. Излучение фемтосекундного лазера с длиной волны несущей 800 нм (энергия импульса 1.4 нДж, частота следования 90 МГц, длительность 30 фс) попадало в стретчер для растяжения усиливаемых импульсов. Затем растянутые во времени импульсы направляются в регенеративный усилитель. Регенеративное усиление является самым эффективным методом для передачи энергии импульсу от усилителя. В дальнейшем растянутые и усиленные импульсы попадают в компрессор для сжатия импульса во времени до первоначального состояния. Усиленный фемтосекундный импульс (несущая 800 нм, энергия импульса 16 мкДж, частота следования 3 кГц) попадает на образец, пройдя через диск нейтрального фильтра. Для возможности регулировки угла падения лазерного

излучения в пределах от 0 до 90° образец помещался на автоматизированный гониометр. За образцом помещался ряд фильтров: интерференционный светофильтр для отсекающего излучения лазера накачки и абсорбционный фильтр, исключающий боковую засветку и пропускающий длину волны 400 ± 40 нм. Дополнительное размещение диафрагмы обусловлено необходимостью геометрического отсекающего боковых засветок. Для определения оптической нелинейности синтезированных хромофоров измеренная интенсивность второй гармоники образца сравнивалась с заранее известной интенсивностью генерации второй гармоники (ГВГ) кристаллического кварца.

Экспериментальная часть

Донорно-акцепторный хромофор, связанный π -электронным мостиком, был синтезирован в лаборатории функциональных материалов ИОФХ им. А. Е. Арбузова ФИЦ КазНЦ РАН. В качестве донорного фрагмента применялся анилин с объёмным кремниевым заместителем, в качестве мостика винилена и в качестве акцепторной части хиноксалиновый и дициановинильный фрагменты. На рис. 2 представлена структурная схема хромофора. Синтезированные хромофоры были растворены в 5% растворе трихлорэтана, после чего к данному раствору добавлялся полимер полиметилметакрилата. Для проведения экспериментов использовались композиционные материалы в виде тонких плёнок с содержанием хромофора. Плёнки изготавливались методом наливки при вращении на стеклянных подложках толщиной 100 мкм. Полученный раствор отливался при 5000 об/мин.

Нелинейно-оптический коэффициент d_{33} определяли сравнивая интенсивность ГВГ опорного материала с интенсивностью ГВГ приготовленных образцов. Генерация лазерных импульсов осуществлялась при следующих параметрах: длина волны несущей излучения 800 нм, длительность импульсов 67 фс, частота следования импульсов 3 кГц, энергия импульса 75 мВт и диаметр пучка 2 мм. Средняя мощность импульса при этом составляла 225 мВт с пиковой интенсивностью импульса около 35.5 ГВт/см^2 . Источником опорного сигнала выступал кристалл α -кварца. Нелинейно-оптический коэффициент $d_{33,s}$ образца оценивался следующим образом [7]:

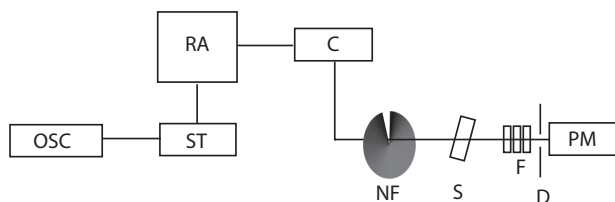


Рис. 1. Схема установки измерения интенсивности ГВГ. OSC – фемтосекундный лазер, ST – стретчер, RA – регенеративный усилитель, C – компрессор, NF – нейтральный фильтр, S – образец, закреплённый на гониометре, F – интерференционный и абсорбционные фильтры, D – диафрагма, PM – измеритель мощности.

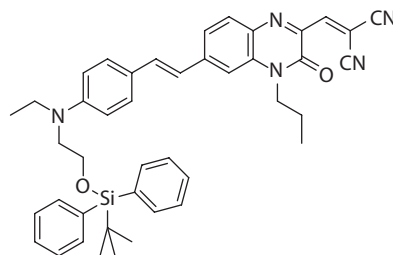


Рис. 2. Структурное изображение D- π -A хромофора состава анилин с объёмным кремниевым заместителем – винилен – хиноксалин и дициановиниль.

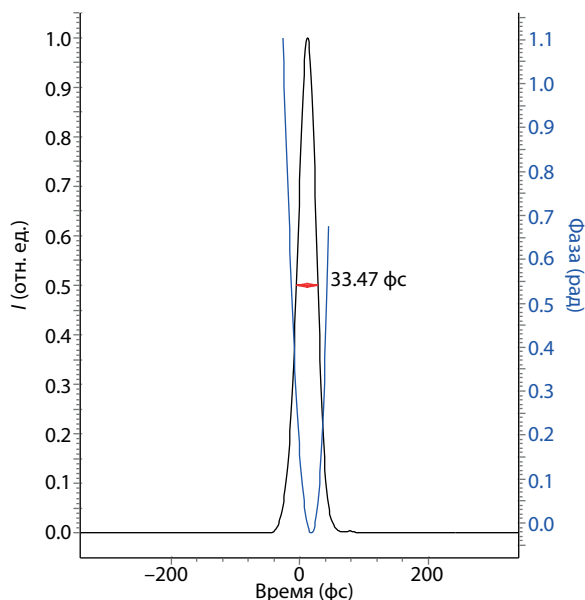


Рис. 3. Реконструкция лазерного излучения длиной волны 800 нм до усиления сигнала.

$$\frac{d_{33,s}}{d_{11,q}} = \sqrt{I_s/I_q} \frac{l_{c,q}}{l_s} F,$$

где $d_{11,q}$ – нелинейный коэффициент кварца (0.45 мкм/В), I_s , I_q – интенсивности ГВГ от образца и кварца соответственно, $l_{c,q}$ – длина когерентности для кварца (рассчитана при данных параметрах излучения накачки как 13 мкм), l_s – толщина образца, F – поправочный коэффициент (равен 1.2 при $l_{c,q} \gg l_s$) [8].

Измерение спектральной фазы и интенсивности фемтосекундных лазерных импульсов осуществлялось

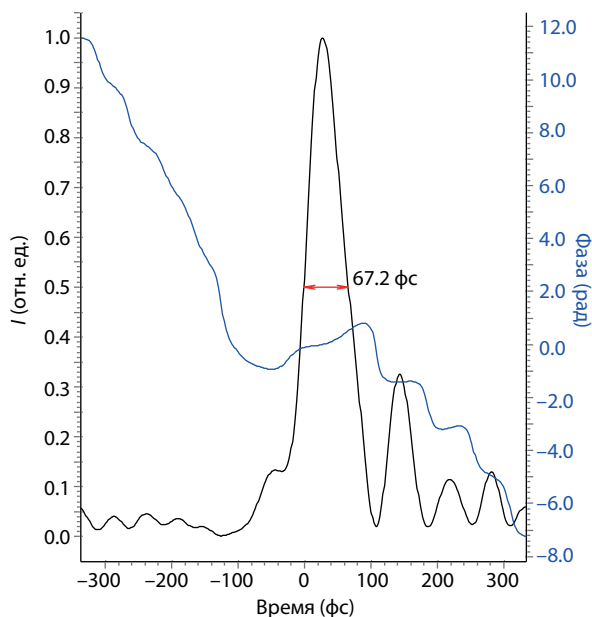


Рис. 4. Реконструкция лазерного излучения длиной волны 800 нм после усиления сигнала.

с помощью системы измерения спектральной фазы SPIDER-800-10 (“Авеста”). На рис. 3 и 4 представлены результаты проведенных измерений спектральной фазы и интенсивности лазерного излучения до усиления и после.

Для измерения НЛО-коэффициента d_{33} образцы подвергались электретированию в поле коронного разряда при температуре близкой к температуре стеклования полимера. Время полинга (электретирования) составляло 10 мин для образца 1703, и 20 мин для образца 1669, после чего образцы охлаждались в постоянном электрическом поле для “заморозки” полученной ориентации хромофоров в полимерном материале. Напряжение поля коронного разряда составляло 7 кВ, расстояние между поверхностью плёнки и вольфрамовым игольчатым электродом 1 см.

Результаты и обсуждения

В ходе проведенных экспериментов были определены значения оптической нелинейности двух типов полимерных образцов с содержанием хромофора с помощью усиленных фемтосекундных импульсов. Для образца с большим временем электретирования (1669) значение нелинейно-оптического коэффициента d_{33} составляет ≤ 40.5 пм/В, а для образца с меньшим временем полинга (1703) $d_{33} \leq 39$ пм/В. На рис. 5 приведён график зависимости интенсивности генерации второй гармоники образца от угла падения усиленного лазерного излучения. Для сравнения были проведены измерения оптической нелинейности с помощью процедуры, описанной в работе [4]. Для этого применялось лазерное излучение с длиной волны несущей 1028 нм и длительностью импульсов 200 фс. Результаты данных измерений дают следующие значения оптически-нелинейного коэффициента d_{33} : для образца 1669 ≤ 62 пм/В, для 1703 ≤ 57 пм/В. На рис. 6 приведён график зависимости интенсивности генерации второй гармоники образца от угла падения лазерного излучения с несущей длиной волны 1028 нм. На рис. 7

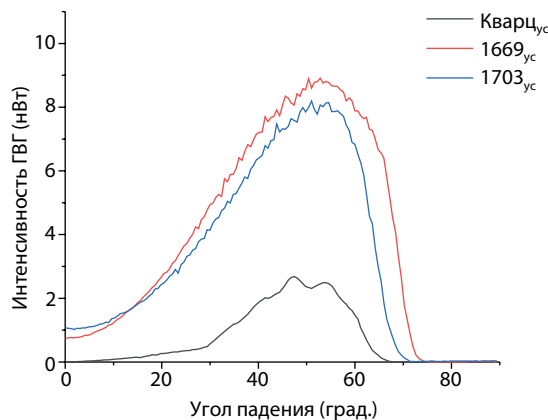


Рис. 5. Зависимость интенсивности генерации второй гармоники образца от угла падения усиленного лазерного излучения с несущей длиной волны 800 нм.

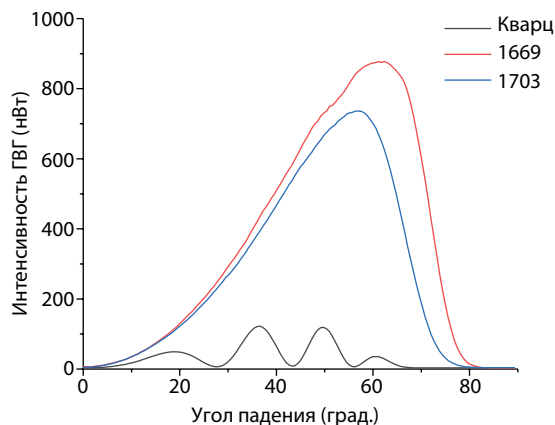


Рис. 6. Зависимости интенсивности генерации второй гармоники образца от угла падения лазерного излучения с несущей длиной волны 1028 нм.

совместно представлены зависимости нормированной интенсивности ГВГ от угла падения лазерного излучения для различных образцов, с помощью фемтосекундного излучения с несущей длиной волны 1028 нм, и усиленного фемтосекундного излучения с длиной волны 800 нм. Сравнение с классическим методом оценки оптической нелинейности показало хорошее совпадение.

Применение лазера, иного по сравнению с классическим методом оценки оптической нелинейности, обусловлено возможностью перестройки длины волны лазерного излучения в тех случаях, когда образцы проявляют люминесцентные свойства на длине волны ГВГ. А также появляется дополнительная возможность исследования образцов с усиленными лазерными импульсами.

Чтобы быть уверенным в том, что данные, полученные в ходе измерения усиленным лазерным импульсом, являются именно генерацией второй гармоники образца, была получена зависимость интенсивности ГВГ в зависимости от мощности лазерного излучения, представленная на рис. 8. Функция линейной аппроксимации в логарифмическом масштабе для образца 1669: $y = 2.47x - 3.72$, а для образца 1703: $y = 2.42x - 3.66$. Из этого следует, что

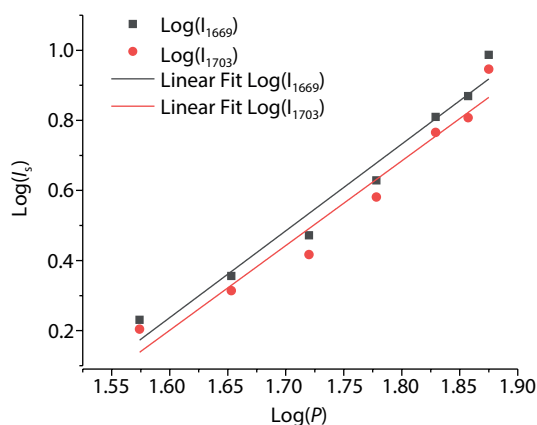


Рис. 8. Логарифмический график зависимости интенсивности ГВГ от мощности лазерного излучения.

коэффициент наклона графиков составляет $k \approx 2.45 \pm 0.21$, что соответствует двухфотонному процессу ГВГ.

Выводы

Мы показали в данной работе, что нелинейно-оптический коэффициент, измеренный методом сравнения генерации второй гармоники с эталоном с помощью высокомоощного фемтосекундного излучения на длине волны 800 нм, совпадает с данными, полученными при использовании фемтосекундного излучения на длине волны 1028 нм. Зависимость интенсивности излучения ГВГ от мощности накачки однозначно доказывает, что происходит двухфотонный процесс. Таким образом, можно заключить, что использование фемтосекундных импульсов на длине волны 800 нм поможет измерять нелинейно-оптический коэффициент в тех образцах, которые демонстрируют значительное поглощение на длине волны 1028 нм или на длине волны второй гармоники 525 нм или люминесцируют в диапазонах 500 нм.

Литература

1. Dalton L.R., Sullivan P.A., Bale D.H.: Chem. Rev. **110**, 25–55 (2010)
2. Dalton L.R., Sullivan P.A., Bale D.H.: Chem. Rev. B **1**, no. 1, 1–12 (2009)
3. Bures F.: RSC Adv. B **4**, 58826–58851 (2014)
4. Петров Д.Н., Шмелёв А.Г., Исламова Л.Н., Калинин А.А., Балакина М.Ю., Никифоров В.Г.: Люминесцентные свойства новых хромофоров с трицианофурановым электроакцепторным фрагментом, обладающих высокой оптической нелинейностью. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского. Ежегодник **23**, 78 (2024)
5. Burland D.M., Miller R.D., Wals C.A.: Chem. Rev. B **94**, no. 1, 31–75 (1994)
6. Shmelev A.G., Leontyev A.V., Zharkov D.K., Nikiforov V.G., Fazleeva G.M., Islamova L.N., Kalinin A.A., Vakhonina T.A., Mukhtarov A.S., Balakina M.Yu., Lobkov V. S.: Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. B **83**, 1480–1483 (2019)
7. Dalton R.L., Xu C., Harper A.W., Ghosh R., Wu B., Liang Z., Montgomery R., Jen A.K.-Y.: MCLC S&T, Sect. B: Nonlinear Opt. B **10**, 383–407 (1995)
8. Zhu Z., Li Z., Tan Y., Li Z., Li Q., Zeng Q., Ye C., Qin J.: Polymer B **47**, 7881–7888 (2006)

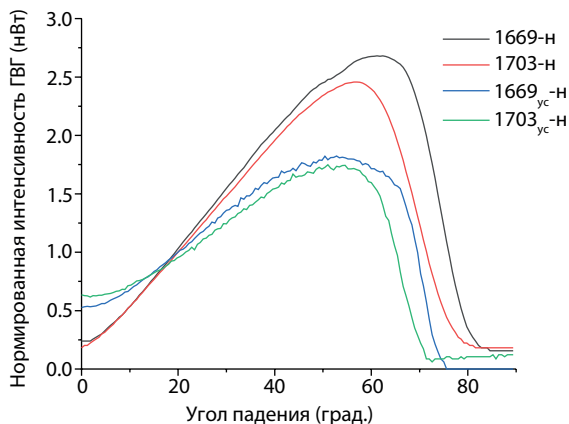


Рис. 7. Зависимость нормированной интенсивности ГВГ от угла падения лазерного излучения для различных образцов, ус – измерения проводимые с усиленным импульсом.

Импульсный отжиг кремния, имплантированного ионами индия и сурьмы

Р. И. Баталов, В. В. Базаров, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Г. А. Новиков, В. А. Шустов

Лаборатория интенсивных радиационных воздействий, лаборатория радиационной физики, лаборатория физики углеродных наноструктур и композитных систем

Проведена последовательная имплантация монокристаллического кремния (Si) ионами индия (In^+) и сурьмы (Sb^+) с энергией 30 кэВ и дозой $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ для каждого сорта ионов. Для отжига имплантированных слоёв Si:(In+Sb) применялся мощный импульсный ($\sim 100 \text{ нс}$) пучок ионов (C^+/H^+) с энергией 300 кэВ и с плотностью энергии импульса 1.0 Дж/см^2 , приводящий к образованию расплава на поверхности Si. Расчёт глубинного профиля примесных атомов показал их максимальную концентрацию 40 ат.% на глубине около 20 нм. В результате импульсного отжига обнаружена сегрегация примесных атомов к поверхности Si и их диффузия вглубь кристалла. Исследования фазового состава указывают на формирование фазы InSb с уровнем деформации растяжения в слое 0.6–0.7%. Из оптических ИК-спектров оценена концентрация электронов в слое ($2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$) за счёт донорной примеси Sb и показано образование интенсивной полосы поглощения при 3.85 мкм. Измерения фотоотклика на диодной меза-структуре при 300 К показали сдвиг края фоточувствительности до 1240 нм по сравнению с типовым Si-фотодиодом (ФД-24).

Pulsed annealing of silicon implanted with indium and antimony ions

R. I. Batalov, V. V. Bazarov, V. I. Nuzdin, V. F. Valeev, G. A. Novikov, V. A. Shustov

Intense beam laboratory, Laboratory of radiation physics (Department of radiation impact on materials), Laboratory of carbon nanostructures physics and composite systems

Monocrystalline silicon (Si) was sequentially implanted with indium (In^+) and antimony (Sb^+) ions with an energy of 30 keV and a dose of $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ for each ion grade. A powerful pulsed ($\sim 100 \text{ ns}$) ion beam (C^+/H^+) with an energy of 300 keV and a pulse energy density of 1.0 J/cm^2 was used to anneal implanted Si:(In+Sb) layers, resulting in the formation of a melt on the Si surface. The calculation of the deep profile of impurity atoms showed their maximum concentration of 40 at.% at a depth of about 20 nm. As a result of pulsed annealing, the segregation of impurity atoms to the Si surface and their diffusion deep into the crystal were detected. Studies of the phase composition indicate the formation of the InSb phase with a level of tensile strain in layers of 0.6–0.7%. The concentration of electrons in the layer ($2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) due to the donor impurity Sb is estimated from the optical IR spectra and the formation of an intense absorption band at $3.85 \text{ }\mu\text{m}$ is shown. Measurements of the photoresponse on a diode mesa structure at 300 K showed a shift in the edge of photosensitivity to 1240 nm compared with a typical Si photodiode (FD-24).

Введение

Кристаллический кремний (с-Si) с шириной запрещённой зоны $E_g = 1.12 \text{ эВ}$ при 300 К эффективно поглощает свет в области длин волн $\lambda = 0.3\text{--}1 \text{ мкм}$ (пропускание $T = 0$) и практически прозрачен для ближнего и среднего ИК-излучения с $\lambda = 1\text{--}25 \text{ мкм}$ ($T > 40\%$) [1]. Это фундаментальное обстоятельство способствует широкому применению с-Si в качестве фоточувствительного материала в фотоприёмных устройствах УФ-, видимого и ближнего ИК-диапазонов (до 1100 нм), но при этом ограничивает применение с-Si в устройствах ближнего и среднего ИК-диапазона ($\lambda = 1\text{--}10 \text{ мкм}$). В данной спектральной области базовыми материалами для фотоприёмников являются узкозонные полупроводники АЗВ5 (InGaAs, InAs, InSb) или КРТ (CdHgTe). Выращивание сплошных совершенных слоёв АЗВ5

полупроводников или КРТ на подложке с-Si затруднено из-за несоответствия параметров кристаллической решётки и коэффициентов теплового расширения плёнки и подложки [1].

Перспективным подходом к решению важной научно-практической задачи интеграции АЗВ5 материалов с Si является формирование слоёв наночастиц (с типовыми размерами 10–100 нм) узкозонных АЗВ5 материалов (InSb, InAs, $E_g = 0.17$ и 0.35 эВ), обладающих высокой подвижностью электронов ($\mu = (4\div 7) \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{Вс}$) [1], в приповерхностной области подложки с-Si с использованием неравновесных методов, таких как ионно-лучевой синтез. Данный метод включает в себя последовательную высокодозную имплантацию подложки с-Si ионами III и V групп периодической системы (например, In и Sb) для создания высокой концентрации примесных атомов на заданной глубине. Для устранения радиационных дефек-

тов, вызванных ионной имплантацией, и стимулирования роста наночастиц AlB5 проводится высокотемпературный (800–1100 °C) термический отжиг различной длительности (от миллисекунд до часов) в твёрдофазном режиме [2–4]. Как показано в данных работах, такой отжиг вызывает частичную потерю примесей за счёт испарения и не полностью устраняет радиационные дефекты. Альтернативой отжигу в печи может быть импульсный (наносекундный) отжиг мощными лазерными или ионными пучками в жидкофазном режиме (достижение расплава на поверхности), приводящий к образованию пересыщенных твёрдых растворов или наночастиц вторичных фаз [5, 6]. Следует отметить отсутствие публикаций в литературе по синтезу наночастиц AlB5 в Si с использованием импульсного (наносекундного) отжига, что является новизной данной работы. В настоящей работе исследуется влияние импульсной ионной обработки (ИИО) мощным ионным пучком (МИП) с составом C⁺/H⁺ на структуру, оптические и фотоэлектрические свойства слоёв Si, последовательно имплантированных ионами In⁺ и Sb⁺.

Эксперимент

Последовательная имплантация пластины p-Si(111) ионами In⁺ и Sb⁺ была проведена на ионно-лучевом ускорителе ИЛУ-3. Энергия ионов составляла $E = 30$ кэВ, доза (флюенс) каждого сорта ионов составляла $D = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻² при плотности ионного тока $j = 2$ мкА/см². Для устранения аморфизации приповерхностной области Si проводилась ИИО на импульсном ускорителе ионов ТЕМП-4, который генерирует МИП со следующими параметрами: состав ионного пучка (≈80% – C⁺, ≈20% – H⁺), энергия ионов $E \approx 300$ кэВ, длительность импульса $\tau_p \approx 100$ нс, плотность энергии импульса $W = 1.0\text{--}1.2$ Дж/см², доза ионов C⁺/H⁺ за импульс $D \approx 10^{13}$ см⁻², диаметр пучка $d \approx 1.5$ см, число импульсов $n = 2$. Согласно расчётным данным [6] такая обработка вызывает быстрый нагрев приповерхностной области Si до плавления (толщина расплава $h \approx 1$ мкм, время жизни расплава $\tau_m \approx 500$ нс) с последующим быстрым затвердеванием расплава со скоростью $V = 1\text{--}4$ м/с.

С помощью общедоступной программы моделирования пробега ионов в веществе SRIM были получены расчётные профили концентрации имплантированных атомов In и Sb в Si с учётом распыления по методике, описанной в [7]. Экспериментальные профили концентрации примесных атомов после ИИО были получены методом резерфордского обратного рассеяния (РОР). Структурное состояние и фазовый состав облучённого Si исследовались методом рентгеновской дифракции в скользящих лучах (РДСЛ) на дифрактометре ДРОН-7, а также методом комбинационного (рамановского) рассеяния света (КРС).

Поглощательная способность образцов $A(\lambda)$ в ближней и средней ИК-области ($\lambda = 1\text{--}10$ мкм) определялась путём измерения спектров пропускания $T(\lambda)$ и отражения $R(\lambda)$ и вычислялась как $A = 1 - T - R$. Тип проводимости

образцов после ИИО определялся методом термо-ЭДС. С помощью химического травления в смеси азотной и плавиковой кислот были получены меза-структуры размером 3×3 мм и высотой 1 мкм. Для оценки величины токов утечки в образце были проведены измерения темновой ВАХ при обратном смещении до –10 В. Спектральные измерения фотоотклика проводились на базе монохроматора МДР-41 при освещении образца галогенной лампой мощностью 100 Вт и с подачей на образец обратного смещения 1.5 В. Для сравнения измерения фотоотклика проводились на промышленном Si-фотодиоде ФД-24 при нулевом смещении.

Результаты и обсуждение

Согласно расчётам в программе SRIM проективный пробег (R_p) и стандартное отклонение (ΔR_p) для ионов In⁺ и Sb⁺ в Si при энергии 30 кэВ близки ввиду близости их атомных масс ($M = 115$ и 122) и составляют около 24 и 7 нм соответственно. Оценка профиля концентрации ионов для дозы $D = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻² даёт максимальную концентрацию примеси 23 ат.% на глубине 24 нм при ширине профиля на полувысоте 20 нм. Однако ввиду большой массы ионов и сравнительно высокой дозы имплантации следует учитывать эффект распыления Si. Расчёт коэффициента распыления S для данных ионов в программе SRIM дал значения 3.41 атом/ион для In и 3.43 атом/ион для Sb. С учётом данных значений S был рассчитан суммарный профиль концентрации примесей (рис. 1, сплошная кривая). Данный профиль имеет максимальную концентрацию 40 ат.% на глубине 17 нм. Учёт распыления приводит к сдвигу профиля к поверхности.

Методом РОР исследовалось глубинное распределение примесей In и Sb после ИИО. На рис. 1 показано

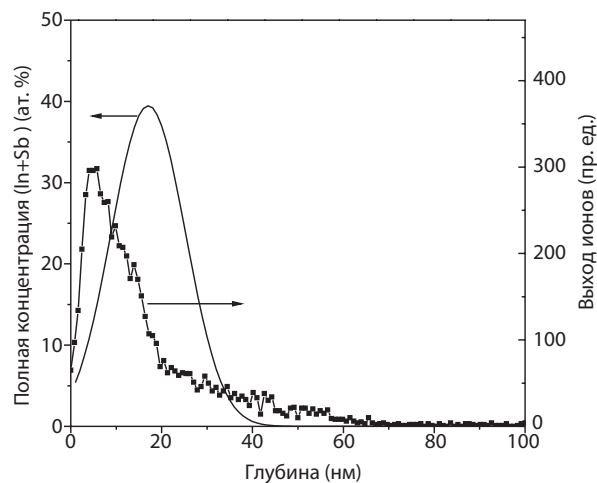


Рис. 1. Расчётный профиль распределения суммарной концентрации атомов In и Sb в Si, имплантированных с дозами $2 \cdot 10^{16}$ см⁻² с учётом распыления Si во время ионной имплантации (сплошная кривая). Также приведён спектр РОР имплантированных атомов In и Sb после ИИО ($W = 1.0$ Дж/см²) (кривая с точками).

совмещение по глубине экспериментального суммарного профиля (кривая с точками) атомов In и Sb после ИИО (без привязки к атомной концентрации) и расчётного профиля (сплошная кривая) без отжига. Из данного рисунка следует, что импульсный отжиг, сопровождающийся плавлением поверхности Si, приводит к вытеснению большей части примесных атомов к поверхности с некоторой долей примесей, диффундирующих вглубь Si. Такой эффект вытеснения известен в литературе как сегрегация, и он характерен для малорастворимых в Si примесей, таких как металлы [6, 8]. Измеренные спектры РОР после ИИО (не показаны) указывают на отсутствие аморфного слоя на поверхности Si и на малую долю примесных атомов (около 30%), находящихся в узлах кристаллической решётки Si.

Исследование фазового состава и кристалличности имплантированных слоёв Si, подвергнутых ИИО, проводилось методами РДСЛ и КРС. Дифрактограмма образца, снятая в геометрии скользящих лучей ($\varphi = 2^\circ$), показала два пика – интенсивный пик, идущий от (311) плоскостей Si подложки и слабый пик при угле $2\theta = 33.6^\circ$ (рис. 2). Отсутствие набора пиков, характерных для поликристаллического InSb с кубической симметрией [9], указывает на монокристаллическую структуру слоя Si, подвергнутого имплантации и ИИО. Наблюдаемый слабый пик, вероятно, связан с синтезированной фазой InSb, поскольку схожий пик InSb(211) наблюдался в работе [9], где были получены наночастицы InSb. Исходя из положения пика, параметр решётки синтезированной фазы InSb составляет $a_0 = 6.525 \text{ \AA}$, что значительно больше параметра решётки для монокристалла InSb ($a_0 = 6.479 \text{ \AA}$) [1]. Соответственно, величина деформации растяжения решётки InSb ($\Delta a/a_0$) составляет 0.72%.

На рис. 3 приведён КР-спектр имплантированного образца после ИИО при возбуждении зелёным лазером (532 нм). Во вставке показана увеличенная область пиков малой интенсивности. Спектр характеризуется основным

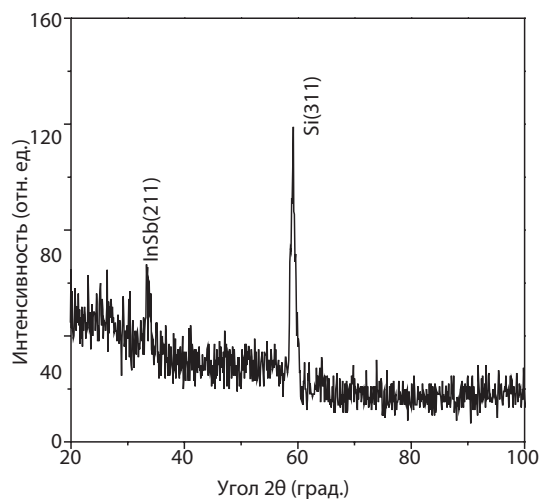


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма в скользящих лучах (угол падения $\varphi = 2^\circ$) для образца p-Si, имплантированного ионами In и Sb и подвергнутого ИИО ($W = 1.0 \text{ Дж/см}^2$).

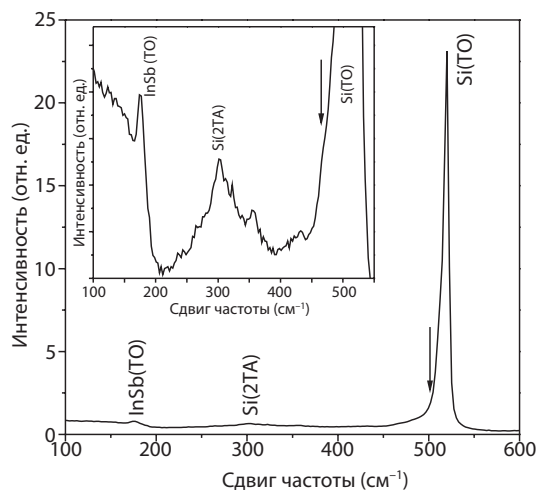


Рис. 3. Спектр комбинационного рассеяния света в образце p-Si, имплантированным ионами In и Sb и подвергнутом ИИО ($W = 1.0 \text{ Дж/см}^2$). На вставке – диапазон $100\text{--}550 \text{ см}^{-1}$.

ТО-фоннным пиком Si при 520 см^{-1} , а также двумя слабыми пиками, относящимися к фонному пику Si второго порядка (2TA) при 301.5 см^{-1} и к ТО-фоннному пику синтезированной фазы InSb при 175 см^{-1} . Основной ТО-пик Si имеет ассиметричную форму линии с уширением с левой стороны (отмечено стрелкой), что указывает на наличие в слое остаточных дефектов и/или механических напряжений. Из литературы известно, что спектр КРС монокристалла InSb имеет два фоннных пика – ТО-пик при 180 см^{-1} и LO-пик при 190 см^{-1} [10]. Наблюдаемый пик при 175 см^{-1} близок к ТО-пику при 180 см^{-1} , а LO-пик в нашем спектре практически не различим. Имеющееся различие в положении пиков в образце и в монокристалле (5 см^{-1}) может быть связано с размерным эффектом и/или напряжённым состоянием синтезированных частиц InSb. В работе [10] приведено выражение, связывающее частоту пика $\omega_{\text{ТО}}$ и относительную деформацию решётки ($\Delta a/a_0$) в виде $\omega_{\text{ТО}} = 179.7 - 761(\Delta a/a_0)$. Отсюда получаем положительную величину деформации растяжения 0.61%. Эта величина близка к значению деформации, полученной методом РДСЛ (0.72%).

Перейдём далее к результатам оптической спектроскопии. На рис. 4 приведены ИК-спектры пропускания T , отражения R и результирующего поглощения A в диапазоне длин волн $1\text{--}10 \text{ мкм}$ для исходного кристалла p-Si и синтезированного образца. Из рис. 4а видно, что пропускание исходного p-Si практически постоянно во всей области длин волн и составляет около 50%. Небольшой провал в спектре при 9 мкм (1100 см^{-1}) обусловлен поглощением света на связях Si-O. Образец с синтезированной фазой InSb демонстрирует сильное и монотонное падение пропускания, начиная от фундаментального края 1100 нм ($T = 35\%$) и до величины $T = 5\%$ при 10 мкм . Его возможными причинами могут быть остаточные дефекты в ионно-легированном слое и высокая концентрация носителей. Из литературы известно [11], что при уровне легирования

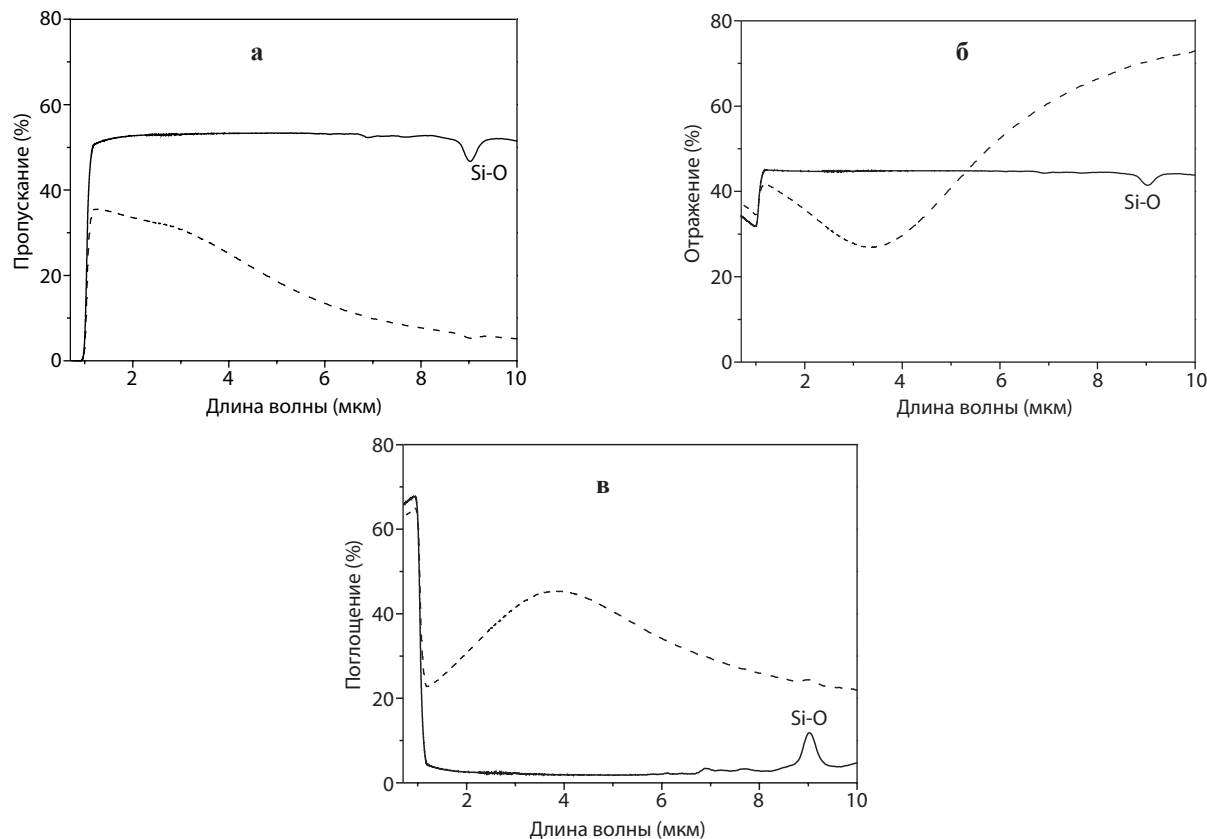


Рис. 4. ИК-спектры пропускания (а), отражения (б) и поглощения (в) как для исходного кристалла р-Si (сплошная кривая), так и для образца р-Si, имплантированного ионами In и Sb и подвергнутого ИИО ($W = 1.0 \text{ Дж/см}^2$) (пунктир).

Si около 10^{20} см^{-3} и выше величина пропускания может сильно падать, вплоть до нулевых значений.

Спектр отражения исходного р-Si (рис. 4б) демонстрирует постоянный уровень отражения ($R \sim 45\%$) для длин волн свыше 1200 нм. Для сравнения спектр синтезированного образца показывает широкую полосу пониженного отражения (до 26%) с минимумом при 3.37 мкм с дальнейшим ростом отражения до уровня 72% при 10 мкм. Такой вид спектра отражения характерен для плазменного резонанса [12], когда в образце имеется высокая концентрация носителей (электронов). Из положения минимума отражения ω_p можно оценить концентрацию носителей N по формуле из [12]:

$$\omega_p = \left(\frac{4\pi Ne^2}{m^* \epsilon \epsilon_0} \right)^{0.5}, \quad (1)$$

где e – элементарный заряд, $m^* = 0.28m_0$ – эффективная масса электронов, m_0 – масса свободного электрона, ϵ – диэлектрическая проницаемость Si (11.7), ϵ_0 – электрическая постоянная. По формуле (1) концентрация электронов N_e составила $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Очевидно, что такую высокую концентрацию носителей дают атомы Sb, находящиеся в узлах решётки Si и не образующие химической связи с атомами In.

На рис. 4в приведены спектры результирующего поглощения, полученные из спектров пропускания и отражения. Спектр исходного р-Si обладает поглощением на уровне 2–3%. Спектр синтезированного образца характеризуется широкой резонансной полосой поглощения с максимумом при 3.85 мкм (0.32 эВ). На основе анализа литературы можно предположить, что наблюдаемая полоса поглощения обусловлена наложением ряда конкурирующих процессов, таких как поглощение на свободных носителях, поглощение на дефектах и поглощение на синтезированных наночастицах InSb. Требуется дальнейшие эксперименты по выделению доминирующего механизма поглощения.

Исследование синтезированного образца методом термо-ЭДС показало n-тип проводимости в имплантированном слое после ИИО и p-тип на обратной стороне образца. Таким образом, формируется p^+/p переход (диод) между слоем и подложкой. На полученной с помощью химического травления меза-структуре были проведены измерения темновой ВАХ при обратном смещении до –10 В. Обратный ток диода составляет 0.6 мкА при наибольшем смещении 10 В.

Далее проводились спектральные измерения фотоотклика при 77 и 300 К при освещении образца галогенной лампой и с подачей обратного смещения 1.5 В (рис. 5). Для сравнения измерения фотоотклика проводились на промышленном Si-фотодиоде ФД-24 при нулевом смещении.

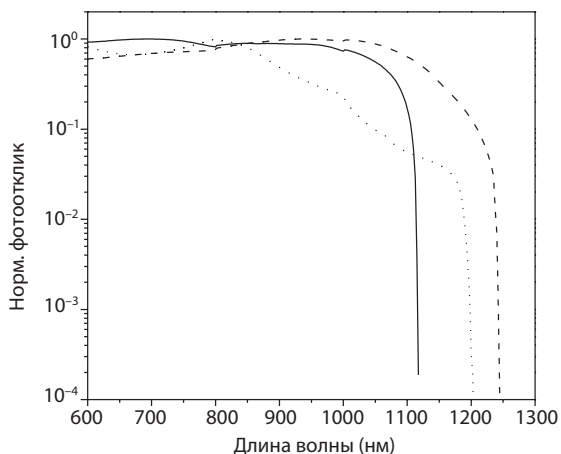


Рис. 5. Спектры фототоклика меза-диода на основе образца p-Si, имплантированного ионами In и Sb и подвергнутого ИИО ($W = 1.0$ Дж/см²), снятые при обратном смещении 1.5 В и при температурах 77 К (сплошная линия) и 300 К (штриховая линия). Для сравнения приведён спектр фототоклика промышленного Si-фотодиода ФД-24 при нулевом смещении и 300 К (пунктирная линия).

Спектр фотодиода ФД-24 характеризуется максимумом чувствительности на длине волны 800 нм с последующим спадом сигнала на 4 порядка величины до уровня фона при 1200 нм. Спектр образца Si:InSb при 300 К обладает максимумом чувствительности на длине волны 950 нм, которая спадает до уровня фона при 1245 нм. То есть в образце имеет место длинноволновый сдвиг фоточувствительности на 45 нм. Охлаждение образца до 77 К приводит к противоположному сдвигу края фоточувствительности к 1120 нм, что связано с температурным расширением запрещённой зоны Si. Измерения фототоклика образца при 300 К в более широком диапазоне ($\lambda = 1\text{--}5$ мкм) не выявили какого-либо ощутимого сигнала, который ожидался исходя из данных оптического поглощения образца, где наблюдалась интенсивная полоса поглощения при 3.85 мкм (рис. 4в). Возможной причиной сдвига края фоточувствительности на 45 нм может быть размытие края зоны проводимости и связанное с этим сужение оптической щели за счёт высокой концентрации электронов в легированном слое. Отсутствие сигнала фототоклика при 300 К от полосы поглощения при 3.85 мкм может быть связано с присутствием в запрещённой зоне Si дефектных уровней, обусловленных остаточными дефектами (вакансии, междоузлия, кластеры, дислокации) в образце после отжига, что приводит к резкому уменьшению времени жизни неравновесных носителей заряда. Таким образом, требуется оптимизация режимов синтеза образца для уменьшения его дефектности и проведение более детальных низкотемпературных измерений.

Заключение

Проведён синтез тонкого слоя узкозонного полупроводника InSb в монокристалле p-Si с использованием методики

ионно-лучевого синтеза, включающей последовательную имплантацию ионов In и Sb и импульсную (наносекундную) обработку пучком ионов C^+/H^+ . В процессе импульсной обработки происходило расплавление приповерхностной области Si и её последующая рекристаллизация, что приводило к сегрегации примесных атомов к поверхности Si и к некоторой диффузии вглубь Si. При этом наблюдалось формирование наноразмерной фазы InSb с уровнем деформации растяжения 0.6–0.7%. ИК-спектры отражения позволили бесконтактным образом оценить концентрацию электронов в слое ($2 \cdot 10^{20}$ см⁻³) за счёт донорной примеси Sb. Измерения фототоклика на полученной диодной меза-структуре при 300 К показали сдвиг края фоточувствительности до 1245 нм по сравнению с типовым Si-фотодиодом (ФД-24). Результаты проведённой работы показали, что требуются дополнительные эксперименты, направленные на разделение глубинных профилей In и Sb, визуализацию микроструктуры и дефектности синтезированных слоёв, оптимизацию режимов имплантации и отжига. Ожидается, что это позволит повысить величину ИК-фототоклика от синтезированной в объёме Si фазы InSb.

Благодарности

Авторы выражают благодарность белорусским коллегам из БГУ (Ф. Ф. Комаров, О. В. Мильчанин, И. Н. Пархоменко) за проведение измерений методами РОР и КРС, К. Н. Галкину из ИАПУ ДВО РАН (Владивосток) за измерения методом оптической спектроскопии и И. Б. Чистохину из ИФП СО РАН (Новосибирск) за фотоэлектрические измерения. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 24-29-00069, <https://rscf.ru/project/24-29-00069/>).

Литература

- Интернет-ресурс: <http://www.matprop.ru/> (NSM Archive – Physical Properties of Semiconductors)
- Tchebotareva A.L., Brebner J.L., Roorda S., White S.W.: Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B **175–177**, 187–192 (2001)
- Sortica M.A., Canut B., Hatori M., Dias J.F., Chauvin N., Marty O.: Phys. Status Solidi A **212**, no. 12, 2686–2691 (2015)
- Komarov F., Vlasukova L., Milchanin O., Wesch W., Wendler E., Zuk J., Parkhomenko I.: Mater. Sci. and Engin. B **178**, 1169–1177 (2013)
- Хайбуллин И.Б., Смирнов Л.С.: Физ. техн. полупров. **19**, № 4, 569–591 (1985)
- Bayazitov R.M., Zakirzyanova L.Kh., Khaibullin I.B., Isakov I.F., Chachakov A.F.: Vacuum **43**, no. 5–7, 619–622 (1992)
- Ачкеев А.А., Хайбуллин Р.И., Тагиров Л.Р., Мачкова А., Hnatowicz V., Cherkashin N.: ФТТ **53**, 508–517 (2011)
- Recht D., Smith M.J., Charnvanichborikarn S., Sullivan J.T., Winkler M.T., Mathews J., Warrender J.M., Buonassisi T., Williams J.S., Gradedak S., Aziz M.J.: J. Appl. Phys. **114**, 124903 (2013)
- Pandya S.G., Kordes M.E.: Nanoscale Res. Lett. **10**, 258 (2015)
- Tyschenko I.E., Volodin V.A., Cherkov A.G., Stoffel M., Rinnert H., Vergnat M., Popov V.P.: J. Luminesc. **204**, 656–662 (2018)
- Basu S., Lee B.J., Zhang Z.M.: J. Heat Transfer **132**, 023301 (2010)
- Панков Ж.: Оптические процессы в полупроводниках, с. 104. М: Мир, 1973.

Фотолюминесценция кислородных вакансий в рутиле (TiO_2), облучённом ионами аргона

Е. М. Бегишев, В. В. Базаров, В. Ф. Валеев, Д. К. Жарков, Н. М. Лядов,
В. И. Нуждин, А. Г. Шмелев, Р. И. Хайбуллин

Лаборатория радиационной физики, лаборатория квантовой оптики в алмазах

Монокристаллическая (001)-ориентированная пластинка рутила (TiO_2) была подвергнута облучению ионами аргона с энергией 40 кэВ с высокой дозой $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см². Интенсивное ионное облучение приводит к изменению окраски рутила с бесцветной на синюю за счёт формирования облучённом слое рутила кислородных вакансий. Проведена процедура по пространственному перемещению положительно заряженных кислородных вакансий под действием приложенного электрического поля. Показано влияние концентрации и зарядового состояния кислородных вакансий на спектры фотолюминесценции рутила. Интерпретация наблюдаемых линий фотолюминесценции проведена на основе зонной электронной структуры нестехиометрического рутила с дефектными уровнями в запрещённой зоне.

Photoluminescence of oxygen vacancies in rutile (TiO_2) irradiated with argon ions

E. M. Begishev, V. V. Bazarov, V. F. Valeev, D. K. Zharkov, N. M. Lyadov,
V. I. Nuzhdin, A. G. Shmelev, R. I. Khaibullin

Laboratory of radiation physics, Laboratory of quantum optics in diamonds

Single-crystal (001)-oriented rutile (TiO_2) plate was irradiated with 40 keV argon ions at a high dose of $1.5 \cdot 10^{17}$ ion/cm². Intense ion irradiation changes the color of rutile from colorless to blue due to the formation of oxygen vacancies in the irradiated rutile layer. A procedure for the spatial displacement of positively charged oxygen vacancies under the action of an applied electric field was carried out. The effect of the concentration and charge state of oxygen vacancies on the photoluminescence spectra of rutile was shown. The interpretation of the observed photoluminescence lines was carried out on the basis of the band electron structure of nonstoichiometric rutile with defect levels in the band gap.

Введение

Рутил, являясь наиболее термодинамически стабильной формой диоксида титана (TiO_2) [1, 2], обладает электронной структурой изолятора с шириной запрещённой зоны 3.05 эВ [1]. Точечные дефекты, такие как кислородные вакансии и междоузельные атомы, существенно влияют на его оптические [2, 3], электрические [3, 4] и магнитные [1, 2, 5] свойства, определяя практическое применение в таких областях, как фотокатализ, фотогальваника, оптоэлектроника и спинтроника [2, 6–9]. Обычно рутил с большим содержанием кислородных вакансий получают либо непосредственно в процессе роста кристаллов рутила, либо в результате отжига стехиометрических кристаллов в условиях высокого вакуума, либо путём интенсивного электронного, ионного или нейтронного облучения TiO_2 [10].

Кислородные вакансии в рутиле образуют глубокие донорные уровни с энергией на 0.2–0.7 эВ ниже дна зоны проводимости, вследствие чего TiO_2 приобретает свойства полупроводника n-типа [4, 11–15]. Высокая концентрация этих вакансий формирует примесные зоны,

обеспечивающие проводимость материала даже при очень низких температурах, вплоть до 10 К [16]. Поскольку кислородные вакансии выступают в роли ловушек для электронов, они могут находиться в одном из трёх зарядовых состояний: нейтральном (O_V^0), положительном однократно заряженном (O_V^+) или полностью ионизированном двукратно заряженном состоянии (O_V^{2+}). В частности, полупроводниковые и мемристивные свойства нестехиометрических восстановленных образцов рутила непосредственно связывают с наличием ионизированных кислородных вакансий [3–4, 8], которые могут перемещаться по решётке рутила под действием приложенного электрического поля [8, 9, 17–18].

Согласно ранее проведённым оптическим исследованиям [2–4], рост концентрации кислородных вакансий в структуре рутила ведёт к снижению его прозрачности и к возникновению широкой полосы поглощения, которая начинается от 500 нм и заканчивается в ближнем инфракрасном диапазоне около 2500 нм, достигая максимума в области 1200–1400 нм. Вследствие этого нестехиометрические по содержанию кислорода образцы рутила окрашиваются в синие и даже чёрные тона в зависимости

от содержания кислородных вакансий. При возбуждении ультрафиолетовым светом в рутиле наблюдаются ряд линий фотолюминесценции (ФЛ), которые проявляется в ближней инфракрасной (800–950 нм) и видимой (400–550 нм) областях спектра [19–23]. Полосы ФЛ в области 800–950 нм в литературе были ассоциированы с нейтральными атомами титана (Ti^0) или ионами Ti^{4+} , находящимися в междоузлиях кристаллической структуры рутила [19, 21–22]. Полосы ФЛ в области 400–550 нм связывали с люминесценцией кислородных вакансий и их комплексов $[O_V-Ti^{3+}]$ [21, 23]. Однако влияние зарядового состояния кислородных вакансий на оптическое поведение рутила не было исследовано в деталях, а природа линии ФЛ в видимом диапазоне длин волн до сих пор является предметом научных дискуссий.

Цель данного исследования состояла в изучении влияния концентрации и зарядового состояния кислородных вакансий на спектры фотолюминесценции рутила. Для этого измерялись спектры фотолюминесценции как в стехиометрическом образце рутила, так и в образце, подвергнутом облучению ионами аргона, что позволило создать в нём большое количество кислородных вакансий. Также была проведена процедура по пространственному перемещению положительно заряженных кислородных вакансий под воздействием приложенного электрического поля для анализа их влияния на спектры ФЛ и электронную структуру рутила.

Детали эксперимента

Монокристаллические пластинки рутила (TiO_2) с ориентацией (001) и размерами $15.0 \times 15.0 \times 1.5$ мм³ были изготовлены в лаборатории роста кристаллов НИУ “МЭИ”. Образцы проявляли высокую прозрачность (оптическое пропускание на уровне 65%) во всём видимом и ближнем ИК-диапазоне длин волн и имели высокое значение поверхностного электросопротивления, более чем 200 МОм. Пластинки были подвергнуты облучению ионами аргона Ar^+ с энергией 40 кэВ на ионно-лучевом ускорителе ИЛУ-3 (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН) для создания в облучённом слое рутила толщиной порядка 100 нм большого количества кислородных вакансий. Облучение проводили при плотности ионного тока 8 мкА/см², дозе $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см² и температуре мишени 900 К. После облучения прозрачность пластинок рутила существенно снижалась в зелёном и красном диапазоне длин волн света, вследствие чего они приобретали синюю окраску, а их поверхностное сопротивление понизилось до ~1 кОм.

Из облучённых ионами аргона пластинок рутила были вырезаны полоски размером $10.0 \times 3.0 \times 1.5$ мм³ вдоль кристаллографической оси [100] рутила. На них с помощью медных электродов подавалось напряжение от 15 до 40 В в течение 5 мин для перемещения положительно заряженных кислородных вакансий под действием приложенного электрического поля. После проведения процедуры электромиграции кислородных вакансий в

облучённых полосках рутила были получены две пространственно-разделённые области с разной окраской и содержанием вакансий – тёмно-синяя у катода и бледно-голубая у анода, как будет показано ниже.

Образцы были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и путём регистрации спектров ФЛ при комнатной температуре. Микроскопические исследования проводились на приборе EVO 50 XVP, оснащённом рентгеновским энергодисперсионным спектрометром Oxford Inca Energy-350. При этом спектры энергодисперсионного рентгеновского анализа (EDX) регистрировались при пониженной энергии электронного пучка 10 кэВ (глубина зондирования до 500 нм) для оценки изменения концентрации химических элементов в облучённом слое рутила. Измерения спектров ФЛ проводились на спектрофлуориметре HORIBA FLQM-8075-22-C при облучении образцов рутила светом с длиной волны 380 нм. Спектры возбуждения наблюдаемых линий ФЛ регистрировались с использованием ксеноновой лампы в качестве источника возбуждения.

Основные результаты

Морфология поверхности и элементный состав

Анализ микроскопических снимков высокого разрешения (5000 крат) показал, что все образцы пластинок рутила как исходного, так и после интенсивного облучения ионами аргона, имеют гладкую поверхность, без какой-либо заметной шероховатости или новообразований на поверхности после облучения. Элементный состав исходной и облучённой пластинок представлен в таблице 1. Отношение концентрации кислорода к титану O/Ti в исходном образце составляет ~2.09, что соответствует химической формуле TiO_2 . В облучённой пластине содержание кислорода снижено (63.3 ат.%), а концентрация титана повышена (34.4 ат.%), что даёт соотношение O/Ti ~1.84, характерное для нестехиометрических, восстановленных образцов рутила, полученных после высокотемпературного отжига в высоком вакууме [2, 3]. Полученные результаты свидетельствуют о процессе восстановления рутила за счёт образования в его

Таблица 1. Элементный состав (ат.%) исходной (1) и облучённой ионами аргона пластинок рутила до (2) и после (3) процедуры электромиграции кислородных вакансий. Пояснение зондируемых областей 1 и 2 для образца № 3 дано в тексте. Также приводятся значения соотношения O/Ti.

№	Образец	Элементный состав				
		Ti (L_{α})	O (K_{α})	Ar (K_{α})	S (K_{α})	O/Ti
1	TiO_2	32.1	67.2	—	0.7	2.09
2	Ar + TiO_2	34.4	63.3	0.4	1.9	1.84
3	Ar + TiO_2					
	Область 1 (катод)	36.1	61.5	0.3	2.1	1.70
	Область 2 (анод)	31.7	65.8	0.4	2.1	2.07

поверхностном слое большого количества кислородных вакансий при ионном облучении.

После проведения процедуры электромиграции кислородных вакансий концентрация кислорода в тёмно-синей области около отрицательно заряженного катода упала до 61.5 ат.%, (O/Ti ~1.70), тогда как в бледно-голубой области около положительного анода она возросла до 65.8 ат.%, (O/Ti ~2.07), приближаясь к стехиометрическому составу рутила. Низкая концентрация аргона (~0.4 ат.%) в облучённых образцах рутила, указывает на то, что имплантированные атомы аргона покидают облучённый поверхностный слой рутила, поскольку инертный аргон не образует химических связей с атомами матрицы TiO₂. Наличие углерода в спектрах энергодисперсионного анализа (до 2 ат.%) связано с неконтролируемым загрязнением поверхности образцов.

Фотолюминесценция

На рис. 1а представлены ФЛ-спектры для исходной и облучённой ионами аргона пластинок рутила, полученные при возбуждении светом с длиной волны 380 нм. Для необлучённого образца (кривая 1) зафиксирована единственная полоса люминесценции с максимумом на длине волны 850 нм (1.45 эВ). Ширина этой полосы составляет примерно 0.17–0.18 эВ. В облучённом образце интенсивность данной полосы значительно уменьшается, однако появляются ещё две полосы ФЛ. Одна из них находится на длине волны 700 нм (1.78 эВ) с низкой интенсивностью и шириной полосы 0.17–0.20 эВ. Вторая полоса, наиболее интенсивная в спектре облучённого образца, охватывает диапазон 400–650 нм и имеет явно выраженную структуру, обусловленную суперпозицией нескольких линий. Деконволюция этой полосы позволила выявить отдельные линии люминесценции на следующих длинах волн: 540 нм (2.30 эВ), 480 нм (2.57 эВ), 440 нм (2.80 эВ) и 420 нм (2.95 эВ).

Для каждой из наблюдаемых полос были выполнены подробные исследования их спектров возбуждения. На рис. 1б представлены спектры возбуждения для трёх основных линий излучения: 480, 700 и 850 нм. Анализ показывает, что возбуждение наблюдаемых линий ФЛ происходит в ультрафиолетовом диапазоне длин волн в диапазоне 320–400 нм, причём максимумы возбуждения приходятся на 370 нм (3.35 эВ) и 380 нм (3.25 эВ).

После выполнения процедуры электромиграции кислородных вакансий, облучённый ионами аргона образец рутила разделился на две пространственно-разрешённые области с различной окраской: первая, расположенная ближе к положительному электроду (аноду), приобрела тёмно-синий оттенок, а вторая, находящаяся возле отрицательного электрода (катода), стала бледно-голубой. Эти области обозначены стрелками на фотографии образца (рис. 2а). Спектры ФЛ, зарегистрированные в данных областях, представлены на рис. 2б (кривые 1 и 2 соответственно). В обоих спектрах имеется широкая полоса

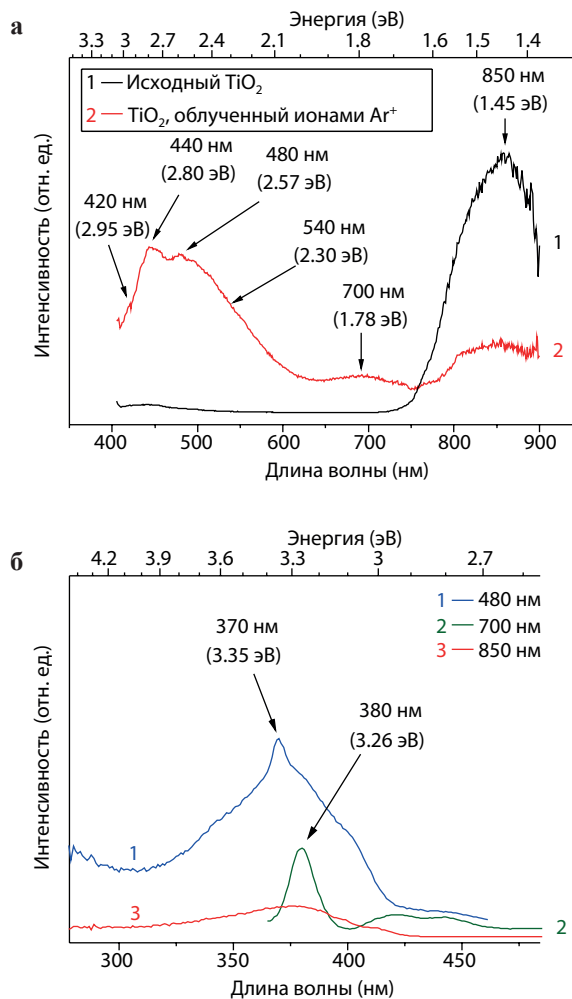


Рис. 1. а Спектры ФЛ исходной и облучённой ионами Ar⁺ пластинок рутила (TiO₂). Возбуждение проводилось на длине волны 380 нм. б Спектры возбуждения для трёх линий ФЛ, наблюдаемых в облучённой пластинке рутила на длинах волн 480, 690 и 850 нм.

ФЛ с максимумом на длине волны 850 нм (1.45 эВ), однако она более выражена в бледно-голубой области. При этом спектр из области 1 (тёмно-синяя зона) отличается наличием яркой и структурированной полосы ФЛ в сине-фиолетовом диапазоне, которая почти отсутствует в спектре области 2 (бледно-голубая зона). Так, на кривой 1 отчётливо выделяются пики на длинах волн 480 нм (2.57 эВ), 440 нм (2.80 эВ) и 420 нм (2.95 эВ), тогда как в спектре области 2 присутствуют лишь слабые линии на 440 нм (2.80 эВ) и 420 нм (2.95 эВ).

Интерес представляет сопоставление спектров ФЛ для разных пространственных областей пластинки рутила после проведения в ней процедуры электромиграции со спектрами, полученными для исходного и облучённого образцов рутила (рис. 1а). Сравнительный анализ показывает, что спектр ФЛ бледно-голубой области в пластинке рутила (кривая 2 на рис. 2б) сходен со спектром исходного образца рутила. В то же время спектр тёмно-синей области (кривая 1 на рис. 2б) напоминает спектр облучённого ионами аргона образца

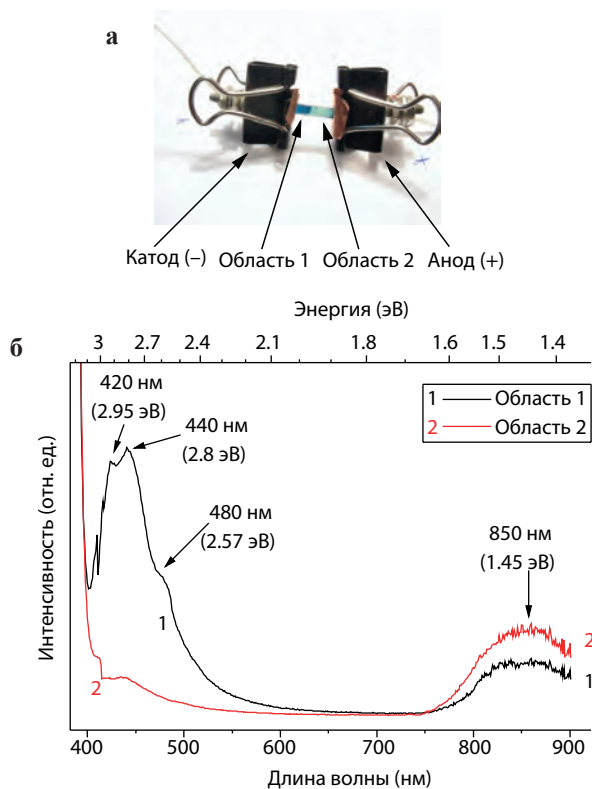


Рис. 2. **а** Фотография полоски рутила (TiO_2), облучённой ионами аргона, после проведения в ней процедуры по пространственному перемещению кислородных вакансий под действием приложенного электрического поля. Здесь области 1 и 2 соответствуют двум пространственно-разрешённым областям полоски рутила с темно-синей и бледно-голубой окраской, образовавшимся вблизи катода и анода, соответственно. **б** Спектры ФЛ, зарегистрированные в областях 1 и 2 при их возбуждении светом на длине волны 380 нм.

рутила, хотя имеются и значительные отличия. А именно, на спектральной кривой 1 в видимом диапазоне более ярко выражены линии на длинах волн 440 нм (2.80 эВ) и 420 нм (2.95 эВ), в тоже время линии на 540 нм (2.30 эВ) и 700 нм (1.78 эВ), ранее присутствовавшие в спектре облучённого образца до проведения процедуры электромиграции, отсутствуют на кривой 1.

Обсуждение результатов

Облучение рутила высокоэнергичными ионами аргона вызывает образование точечных дефектов: кислородных и титановых вакансий, а также междоузельных атомов (или ионов) кислорода и титана. Выбитые из узлов решётки газообразующие атомы кислорода, как и имплантированные атомы аргона, покидают облучаемый слой оксидной матрицы, создавая большее количество кислородных вакансий [25]. Рутил способен потерять до 10-ти атомных процентов кислорода без разрушения его кристаллической структуры за счёт образования кислородных вакансий и пространственных дефектов (дислокаций). Расчёты в программе SRIM-2013 [26] показали, что при облучении TiO_2 ионами аргона с энергией

40 кэВ концентрация кислородных вакансий достигает $10^{22} \text{ O}_v/\text{см}^3$, что соответствует потерям кислорода около 10%. Это подтверждается данными микроскопического анализа, показывающими потерю кислорода в пределах 4–6%. Различие теоретических расчётов с экспериментальными данными объясняется отсутствием учёта процессов рекомбинации кислородных вакансий с выбитыми атомами кислорода в алгоритме SRIM. Другим экспериментальным подтверждением факта наличия большого количества кислородных вакансий в облучённых аргоном образцах рутила являются наши недавно опубликованные результаты исследований данных образцов методами фотостимулированной ЭПР-спектроскопии [27]. В данной работе было показано, что фотовозбуждение образцов рутила, облучённых ионами аргона, светом с различной длиной волны приводит к появлению новых сигналов ЭПР, отнесённых как к положительно заряженным кислородным вакансиям, так и к их комплексам с ионами титана $[\text{Ti}^{3+}-\text{O}_v]$ в различном зарядовом состоянии и, соответственно, в различном спиновом состоянии $S = 1/2$ или $S = 1$.

Модель электронной структуры рутила с кислородными вакансиями

Считая факт наличия оптически-активных кислородных вакансий в облучённых образцах рутила окончательно установленным, мы построили схему расположения энергетических зон и дефектных уровней в нестехиометрическом рутиле с большим содержанием кислородных вакансий. Схематическое представление электронной структуры облучённого ионами аргона рутила приведено на рис. 3. При представлении электронной структуры

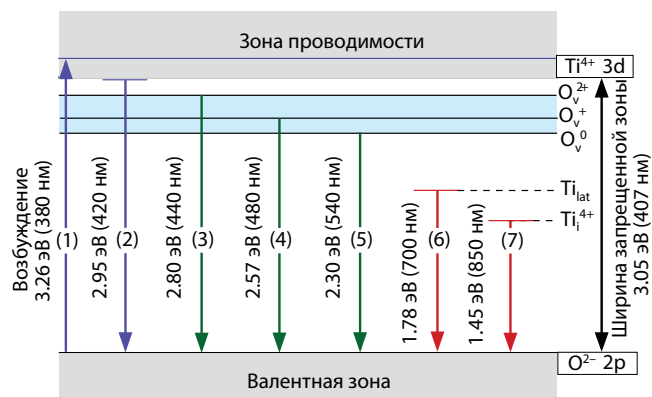


Рис. 3. Схематическое представление зонной электронной структуры нестехиометрического рутила с дефектными уровнями энергии в запрещённой зоне. На схеме энергия возбуждения наблюдаемых в эксперименте линий люминесценции показана стрелкой (1). Серия стрелок 2–7 соответствует линиям ФЛ, отнесённым к межзонной рекомбинации электрона и дырки (2), к электронным переходам с уровней кислородных вакансий в различном зарядовом состоянии (3–5), а также к электронными переходами с дефектных состояний ионов титана, локализованных либо в узлах решётки (6), либо в междоузельных позициях (7).

рутила значение ширины запрещённой зоны 3.05 эВ было взято из литературных данных [1–2], а энергетическое расположение уровней кислородных вакансий (или их комплексов с соседними ионами титана) с учётом зарядового состояния из работы [4]. Расположение дефектных уровней энергии в запрещённой зоне для междоузельных ионов титана (Ti_i^{4+}) были экстраполированы из работы [21]. Основываясь на предложенной схеме, можно объяснить природу наблюдаемых оптических явлений в исходном и облучённых ионами аргона образцах рутила.

Природа линий фотолюминесценции

Как было показано выше, при возбуждении светом на длине волны 380 нм (переход, стрелка 1 на рис. 3) в спектрах ФЛ исследуемых образцов рутила детектируются шесть линий эмиссии света с пиками, приходящимися на длины волн: 420 нм (2.95 эВ), 440 нм (2.8 эВ), 480 нм (2.57 эВ), 540 нм (2.30 эВ) 700 нм (1.78) и 850 нм (1.45 эВ). В электронной структуре рутила, представленной на рис. 3, эти линии излучения показаны стрелками с номерами 2–7 соответственно.

Линия 2 при 420 нм (2.95 эВ) совпадает с краем оптического поглощения в рутиле, поэтому логично её связать с излучением света, вызванного рекомбинацией электрон-дырочной пары. Соответствующим образом, три последующие линии 3, 4 и 5, наблюдаемые только в облучённых образцах рутила, по их энергии излучения можно отнести к различным зарядовым состояниям кислородных вакансий. А именно, линия 3 при 440 нм (2.8 эВ) является излучением, вызванным переходом электронов в валентную зону с уровней двукратно заряженных кислородных вакансий O_v^{2+} , линия 4 при 480 нм (2.57 эВ) – излучением с уровней однократно заряженных вакансий O_v^+ , а линия 5 при 540 нм (2.30 эВ) – излучением с уровней нейтральных вакансий O_v^0 или точнее их комплексов с двумя ионами титана $[O_v-2Ti^{3+}]^0$.

В ходе процедуры электромиграции кислородных вакансий происходит их перераспределение по образцу. Положительно заряженные кислородные вакансии движутся к отрицательному катоду, где образуется область тёмно-синего цвета. Напротив, область около анода обесцвечивается, что указывает на низкое содержание кислородных дефектов (см. рис. 2а). Следовательно, интенсивность линий 2 и 3 должна возрастать в тёмно-синей области 1 (больше полностью ионизированных кислородных вакансий O_v^{2+} , соответственно больше свободных носителей заряда), и, наоборот, падать в бледно-голубой области 2, что и наблюдается в наших экспериментах. Напротив, линия 5 при 540 нм (2.30 эВ) от нейтральных кислородных вакансий полностью исчезает после проведения процедуры электромиграции в образце облучённого рутила. Это предполагает, что происходит полная ионизация перемещённых в область катода кислородных вакансий.

Линия 6 на длине волны 700 нм (1.78 эВ) появляется только после облучения пластинки рутила ионами аргона, но исчезает после проведения процедуры электромиграции кислородных вакансий. Очевидно, эта линия связана с другими дефектами кристаллической решётки, возникающими в ходе ионного облучения. Согласно нашим измерениям ЭПР [18] такими дефектами могут быть парамагнитные ионы Ti_{lat}^{3+} , локализованные в узлах решётки и не связанные непосредственно с кислородной вакансией. Более того, как было показано в нашей работе [18], после проведения процедуры электромиграции сигнал ЭПР ионов Ti_{lat}^{3+} исчезает, что, по-видимому, связано с ионизацией этих ионов и переходом их в более стабильное, не парамагнитное состояние $4+$ вследствие протекания тока через образец.

Широкая линия 7 на длине волны 850 нм (1.45 эВ) наблюдается во всех исследованных образцах рутила. Согласно литературным данным [19, 21], данную полосу люминесценции относят к эмиссии с уровней ионов титана Ti_{int}^{4+} , находящихся в междоузельных позициях. Интенсивность этой линии падает после ионного облучения и затем возрастает в бледно-голубой области облучённого образца после проведения процедуры электромиграции. Очевидно, это связано с процессами восстановления междоузельных ионов титана до трёхвалентного и даже двухвалентного состояния в результате ионного облучения [28] с последующей обратной ионизацией до четырёхвалентного состояния после протекания тока через образец.

Заключение

Облучение ионами аргона пластинки монокристаллического рутила (TiO_2) приводит к изменению цвета рутила с бесцветного (прозрачного) на синий. Элементный микроанализ показывает, что содержание кислорода в облучённом слое рутиле понижено по сравнению с исходной пластинкой TiO_2 . После проведения процедуры перемещения положительно заряженных кислородных вакансий под действием приложенного электрического потенциала образуются две пространственно-разрешенные области (тёмно-синяя и бледно-голубая) с различным содержанием кислородных вакансий. В спектрах ФЛ исходного (необлученного) TiO_2 наблюдается широкая полоса эмиссии света с максимумом при 850 нм. В результате облучения ионами аргона появляются новые линии ФЛ с максимумами при 420, 440, 480, 540 и 700 нм. После проведения процедуры электромиграции кислородных вакансий интенсивности линий при 440 и 480 нм увеличиваются, а полосы при 520 и 700 нм исчезают. На основании анализа литературных данных и предложенной зонной структуры рутила с дефектными уровнями в запрещённой зоне наблюдаемые линии ФЛ были отнесены к межзонному переходу (420 нм) в рутиле, к вакансиям кислорода в разных зарядовых состояниях (440, 480 и 520 нм), а также к междоузельным ионам четырёхвалентного титана Ti_{int}^{4+} (860 нм) и трёхвалентным

ионам титана $\text{Ti}_{\text{lat}}^{3+}$ (700 нм), локализованных в узлах решётки рутила. В целом, проведённые исследования показывают влияние концентрации и зарядового состояния кислородных вакансий на люминесцентные свойства нестехиометрического по содержанию кислорода рутила.

Исследование выполнено в рамках гранта РНФ № 22-19-00712, <https://rscf.ru/project/22-19-00712/>, ФИЦ КазНЦ РАН.

Литература

- Grant F.A.: *Rev. Mod. Phys.* **31**, no. 3, 646–674 (1959)
- Diebold U.: *Surf. Sci. Rep.* **48**, no. 5–8, 53–229 (2003)
- Cronmeyer D.C.: *Phys. Rev.* **87**, no. 5, 876–886 (1952)
- Breckenridge R.G., Hosler W.R.: *Phys. Rev.* **91**, no. 4, 793–802 (1953)
- Бегишев Е.М., Вахитов И.Р., Лядов Н.М., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Базаров В.В., Кузина Д.М., Хайбуллин Р.И.: *Изв. РАН. Сер. физ.* **87**, № 3, 450–456 (2023)
- Fujishima A., Zhang X., Tryk D.: *Surf. Sci. Rep.* **63**, no. 12, 515–582 (2008)
- Carp O., Huisman C.L., Reller A.: *Prog. Sol. St. Chem.* **32**, no. 1–2, 33–177 (2004)
- Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S.: *Nature* **453**, 80–83 (2008)
- Gale E.: *Semicond. Sci. Technol.* **29**, no. 10, 104004 (2014)
- Bromiley G.D., Shiryaev A.A.: *Phys. Chem. Minerals* **33**, 426–434 (2006)
- Cronmeyer D.C.: *Phys. Rev.* **113**, no. 5, 1222–1226 (1959)
- Henrich V.E., Dresselhaus G., Zeiger H.J.: *Phys. Rev. Lett.* **36**, no. 22, 1335–1339 (1976)
- Chen J., Lin L.-B., Jing F.Q.: *J. Phys. Chem. Solids.* **62**, 1257–1262 (2001)
- Janotti A., Varley J.B., Rinke P., Umezawa N., Kresse G., Van de Walle C.G.: *Phys. Rev. B* **81**, 085212 (2010)
- Lee H.-Y., Clark S.J., Robertson J.: *Phys. Rev. B* **86**, 075209 (2012)
- Yagi E., Hasiguti R.R., Aono M.: *Phys. Rev. B.* **54**, no. 11, 7945–7956 (1996)
- Miyaoka H., Mizutani G., Sano H., Omote M., Nakatsuji K., Komori F.: *Solid State Commun.* **123**, 399–404 (2002)
- Sukhanov A.A., Valeev V.F., Nuzhdin V.I., Khaibullin R.I.: *Magn. Reson. Solids* **25**, no. 1, 23102 (2023)
- Ghosh A.K., Wakim F.G., Addiss R.R.: *Phys. Rev.* **184**, no. 3, 979–988 (1969)
- Wang X., Feng Z., Shi J., Jia G., Shen S., Zhou J., Li C.: *Phys. Chem. Chem. Phys.* **12**, 7083–7090 (2010)
- Santara B., Giri P.K., Imakita K., Fujii M.: *J. Phys. Chem. C* **117**, 23402–23411 (2013)
- Pallotti D.K., Passoni L., Maddalena P., Fonzo F.D., Lettieri S.: *J. Phys. Chem. C* **121**, 9011–9021 (2017)
- Tariq F., ur Rehman N., Akhtar N., George R.E., Khan Y., ur Rahman S.: *Vacuum* **171**, 108999 (2020)
- Ryssel H., Ruge I.: *Ion Implantation*, p. 478. Chichester: Wiley, 1986.
- Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U.: *The Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM)*, p. 429. New York: Pergamon Press, 1985.
- Sukhanov A.A., Valeev V.F., Nuzhdin V.I., Khaibullin R.I.: *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **88**, no. 7, 1077–1081 (2024)
- Hashimoto S., Tanaka A.: *Surf. Interface Anal.* **34**, no. 1, 262–265 (2002)

Двухканальная ЭПР-спектроскопия с квадратурным детектированием примесных центров меди во фториде бария (BaF_2)

Р. Б. Зарипов, В. Ф. Тарасов, В. А. Уланов

Лаборатория спиновой физики и спиновой химии, лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков

Парамагнитные центры, образованные примесными ионами $^{63}\text{Cu}^{2+}$ в монокристалле BaF_2 , исследованы методом стационарного электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Измерения проводились на спектрометре ELEXSYS E580 с использованием диэлектрического резонатора при двухканальной записи спектров. В дополнение к обычным спектрам ЭПР, при записи которых фаза сигнала совпадает с фазой модуляции магнитного поля, во втором канале записывались сигналы с фазой, ортогональной фазе модуляции магнитного поля. При этом было обнаружено, что при достаточно большой мощности микроволнового излучения, соответствующей частичному насыщению резонансных переходов, на спектрах ортогонального канала появляются интенсивные резонансные линии, принадлежащие высокоспиновым ($S = 1$) димерным ассоциатам ионов меди, и отсутствуют сигналы низкоспиновых ($S = 1/2$) одиночных ионов. Мы связываем появление этих линий с особенностями спиновой динамики высокоспиновых электронных систем при резонансном взаимодействии с микроволновым электромагнитным полем. При достаточно интенсивном резонансном возбуждении магнитных дипольных переходов магнитный дипольный момент спиновой системы трансформируется в электрический квадрупольный момент, при этом в спиновой системе происходит взаимодействие дипольного и квадрупольного осцилляторов. Это приводит к появлению сигналов резонансного поглощения, фаза которых ортогональна фазе модуляции магнитного поля. Обнаруженный эффект даёт возможность разделить высокоспиновые и низкоспиновые парамагнитные центры сравнением спектров ЭПР, записанных в разных каналах при квадратурном детектировании спектров относительно фазы модуляции магнитного поля.

Two-channel (Quadrature detection) EPR spectroscopy of copper impurity centers in barium fluoride (BaF_2)

R. B. Zaripov, V. F. Tarasov, V. A. Ulanov

Laboratory of spin physics and spin chemistry, Laboratory of radiospectroscopy of dielectrics

Paramagnetic centers formed by $^{63}\text{Cu}^{2+}$ impurity ions in a BaF_2 single crystal have been studied by continuous wave electron paramagnetic resonance (EPR). The measurements have been carried out on an ELEXSYS E580 spectrometer using a dielectric resonator with a two-channels of spectra recording. The EPR spectra of in-phase and out-of-phase by 90° (orthogonal) magnetic field modulation were recorded in the first and second channels, respectively. It has been found that at a sufficiently high power of microwave radiation corresponding to partial saturation of resonance transitions, intense resonance lines belonging to high-spin ($S = 1$) copper dimer associates appear in the orthogonal channel, and there are no signals from low-spin ($S = 1/2$) single ions. We attribute the appearance of the lines in the orthogonal channel with the special features of the spin dynamics of high-spin electron systems. With sufficiently intense resonance excitation of magnetic dipole transitions, the magnetic dipole moment of the spin system transforms into an electric quadrupole moment, while the interaction of dipole and quadrupole oscillators occurs in the spin system. This leads to the appearance of resonance absorption signals, the phase of which is orthogonal to the phase of the magnetic field modulation. The observed effect makes it possible to identify high-spin and low-spin paramagnetic centers by comparing the EPR spectra recorded in different channels during quadrature detection of the spectra relative to the phase of the magnetic field modulation.

Введение

Для описания спиновой динамики магнитного момента в ядерном или электронном спиновом резонансе широко используются уравнения Блоха [1]. Эти уравнения представляют квантово-механический спин $S = 1/2$ в виде вектора с тремя линейными переменными S_x , S_y и S_z . В этом случае динамика спина без учёта процессов релак-

сации представляется классической картиной вращения магнитного момента в пространстве таким образом, что конец вектора магнитного момента постоянной длины перемещается вдоль траектории на сфере Блоха. Для высокоспиновых систем с $S > 1/2$ эта простая модель не может полностью описать спиновую динамику, и необходимо вводить спиновые переменные с более высокими степенями компонент спинового момента [2–5].

В частности, для спина $S = 1$ достаточно включить члены второго порядка, соответствующие квадрупольному моменту. Такое мультипольное представление высокоспиновых систем является общепринятым для описания свойств атомных ядер с ядерным спином $I > 1/2$. В этом случае спиновый гамильтониан, описывающий взаимодействие ядерного спина с внешними полями, включает энергию взаимодействия ядерного магнитного момента с внешним магнитным полем и энергию взаимодействия электрического квадрупольного момента с градиентом электрического кристаллического поля или включает квадратичные спиновые операторы сверхтонкого взаимодействия.

В работе [5] К. М. Салиховым было показано, что при резонансном возбуждении высокоспиновой системы со спином $S = 1$ длина вектора дипольного момента не сохраняется. Это сопровождается созданием в спиновой системе динамического квадрупольного момента. Мы использовали это положение для объяснения причины появления аномальных линий в стационарных спектрах электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), записанных при стандартной методике измерения с модуляцией магнитного поля на спектрометрах с диэлектрическим резонатором. Причину появления аномальных линий мы связываем со взаимодействием магнитного дипольного осциллятора и динамического квадрупольного осциллятора, между состояниями которого градиент микроволнового электрического поля в диэлектрическом резонаторе возбуждает электрические квадрупольные переходы. Ранее было показано, что в этом случае фаза сигналов резонансного поглощения может быть сдвинута относительно фазы модуляции магнитного поля [6, 7].

Эффект появления в стационарных спектрах ЭПР линий резонансного поглощения с ортогональной фазой следует ожидать только для высокоспиновых систем. Поэтому представлял интерес поиск качественных различий в спектрах ЭПР низкоспиновых и высокоспиновых парамагнитных центров одинаковой природы, расположенных в одном и том же образце и отличающихся друг от друга только величиной спина. Для этих экспериментов мы выбрали монокристалл BaF_2 , легированный ионами $^{63}\text{Cu}^{2+}$. Характерной особенностью кристалла BaF_2 , легированного медью, является самоорганизация примесных ионов меди в димерные ассоциаты при введении ионов меди с поверхности нагретого нелегированного кристалла BaF_2 . Поэтому даже при невысокой концентрации примесных ионов концентрация димерных ассоциатов сравнима с концентрацией одиночных ионов меди.

Свойства образца и условия эксперимента

Монокристаллы BaF_2 , легированные медью, были получены в два этапа. Сначала были выращены высококачественные нелегированные монокристаллы. Затем из них выкалывались кусочки с двумя плоскопараллельными поверхностями. Для введения ионов меди в образец выколотый кусочек

помещался между торцами двух графитовых цилиндров. Между торцами цилиндров и плоскими поверхностями образца помещалась тонкая фольга из медного изотопа ^{63}Cu . Вся конструкция помещалась в центр индукционного нагревателя установки для выращивания монокристаллов “Донец-1”. Объём камеры выращивания был заполнен смесью чистого гелия и некоторого количества продуктов разложения фторопласта. Индукционный нагрев графитовых цилиндров использовался для нагрева образца до высокой температуры, близкой к температуре плавления кристаллов, при которой происходила достаточно интенсивная диффузия ионов меди из фольги в кристалл. Для измерений изготавливались образцы размерами приблизительно $1.5 \times 1.5 \times 5 \text{ мм}^3$.

Благодаря большому коэффициенту диффузии в нагретом BaF_2 ионы меди проникают в решётку кристалла путём временного замещения ионов Ba^{2+} . Вследствие эффекта Яна-Теллера ион Cu^{2+} имеет тенденцию смещаться от центра куба в направлении оси симметрии четвёртого порядка кубической кристаллической структуры BaF_2 [8, 9]. Это приводит к образованию примесного комплекса с большим электрическим дипольным моментом. Во время процессов диффузии другой такой же примесный комплекс может оказаться в непосредственной близости к первому. Благодаря взаимодействию двух электрических дипольных моментов вероятность образования связанных пар ионов Cu^{2+} оказывается выше, чем вероятность их термического распада. В результате даже при низкой концентрации примесных ионов концентрация димерных ассоциатов ионов Cu^{2+} оказывается сопоставимой с концентрацией одиночных ионов Cu^{2+} .

Спектры ЭПР примесных ионов меди в монокристалле BaF_2 ранее были измерены и проанализированы в работах [8, 9]. Ядерный спин изотопа ^{63}Cu $I^{\text{Cu}} = 3/2$. Следовательно, сверхтонкая структура (СТС) спектров ЭПР одиночного иона содержит $(2I + 1) = 4$ линии, соответствующие разрешённым переходам между электронно-ядерными уровнями с равным I_z . СТС димерного ассоциата образуется в результате взаимодействия двух электронных спинов с двумя ядерными спинами. В этом случае СТС должна состоять из 16 разрешённых переходов. Однако часть линий перекрывается таким образом, что СТС состоит из 7 линий, соответствующих полному спину ядер меди $I_{\text{Dim}}^{\text{Cu}} = 3$ с соотношением интенсивностей 1:2:3:4:3:2:1. В спектрах также присутствует суперсверхтонкая структура (ССТС), обусловленная взаимодействием электронных спинов Cu^{2+} с ядерными спинами фтора. Причём, в ССТС спектров вносит вклад взаимодействие электронного спина меди только с четырьмя ионами фтора, расположенными в вершинах кубической грани, вблизи которой локализован смещённый ион. Для одиночного иона меди ССТС состоит из 5 линий с соотношением 1:4:6:4:1, соответствующих суммарному спину четырёх ядер фтора $I_{\text{Single}}^{\text{F}} = 2$. Для димерного ассоциата взаимодействие двух электронных спинов с 8 ядрами фтора приводит к ССТС, состоящей из 9 линий, соответствующих общему ядерному спину $I_{\text{Dim}}^{\text{F}} = 4$, с относительными интенсив-

ностями 1:8:28:56:70:56:28:8:1. Разница ССТС спектров ЭПР одиночных ионов меди и димерных ассоциатов позволяет однозначно идентифицировать природу линий на спектрах и провести сравнительный анализ спектров одиночных ионов и димерных ассоциатов.

Экспериментальные результаты и обсуждение

В работах [6, 7] было показано, что фаза аномальных линий, появляющихся вследствие возбуждения квадрупольных переходов, не совпадает с фазой модуляции постоянного магнитного поля. Поэтому для измерения фазы сигнала использовался режим квадратурного детектирования по модуляции поля, при котором сигнал записывался по двум каналам. В первом канале (синфазном) измерялась амплитуда сигнала, совпадающего по фазе с фазой магнитной модуляции, а во втором канале (ортогональном) регистрировался сигнал, сдвинутый по фазе на 90° . Смещение ионов меди от центра куба приводит к образованию трёх магнитно-неэквивалентных центров тетрагональной симметрии, спектры которых перекрываются. Поэтому при произвольной ориентации магнитного поля спектры ионов ^{63}Cu в BaF_2 очень сложны. Они значительно упрощаются, если магнитное поле направлено вдоль оси симметрии четвёртого порядка кубической кристаллической решётки [8, 9]. На рис. 1 представлены спектры ЭПР примесных ионов $^{63}\text{Cu}^{2+}$ меди в BaF_2 , за-

писанные при данной ориентации в широком диапазоне микроволновых мощностей спектрометра P от 150 нВт до 15 мВт. Здесь показаны только участки спектров, в которых резонансные линии одиночных ионов и димерных ассоциатов принадлежат парамагнитным центрам с главной магнитной осью z , параллельной магнитному полю. Видно, что зависимости интенсивности сигнала от мощности микроволнового излучения существенно различаются для одиночного иона и димерного ассоциата. На рис. 2 представлены зависимости амплитуды (от пика до пика производной) различных линий на спектрах от мощности микроволнового излучения. Данные для одиночного иона и димерного ассоциата нормализованы по амплитуде синфазного сигнала при минимальной микроволновой мощности. Для одиночного иона амплитуда синфазных линий в диапазоне $150 \text{ нВт} \leq P \leq 15 \text{ мВт}$ приблизительно пропорциональна $P^{1/2}$. Это область линейного отклика, где M_z -составляющая спиновой намагниченности мало отличается от равновесной намагниченности M_0 в отсутствие резонансного микроволнового возбуждения. При увеличении мощности зависимость интенсивности сигнала от $P^{1/2}$ отклоняется от линейной. Это связано с эффектом насыщения резонансного перехода, когда $M_z < M_0$. Ситуация заметно отличается для димерного ассоциата. Синфазный сигнал пропорционален $P^{1/2}$ только до $P = 1.5 \text{ мВт}$. Затем с увеличением мощности интенсивность синфазных сигналов резко уменьшается. В то же время на ортогональных спектрах появляются

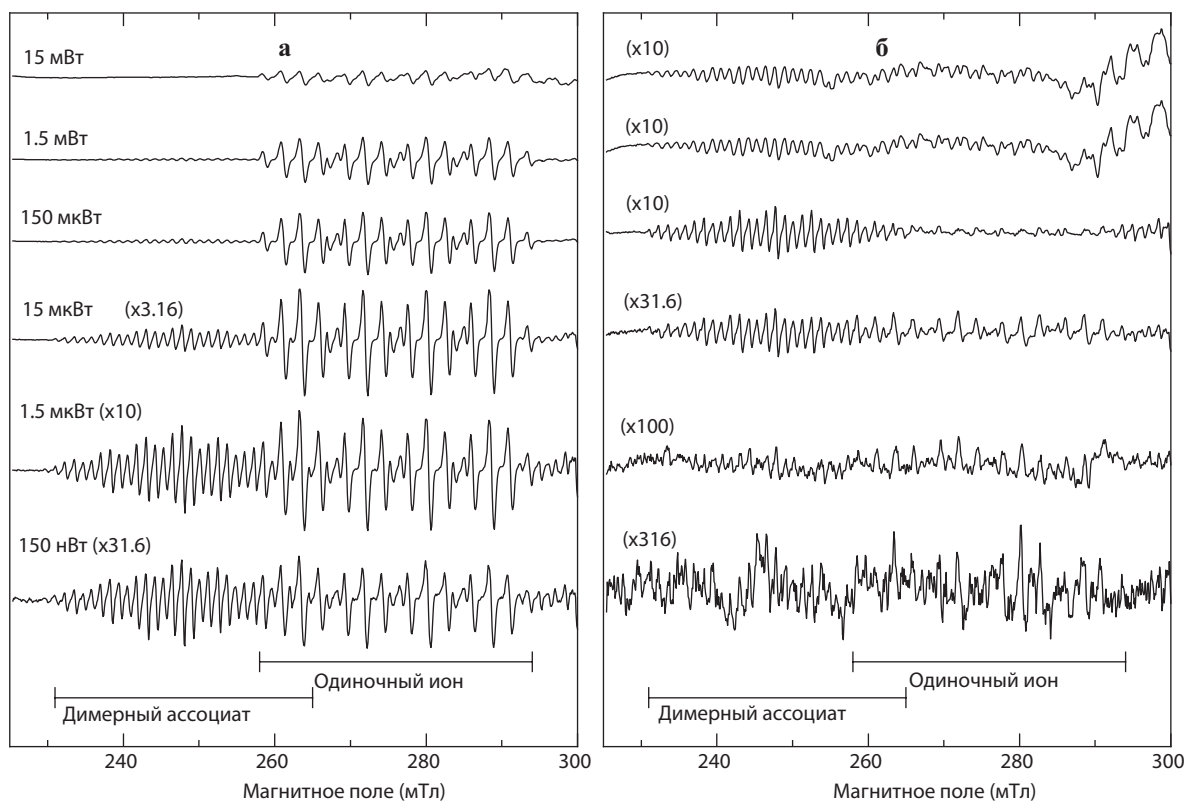


Рис. 1. Спектры ЭПР ионов $^{63}\text{Cu}^{2+}$ в BaF_2 , записанные при различной микроволновой мощности, показанной над спектрами в левой части **а**. Синфазные и ортогональные сигналы представлены на **а** и **б** соответственно. Коэффициент масштабирования указан в круглых скобках. $T = 20 \text{ К}$.

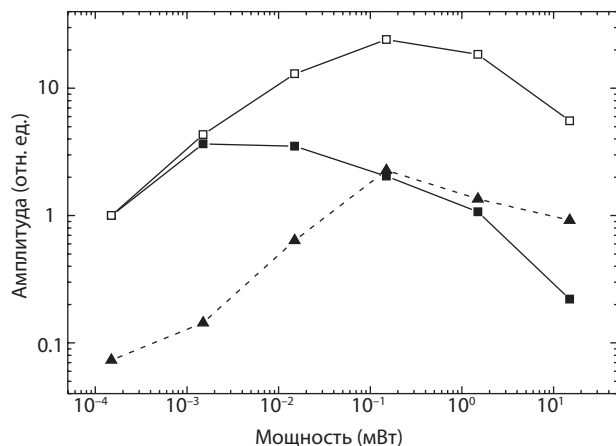


Рис. 2. Зависимость амплитуды линий ЭПР в спектрах ЭПР ионов $^{63}\text{Cu}^{2+}$ в BaF_2 от мощности микроволнового излучения. Пустые и сплошные квадраты соответствуют синфазным спектрам одиночного иона и димерного ассоциата соответственно. Сплошные треугольники соответствуют ортогональным спектрам димерного ассоциата, линии соединяют экспериментальные данные между собой.

заметные сигналы димерного ассоциата. Интенсивность этих сигналов при $P > 15$ мВт превышает интенсивность синфазных сигналов. Амплитуда ортогонального сигнала одиночного иона по меньшей мере на порядок меньше амплитуды синфазного сигнала и не анализировалась.

Появление резонансных линий на ортогональных спектрах ЭПР димерного ассоциата при $P > 10$ мВт говорит о том, что фаза сигнала резонансного поглощения сдвинута относительно фазы модуляции магнитного поля. Следует подчеркнуть, что во всех режимах работы спектрометра микроволновый детектор был настроен на регистрацию значения M_y -компоненты магнитного момента. Зная амплитуды сигналов в синфазном и ортогональном каналах приёмника, можно получить сдвиг фазы сигнала относительно фазы модуляции магнитного поля. Зависимость фазового сдвига от мощности СВЧ-излучения показана на рис. 3.

Для объяснения этого сдвига мы использовали результаты статьи [5], где было показано, что возбуждение магнитных дипольных переходов в высокоспиновых системах может привести к преобразованию магнитного дипольного момента спиновой системы в квадрупольный момент. Более того, обратимое взаимное преобразование дипольной и квадрупольной степеней свободы играет важную роль в спиновой динамике. Скорость этого преобразования определяется частотой нутации M_z -компоненты дипольного магнитного момента во вращающейся системе координат при резонансном возбуждении. Эта частота пропорциональна величине магнитной компоненты микроволнового поля B_1 . Величина создаваемого при этом квадрупольного момента зависит от соотношения двух конкурирующих процессов: нутации спинов при резонансном возбуждении и релаксационных процессов, возвращающих спиновую систему в равновесное состояние. Степень преобразования дипольного момента

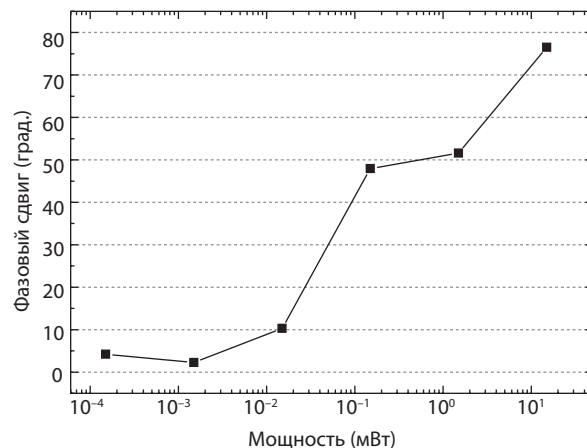


Рис. 3. Зависимость фазового сдвига между сигналом резонансного поглощения и фазой модуляции магнитного поля от мощности микроволнового излучения. Квадраты соответствуют экспериментальным данным, линии соединяют экспериментальные данные между собой.

в квадрупольный можно оценить по отклонению M_z -компоненты дипольного момента от его равновесного значения при отсутствии резонансного возбуждения. Порог формирования квадрупольного момента спиновой системы и соответствующее появление аномальной составляющей резонансной линии соответствуют равенству скорости нутации и скорости релаксации спиновой системы. При превышении этого порога в спиновой системе возникает динамический электрический квадрупольный момент. Здесь существует аналогия с хорошо известным явлением насыщения резонансного перехода, когда выше определённого порогового значения микроволновой мощности нарушается линейная зависимость интенсивности резонансной линии от мощности.

Мы предполагаем, что появление фазового сдвига в сигналах ЭПР димерных ассоциатов связано с возбуждением электрических квадрупольных переходов между состояниями динамического квадрупольного момента, создаваемого в спиновой системе при резонансном возбуждении. Эти квадрупольные переходы возбуждаются осциллирующим градиентом электрической компоненты микроволнового электромагнитного поля, которое всегда присутствует в диэлектрическом резонаторе спектрометра ЭПР [10]. Модуляция магнитного поля приводит к изменению резонансной частоты магнитного дипольного осциллятора. Это вызывает изменение резонансной частоты динамического квадрупольного осциллятора. В этом случае магнитный дипольный и электрический квадрупольный осцилляторы связаны отношением ведущий-ведомый. Когда магнитное поле увеличивается во время модуляции, фаза дипольного осциллятора опережает фазу квадрупольного осциллятора, а через половину периода магнитной модуляции магнитное поле уменьшается, и фаза дипольного осциллятора отстаёт от фазы квадрупольного генератора. В результате возникает осциллирующий знакопеременный фазовый сдвиг между когерентностями взаимодействующих магнитного

дипольного и электрического квадрупольного моментов. Знак этого сдвига дважды меняется в течение периода модуляции. Это приводит к осциллирующему обмену энергией между двумя связанными осцилляторами. Скорость этого обмена энергией пропорциональна скорости модуляции магнитного поля, то есть она смещена на 90° относительно фазы модуляции. В результате этих процессов в спектрах ЭПР появляется сигнал, фаза которого ортогональна фазе модуляции магнитного поля.

Выводы

При исследовании одиночных ионов и димерных ассоциатов примесных ионов $^{63}\text{Cu}^{2+}$ в монокристалле BaF_2 методом стационарной ЭПР-спектроскопии с модуляцией магнитного поля наблюдалось аномальное поведение спектров ЭПР димерных ассоциатов. Измерения проводились на спектрометре ELEXSYS E580 с коммерческим диэлектрическим резонатором ER4118MD5W1 (Bruker) и с использованием стандартного синхронного усилителя (Lock-in amplifier). При относительно высокой микроволновой мощности, достаточной для частичного насыщения резонансных переходов, в спектрах димерных ассоциатов появлялись линии резонансного поглощения, фаза которых была ортогональна фазе модуляции магнитного поля. В спектре одиночных ионов таких линий не наблюдалось. Мы полагаем, что появление аномальных линий связано с особенностями спиновой динамики высокоспиновых ($S > 1/2$) систем, в которых при интенсивном резонансном возбуждении магнитных дипольных переходов происходит преобразование магнитного дипольного момента спиновой системы в динамический электрический квадрупольный момент. Осциллирующий градиент электрической компоненты микроволнового поля в диэлектрическом резонаторе возбуждает электрические квадрупольные переходы между состояниями динамического квадрупольного момента. Появление резонансных линий с ортогональной фазой объясняется тем, что при модуляции магнитного поля возникает знакопеременный сдвиг фазы между когерент-

ностями связанных дипольного и квадрупольного осцилляторов. Обнаруженное существенное различие в спектрах ЭПР низкоспинового ($S = 1/2$) одиночного иона Cu^{2+} и высокоспинового ($S = 1$) димерного ассоциата позволяет при двухканальном по фазе модуляции магнитного поля детектировании спектров ЭПР надёжно идентифицировать спектры, принадлежащие парамагнитным центрам с низким или высоким спином. Это даёт дополнительные возможности для анализа перекрывающихся спектров ЭПР.

Благодарности

Работа была выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 23-22-00402. Работа Т.В.Ф. проводилась в рамках выполнения гос. задания Федерального исследовательского центра “Казанский научный центр Российской академии наук”. Измерения спектров ЭПР проводились с использованием научного оборудования Коллективного спектро-аналитического центра физико-химических исследований строения, свойств и состава веществ и материалов ФИЦ КазНЦ РАН.

Литература

1. Bloch F.: Phys. Rev. **70**, 460–474 (1946)
2. Fano U.: Phys. Rev. **133**, B828–B830 (1964)
3. Hilborn R.C., Hunter L.R., Johnson K., Peck S.K., Spencer A., Watson J.: Phys. Rev. A **50**, 2467–2474 (1994)
4. Stöckmann H.-J., Dubbers D.: New J. Phys. **16**, 053050 (2014)
5. Салихов К.М.: ЖЭТФ **162**, 630–645 (2022)
6. Tarasov V.F., Zaripov R.B., Solovarov N.K., Sukhanov A.A., Zharikov E.V.: Appl. Magn. Reson. **45**, 239–253 (2014)
7. Зарипов Р.Б., Соловаров Н.К., Суханов А.А., Тарасов В.Ф.: Комбинированный магнитоэлектрический спиновый резонанс примесных ионов Ho^{3+} в синтетическом форстерите. Казанский физико-технический институт 2013. Ежегодник. с. 56–59. Казань: ФизтехПресс 2014.
8. Зарипов М.М., Уланов В.А.: ФТТ **31**, 254–256 (1989)
9. Hoffmann S.K., Goslar J., Lijewski S., Ulanov V.A.: J. Chem. Phys. **127**, 124705 (2007)
10. Harthoorn J.L., Smidt J.: Appl. Sci. Res. **20**, 148 (1969)

Оценка возможности использования интерферометра Жамена для создания государственного первичного эталона скорости продольных ультразвуковых колебаний в прозрачных твёрдых телах

А. Д. Шишкин, В. В. Семашко, А. А. Карабутов

Лаборатория функциональных материалов и технологий фотоники

Проведён анализ недостатков существующего государственного первичного эталона скоростей ультразвуковых волн в твёрдых телах. Впервые предложено использовать в качестве меры скорости звука прозрачное твёрдое тело и измерять в нём скорость звука с помощью интерферометра Жамена. Выполнены первичные теоретические оценки, которые показали перспективность предложенного подхода. Установлены наиболее существенные препятствия для его экспериментальной реализации и способы их преодоления.

Opportunity estimation of using the Jamen interferometer to create a state primary standard for the longitudinal ultrasonic waves speed in transparent solids

A. D. Shishkin, V. V. Semashko, A. A. Karabutov

Laboratory of functional materials and photonics technologies

The shortcomings of the existing state primary standard of ultrasonic wave velocities in solids are analyzed. For the first time it is proposed to use a transparent solid body as a standard of sound velocity and to measure the sound velocity by using a Jamen interferometer. Initial theoretical evaluations have been carried out, which showed the promising potential of the proposed approach. The most significant obstacles to its experimental implementation and the ways to overcome them are established.

Введение

Методы дефектоскопии активно применяются во всех без исключения отраслях промышленности и их использование является ключевым при разработке новых материалов, технологий их получения и изготовления из них различных конструкций. От развития дефектоскопических технологий зависит устойчивость и конкурентоспособность экономики государства и безопасность жизнедеятельности населения. Особую роль играют методы неразрушающей дефектоскопии, которые позволяют исследовать изделия как в процессе изготовления, так и в процессе эксплуатации. Среди подобных методов выделяется ультразвуковой контроль, основанный на эхолокации внутренней структуры объекта с использованием ультразвуковых импульсов. Этот контроль относительно прост для реализации и позволяет обнаруживать области внутри объекта с отличающейся плотностью, определять их форму и глубину залегания.

Точность пространственной локализации таких областей определяется точностью государственного первичного эталона (ГПЭ) скоростей ультразвуковых волн в твёрдых телах. В настоящий момент используется ГПЭ, разработанный в 2012–2014 годах [1–3]. ГПЭ со-

стоит из двух установок ГЭТ189-2012 для продольных и ГЭТ189-2014 для сдвиговых и поверхностных волн. В обоих случаях в качестве меры скорости используются специально изготовленные с высокой точностью металлические цилиндры (рис. 1).

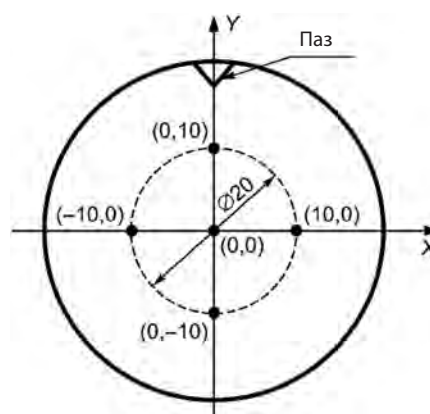


Рис. 1. Эскиз сечения мер скорости, используемых в ГПЭ. Координатами обозначены точки регистрации импульса [1–3].

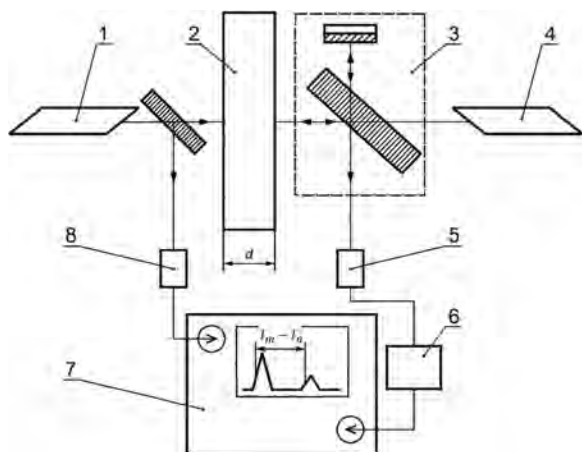


Рис. 2. Схема установки ГЭТ189-2012: 1 – моноимпульсный рубиновый лазер ОГМ-20; 2 – мера скорости; 3 – интерферометр Майкельсона; 4 – непрерывный He-Ne лазер; 5, 8 – фотодетекторы; 6 – широкополосный усилитель; 7 – осциллограф [1–3].

В ГЭТ189-2012 (рис. 2) ультразвуковые импульсы генерируются в результате ударного расширения плазмы, возникающей при абляции материала на торце меры (2) под действием мощного лазерного импульса. По достижении звуком обратного торца, последний деформируется, изменяя разность фаз между лучами в интерферометре Майкельсона, что приводит к изменению интерференционной картины и интенсивности излучения, падающего на фотодетектор (5). Для измерения скорости распространения звука производится регистрация времени задержки между ультразвуковыми импульсами, испытавшими различное количество переотражений от противоположных поверхностей меры скорости (рис. 3). Расчёт осуществляется по формуле (1):

$$V = 2d/(t_{i+1} - t_i), \quad (1)$$

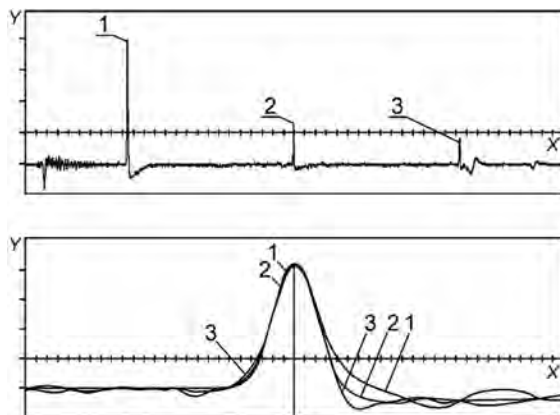


Рис. 3. Типичная осциллограмма серии ультразвуковых импульсов, возникающая в мере скорости за счёт переотражений от её граней: 1 – импульс прямого прохождения меры скорости, 2 и 3 – звуковые импульсы переотражений от противоположных граней меры скорости, соответствующие двойному и четверному прохождению соответственно (сверху). Снизу эти же импульсы, масштабированные по амплитуде и наложенные друг на друга с максимальным перекрытием [1–3].

где d – толщина меры скорости вдоль направления распространения звуковых импульсов, t_i и t_{i+1} – времена регистрации i -го и $(i + 1)$ -го импульсов. При этом время задержки между импульсами исчисляется относительно их пиков, а чтобы минимизировать влияние дисперсии ультразвука на точность измерений, их положение на временной шкале определяется путём их наложения (совмещения) друг на друга с максимальной площадью перекрытия.

Установка позволяет воспроизводить единицу скорости распространения продольных ультразвуковых волн в диапазоне 5000÷6500 м/с в полосе частот 0.5÷25 МГц с относительным среднеквадратическим отклонением $4.7 \cdot 10^{-7}/d$, где d – безразмерный параметр, численно равный толщине меры в метрах, и относительной неисключённой систематической погрешностью $1.4 \cdot 10^{-4}$.

В ГЭТ189-2014 (рис. 4) возбуждение ультразвуковых волн также производится за счёт абляции вещества на боковой поверхности меры скорости импульсным лазером. Регистрируются импульсы системой из двух равноплечих интерферометров, лучи которых сфокусированы на полированную поверхность меры скорости. Освещаются интерферометры одним лазером. По времени между двумя импульсами поочерёдного прохождения каждого интерферометра определяется скорость звука в материале. ГЭТ189-2014 обладает схожими с ГЭТ189-2012 характеристиками.

Явными недостатками существующего эталона являются лазерная абляция материала меры скорости и использование интерферометров Майкельсона. Первое приводит к износу мер скорости и постепенному увеличению систематической ошибки измерений, а второе требует применения специальных и дорогостоящих мер по механической и температурной стабилизации установки. Помимо этого, тенденция развития ультразвуковых дефектоскопов такова, что точность существующего эталона вскоре окажется недостаточной для их поверки.

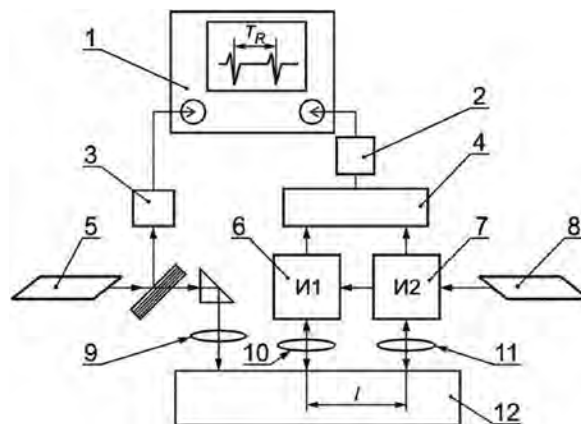


Рис. 4. Схема установки ГЭТ189-2014: 1 – цифровой осциллограф; 2 – широкополосный усилитель; 3, 4 – фотоприёмники; 5 – моноимпульсный рубиновый лазер ОГМ-20; 6, 7 – интерферометры Майкельсона; 8 – непрерывный He-Ne лазер; 9, 10, 11 – фокусирующие линзы; 12 – мера скорости звука [1–3].

Вышеописанные обстоятельства отражены в распоряжении правительства РФ [4].

Целью настоящей работы является анализ возможностей использования интерферометра Жамена для проведения прецизионных измерений скорости ультразвуковых волн в твёрдых телах, возбуждаемых оптоакустическим способом без абляции материала, и разработки на его основе нового ГПЭ скорости распространения продольных ультразвуковых волн в прозрачных твёрдых телах.

Анализ возможностей использования интерферометра Жамена в качестве базового интерферометра для детектирования ультразвуковых импульсов

Основой интерферометра Жамена (рис. 5) являются одинаковые плоскопараллельные пластины из кварцевого стекла (1 и 2). Луч He-Ne лазера (3) падает на плоскопараллельную пластину (1), в которой часть луча отражается от внешней поверхности, а другая часть преломляется и вновь отражается уже от её внутренней поверхности. Таким образом формируются два параллельных луча, которые и образуют плечи интерферометра (4 и 5). Толщины плоскопараллельных пластин определяют расстояние между этими лучами. Интерференция возникает между лучами (4 и 5) путём их сведения плоскопараллельной пластиной (2) в луч (6) за счёт подобных же переотражений. Интерференционная картина может наблюдаться невооружённым глазом, видеокамерой или с помощью любого детектора (7).

Разность фаз между лучами возникает либо при разъюстировке интерферометра, либо при внесении объекта исследования, например, третьей плоскопараллельной пластинки (8) в одно из его плеч. Под разъюстировкой интерферометра понимается отличие углов ψ и θ , из-за чего будет возникать интерференционная картина в виде наклонных полос, число и угол наклона которых определяется разностью этих углов и тем, в какой пло-

скости реализуются эти отличия. При съюстированном интерферометре углы $\psi \approx \theta$, и разность фаз близка нулю, что выражается в равномерном распределении интенсивности излучения по всему сечению пучка (6). При этом подстройкой интерферометра можно сделать так, чтобы наблюдалась либо светлая, либо тёмная интерференционная полоса бесконечной ширины, интенсивность которой, в свою очередь, зависит от изменения разности фаз между интерферирующими лучами [5]. В случае лучей одинаковой интенсивности эта зависимость определяется формулой (2):

$$\frac{I(\Delta\varphi)}{2I_0} = 1 + \cos(\Delta\varphi), \quad (2)$$

где I_0 – интенсивность лучей, $\Delta\varphi$ – разность фаз. Абсолютная чувствительность интерферометра к изменению разности фаз между лучами определяется модулем производной (3):

$$\left| \frac{1}{2I_0} \frac{dI(\Delta\varphi)}{d\Delta\varphi} \right| = |\sin(\Delta\varphi)|. \quad (3)$$

Таким образом максимальная чувствительность интерферометра Жамена к изменению разности фаз интерферирующих лучей соответствует экстремумам данной функции, где $\Delta\varphi = (2m + 1)/2$, а m – целое число. Эти разности фаз соответствуют половине максимальной интенсивности интерференционной картины.

Идея использования интерферометра Жамена в качестве основного компонента создаваемого эталона скорости ультразвуковых волн состоит в том, что ультразвуковой импульс, распространяясь в веществе, локально изменяет его плотность, а вместе с ним и показатель преломления. Это изменение предполагается регистрировать в прозрачной мере скорости, выполненной в виде плоскопараллельной кварцевой пластины, помещённой в оба плеча интерферометра. В этом случае изменение интенсивности интерференционной картины на фотодетекторе будет наблюдаться дважды при пересечении ультразвуковым импульсом (волной давления) лучей (4) и (5). Важно отметить, что если оптический путь в плечах интерферометра будет изменяться одновременно, интерференционная картина останется неизменной. Это может наблюдаться в том случае, если пространственная локализация ультразвукового импульса (произведение длительности ультразвукового импульса на скорость звука в веществе) превышает расстояние между плечами интерферометра. В свою очередь, диаметр лучей (4) и (5) не должен превышать размеров пространственной локализации ультразвуковых импульсов. В противном случае уменьшится видность изменения интерференционной картины.

Регистрация прохождения ультразвуковых импульсов через области зондирования меры скорости может быть осложнена кривизной их волнового фронта. Если она будет достаточно большой (рис. 6а), то перекрытие интерферирующих лазерных пучков и ультразвукового

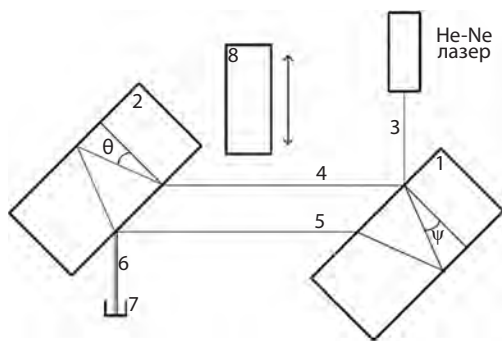


Рис. 5. Схема интерферометра Жамена, образованного двумя одинаковыми стеклянными плоскопараллельными пластинами: 1 и 2 плоскопараллельные стеклянные пластины, образующие интерферометр Жамена; 3 – лазерный луч, падающий на интерферометр; 4 и 5 – плечи интерферометра; 6 – луч, представляющий собой интерференцию лучей 4 и 5; 7 – фотодетектор, с помощью которого наблюдается интерференционная картина; 8 – исследуемый образец.

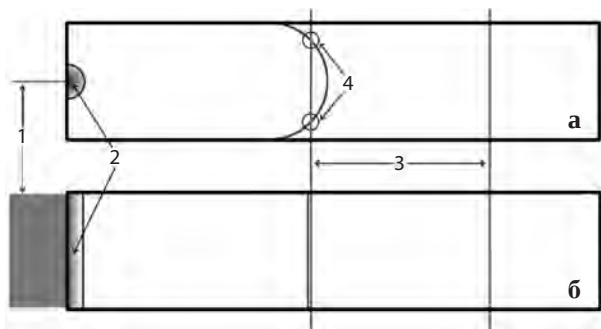


Рис. 6. Схематическое изображение, иллюстрирующее перекрытия лучей, образующих плечи интерферометра в мере скорости сферическим (а) и плоским (б) волновыми фронтами ультразвуковых импульсов. 1 – лазерные импульсы разного диаметра, оптоакустические генерирующие ультразвуковые импульсы; 2 – вид волновых фронтов генерируемых ультразвуковых импульсов; 3 – плечи интерферометра; 4 – точки перекрытия плеч интерферометра и ультразвуковых импульсов.

импульса в каждый из моментов времени будет происходить, условно, только в двух пространственных точках, что может оказаться недостаточным для детектирования изменения показателя преломления вещества меры скорости. В случае же плоского волнового фронта (рис. 6б), перекрытие будет происходить на всей толщине меры скорости. Учитывая, что чувствительность интерферометрической детекции изменения плотности вещества меры скорости может быть увеличена за счёт увеличения её толщины, вышеупомянутое обстоятельство требует реализации генерации ультразвуковых импульсов на большой площади.

Эксперимент

Для измерения скорости продольных ультразвуковых волн времяпролётным методом в прозрачной среде была создана экспериментальная установка (рис. 7).

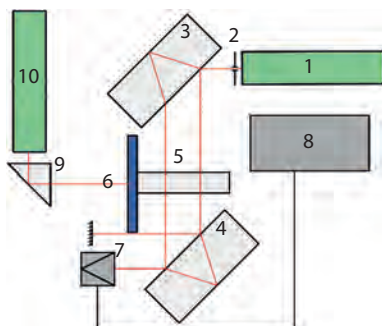


Рис. 7. Схема установки для генерации и регистрации ультразвуковых импульсов в мере скорости времяпролётным методом при помощи интерферометра Жамена: 1 – He-Ne лазер; 2 – диафрагма; 3 и 4 – плоскопараллельные пластины, образующие интерферометр Жамена; 5 – плоскопараллельная пластина, выступающая мерой скорости; 6 – светофильтр СЗС-22; 7 – фотодиод; 8 – осциллограф; 9 – призма; 10 – Nd:YAG лазер.

Интерференционная картина возникает на фотодетекторе при прохождении непрерывного излучения He-Ne лазера (1) через две плоскопараллельные стеклянные пластины (3 и 4), которые образуют интерферометр Жамена. Сами плоскопараллельные пластины были взяты из набора для проверки плоскостности поверхностей интерференционными методами, что обеспечивает их высокое качество изготовления и, как результат, минимально вносимые искажения в волновые фронты лучей интерферометра. Поляризация излучения He-Ne лазера была ориентирована перпендикулярно плоскости падения луча на первую плоскопараллельную пластину, что соответствует плоскости рисунка. Данный выбор поляризации обусловлен тем, что при этих условиях обеспечивается наибольшая интенсивность излучения на детекторе и, тем самым, достигается наилучшее увеличивая отношение сигнал/шум [6]. Видность интерференционной картины при этом не ухудшается в силу одинакового числа отражений и прохождений на границах пластин интерферометра для каждого из лучей.

Как упоминалось выше, интерферометр Жамена позволяет получить интерференционную картину с бесконечной шириной полос в случае идеально точного совпадения волновых фронтов лучей в плечах интерферометра. На практике это означает возможность добиться однородной по интенсивности интерференционной картины, когда ширина полос много больше диаметра исходного лазерного пучка. Интенсивность при этом будет зависеть только от разности фаз между лучами, которую можно регулировать поворотом одной из плоскопараллельных пластин интерферометра. Из экспериментально полученных интерферограмм (рис. 8) видно, что ширина полос явно больше диаметра пучка, что обуславливает изменение интенсивности по всему сечению в случае изменения разности фаз в одном из плеч интерферометра.

В качестве генератора ультразвуковых импульсов использовался светофильтр СЗС-22, возбуждение звука в котором происходило за счёт теплового оптоакустического эффекта. Светофильтр СЗС-22 толщиной 1 мм обладает коэффициентом поглощения света $\mu = 130 \text{ см}^{-1}$ на длине волны 1.064 мкм, генерируемого импульсным Nd:YAG лазера с модуляцией добротности марки LS-2134Y производства компании JV Lotis TH. Длительность лазерного импульса порядка 10 нс. Энергия в лазерном импульсе не превышала 100 мДж. При данных условиях генерировались ультразвуковые импульсы длительностью $\sim 0.1 \text{ мкс}$, определённой по отрицательной полуволне, и максимальной амплитудой $\sim 500 \text{ мВ}$ (рис. 9). Учитывая, что используемый в эксперименте ультразвуковой детектор прибора УДЛ-2М преобразует звукового давления в напряжение с коэффициентом $\alpha = 50 \text{ мВ/Па}$ [7], пиковое давление, создаваемое первым ультразвуковым импульсом в мере скорости, составляет $\sim 10^4 \text{ Па}$.

Для создания акустического контакта светофильтр приклеивался к торцу исследуемого образца с помощью глицеринового геля для медицинских ультразвуковых исследований. Сам образец, предполагаемый для исполь-

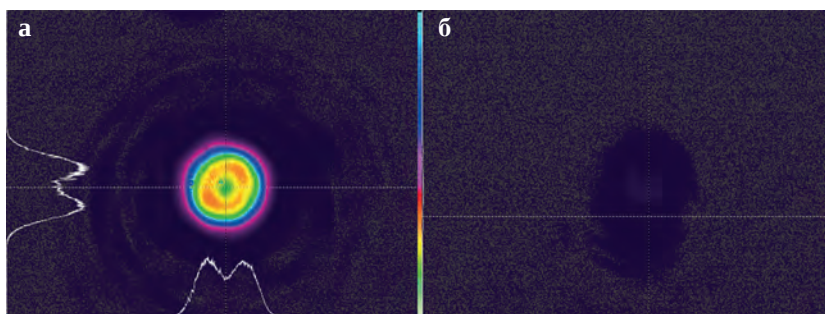


Рис. 8. Интерферограммы, полученные на интерферометре Жамена при отсутствии бокового сдвига, соответствующие светлой (а) и тёмной (б) интерференционным полосам. Выдержка 0.07 мс.

зования в качестве меры скорости, представляла собой брусок из плавленного кварца с сечением $13 \times 13 \text{ мм}^2$ и длиной 35 мм. Поверхности торцов и двух противоположных боковых граней матовые, оставшиеся две грани полированные до IV класса чистоты.

Чтобы оценить эффективность акустической связи между оптоакустическим генератором ультразвуковых импульсов и образцом в зависимости от способа обеспечения акустического контакта, в системе “СЗС-22 – иммерсия – мера скорости” через полированную или матовую поверхности, была собрана экспериментальная установка (рис. 10). Регистрация ультразвуковых импульсов производилась дефектоскопом УДЛ-2М. Оцифровка сигналов с акустического датчика дефектоскопа осуществлялась 12-битным АЦП с частотой дискретизации 100 МГц. Прибор имеет возможность накопления сигнала и аттестован для измерения скорости звука в веществах с относительной погрешностью не хуже 3% и пределах допустимого среднеквадратического отклонения не более 0.05%. Результаты измерений генерируемых ультразвуковых импульсов, возникающих в системе “СЗС-22 – иммерсия – мера скорости” при иммерсии через полированную и матовую грани, приведены на рис. 11.

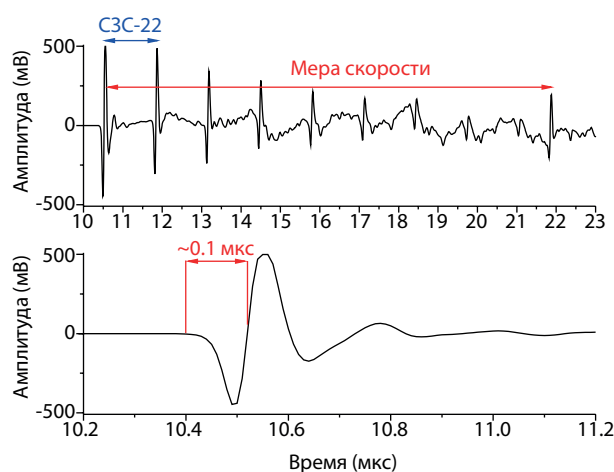


Рис. 9. Осциллограмма первого ультразвукового импульса, возникающего в системе “СЗС-22 – иммерсия – мера скорости (стеклянный брусок)”, при воздействии на неё лазерным импульсом с энергией $\sim 100 \text{ мДж}$ и длительностью порядка 10 нс.

На каждой из осциллограмм наблюдается пять импульсов. Первый импульс (1) является импульсом прямого прохождения системы. Импульсы со второго по четвёртый (2–4) обусловлены переотражениями ультразвука внутри светофильтра и задержка между ними соответствует двойному проходу звука его толщины. Пятый импульс (5) связан с частичным отражением прямого импульса от границы раздела сред меры скорости и акустического детектора и последующим его отражением от противоположной границы между мерой скорости и светофильтром. Его временная задержка соответствует двойному проходу ультразвукового импульса через меру скорости. Скорость звука в мере скорости, рассчитываемая по формуле (1), составила $5915 \pm 5 \text{ м/с}$. Таким образом, пространственная локализация импульсов составляет примерно 0.6 мм. Из осциллограмм также видно, что различия в сигналах минимальны, а незначительное отличие в амплитудах ультразвуковых импульсов можно объяснить плохо контролируемые различиями условий прилегания детектора к мере скорости. Следовательно, качеством обработки поверхностей меры скорости можно пренебречь.

На основании данных литературы [8, 9] были проведены теоретические оценки пикового значения генерируемого звукового давления в светофильтре СЗС-22 под действием импульсного лазерного излучения с длиной волны 1064 нм и диаметром пучка $d = 6 \text{ мм}$. Поглощаемая энергия излучения E , равная 100 мДж, выделяется в виде тепла и приводит к расширению материала светофильтра. Этот нагрев ΔT может быть рассчитана по формуле (4):

$$\Delta T = \frac{E}{c_{\text{уд}} \rho_0 \pi (d/2)^2 h}, \quad (4)$$

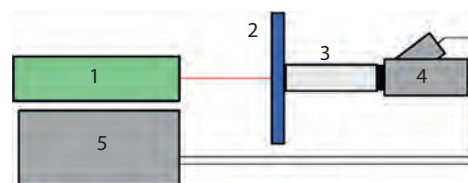


Рис. 10. Схема установки для проверки возможности оптоакустической генерации ультразвуковых импульсов в светофильтре СЗС-22: 1 – Nd:YAG лазер; 2 – светофильтр СЗС-22; 3 – мера скорости; 4 – ультразвуковой детектор; 5 – осциллограф.

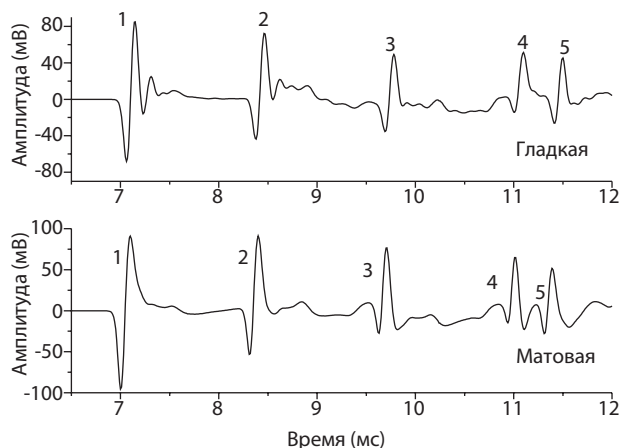


Рис. 11. Осциллограммы серий ультразвуковых импульсов, возникающих в мере скорости при приклеивании СЗС-22 к гладкой (верх) и матовой (низ) её граням: 1 – импульс прямого прохождения системы; 2, 3 и 4 – переотражения в светофильтре; 5 – переотражения в мере скорости.

где h – глубина проникновения излучения, а $c_{уд}$ – удельная теплоёмкость кварцевого стекла и ρ_0 – плотность материала светофильтра. В приближении, что вся энергия поглощается на глубине $h = \mu_a^{-1}$, где μ_a – коэффициент поглощения светофильтра, изменение температуры составит примерно 21.5 К.

Изменение давления можно рассчитать по формуле (5):

$$\Delta P = \rho_0 c_0^2 \beta \Delta T, \quad (5)$$

где c_0 – скорость звука в светофильтре, равная 4800 м/с, а β – коэффициент объёмного теплового расширения, равный $2.3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Таким образом, теоретическое пиковое значение создаваемого звукового давления в светофильтре СЗС-22 может достигать 33 МПа, что, с учётом потерь на иммерсии между материалами в системе “СЗС-22 – иммерсия – мера скорости – иммерсия – детектор”, на 2 порядка превышает экспериментально измеренное.

Поэтому для дальнейших оценок было решено оценить изменение показателя преломления меры скорости иначе, через приближение, что его изменение под действием ультразвукового импульса такое же, как при нагреве. Линейная зависимость изменения показателя преломления материала от его температуры, имеет вид:

$$\Delta n = \frac{dn}{dT} \Delta T \approx 2.6 \cdot 10^{-4}, \quad (6)$$

где dn/dT – дифференциальный температурный коэффициент изменения показателя преломления, который для кварцевого стекла равен $11.9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

С другой стороны, чтобы сдвинуть интерференционную картину по фазе на половину полосы, требуется изменение показателя преломления:

$$\Delta n_{\min} = \lambda / 2L \approx 2.4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}, \quad (7)$$

где λ – длина волны излучения He-Ne лазера, а L – толщина меры скорости вдоль направления распространения излучения. Таким образом, число интерференционных полос, на которое сдвинется картина, равно отношению Δn к удвоенному $\Delta n_{\min}$:

$$N = \Delta n / 2\Delta n_{\min} \approx 5 \text{ полос.} \quad (8)$$

То есть, зарегистрировать ультразвуковые импульсы в мере скорости при помощи интерферометра Жамена должно быть достаточно легко. Несмотря на эти весьма оптимистичные теоретические оценки чувствительности интерферометра и возможности регистрации ультразвукового импульса по изменению разности фаз между лучами интерферометра, эксперимент показал, что искомый сигнал имеет амплитуду ниже уровня шума. Таким образом, для его успешного наблюдения требуются дополнительные меры по усовершенствованию установки. В частности, основной проблемой являлась засветка сигнала интерференции излучения непрерывного He-Ne лазера мощным рассеянным излучением импульсного Nd:YAG лазера. В эксперименте предпринимались попытки её подавить при помощи имеющихся интерференционных светофильтров, однако уровень шума и в этом случае превышал уровень искомого сигнала. Тем не менее, экспериментальная установка имеет внутренние резервы по повышению отношения сигнал/шум связанные с тем, что плоскопараллельные пластины, образующие интерферометр, не имели зеркального полупрозрачного покрытия с внешней стороны, из-за чего достаточно большая часть излучения He-Ne лазера не использовалась при создании интерференционной картины. Ожидается, что при устранении этого недостатка удастся поднять уровень сигнала на порядок. Также желательно использовать одномодовый He-Ne непрерывный лазер большей мощности.

Заключение

В рамках настоящей работы осуществлён анализ недостатков существующего государственного первичного эталона (ГПЭ) скоростей ультразвуковых волн в твёрдых телах. Впервые предложено измерять скорость звука внутри прозрачной меры скорости при помощи интерферометра Жамена. Проведены первичные теоретические оценки, которые показали перспективность предложенного подхода. Установлены наиболее существенные препятствия для его экспериментальной реализации и способы их преодоления.

Литература

1. Bazylev P.V., Izotov A.V., Kondratiev A.I., Lugovoi V.A., Nigai V.P., Okishev K.N.: Measurement Techniques **54**, no. 11, 1219–1224 (2012)
2. Базылев П.В., Изотов А.В., Кондратьев А.И., Луговой В.А., Окисhev К.Н.: Измерительная техника **56**, № 7, 736–742 (2013)
3. Базылев П.В., Кондратьев А.И., Крумгольц И.Я., Луговой В.А.: Альманах современной метрологии № 2, 57–62 (2015)

4. Распоряжение Правительства РФ от 19 апреля 2017 г. № 737-р, О стратегии обеспечения единства измерений в РФ до 2025 г.
5. Малакара Д. (ред.): Оптический производственный контроль, с. 90. М.: Машиностроение, 1985.
6. Лазерно-ультразвуковой дефектоскоп УДЛ-2М. Паспорт и руководство по эксплуатации. М.: ООО Кинетик.
7. Сивухин Д.В.: Общий курс физики, учебное пособие для вузов. Т. IV. Оптика, 3-е изд., стереот., с. 430. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
8. Подымова Н.Б., Карабутов А.А.: Акустический журнал **67**, № 5, 482–492 (2021)
9. Гусев В.Э., Карабутов А.А.: Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991.
10. Сарнацкий В.М., Судьенков Ю.В.: Оптоакустический эффект в твёрдых телах. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2020.

Люминесцентная термометрия на основе микрокристаллов LiHoF₄

В. И. Колесникова, Г. С. Шакуров, О. А. Морозов, А. Г. Шмелев, С. Л. Кораблева¹, В. В. Семашко

Лаборатория функциональных материалов и технологий фотоники

¹ Казанский федеральный университет, Институт физики

Произведена оценка применимости кристаллических микрочастиц LiHoF₄ в качестве высокочувствительных температурных сенсоров для люминесцентной термометрии. Определены относительная и абсолютная термочувствительность температурных сенсоров на основе этих микрочастиц, и оценена минимально детектируемая разность температур для пяти наиболее перспективных пар пиков люминесценции, обусловленной ⁵F₅–⁵I₈ переходами ионов Ho³⁺. Наилучшие показатели наблюдались в области температур 80–130 К для пары пиков 656.5 и 653.9 нм. При этом обнаружительная способность сенсора к изменению температуры составила ~2 К. Продemonстрирована перспективность применения Ho³⁺-активированных соединений для люминесцентной термометрии и визуализации температурных полей.

Luminescent thermometry based on LiHoF₄ microcrystals

V. I. Kolesnikova, G. S. Shakurov, O. A. Morozov, S. L. Korableva¹, A. G. Shmelev, V. V. Semashko

Laboratory of functional materials and photonics technologies

¹ Kazan Federal University, Institute of Physics

The applicability of crystalline LiHoF₄ microparticles as highly sensitive temperature sensors for luminescent thermometry was performed. The relative and absolute thermal sensitivity of temperature sensors based on these microparticles were determined and the minimum detectable temperature difference was estimated for the five most promising pairs of luminescence peaks caused by ⁵F₅–⁵I₈ transitions of Ho³⁺ ions. The best performance was observed in the temperature range 80–130 K for a pair of peaks at 656.5 and 653.9 nm. In this case, the detection ability of the sensor for temperature changes was ~2 K. The prospects of using Ho³⁺-activated compounds for luminescent thermometry and visualization of temperature fields have been demonstrated.

Введение

Бесконтактное измерение температуры и визуализация её пространственного распределения востребованы в различных областях науки и техники. В частности, подобная информация является ключевой при разработках современных устройств памяти, процессорной и сверхвысокочастотной электроники и радиофотоники, в смарт-химии и биохимии, аэрокосмической и автомобильных отраслях [1, 2].

В то же время применение стандартных методов измерения температуры с помощью контактных температурных датчиков и тепловизоров не позволяет обеспечить необходимое пространственное или временное разрешение. С этой точки зрения наиболее перспективным представляется использование наноразмерных люминесцентных сенсоров, способных детектировать градиенты температуры в ~50 мК с субмикрометровым пространственным и миллисекундным временным разрешением [3]. Чаще всего применяются наночастицы, допированные редкоземельными элементами, ввиду разнообразия доступных

спектральных линий в широком диапазоне частот [4]. Кроме того, существуют методы, основанные на применении термочувствительных материалов и элементов, таких как наноалмазы [5–7], а также полупроводники [8].

Люминесцентную нанотермометрию делят на несколько типов в зависимости от того, какие спектрально-кинетические характеристики рассматривают. При этом реализуется либо разрешённая, либо интегрированная во времени термометрия [9, 10]. Кроме классических подходов к измерению температурных зависимостей, также существуют некоторые модификации, позволяющие добиться большей чувствительности [11].

Особенный интерес вызывают биомедицинские возможности люминесцентной пространственно-разрешенной температурной сенсорики для исследования биологических и биохимических процессов в живых организмах, для диагностики и лечения различных заболеваний [12].

Важным практическим применением является также использование наночастиц-нанотермометров в качестве актуаторов для задач тераностики: лазерной или радиочастотной гипертермии “под контролем” заданных об-

ластей организмов [13] и для бурно развивающихся технологий мультиспектральной оптоакустической [14] и ТГц-визуализации онкологических образований [15]. Причём для этого привлекательными выглядят активированные кристаллические наночастицы на основе фторидов, которые демонстрируют биологическую совместимость, отсутствие токсичности [16], высокую температурную чувствительность в физиологическом диапазоне температур [17, 18] и одновременно способны выступать в качестве эффективных преобразователей “излучение-тепло” [19, 20]. Благодаря узости их фонованого спектра, активированные фторидные наночастицы характеризуются пониженной вероятностью безызлучательных процессов тушения люминесценции [21] даже при высоком содержании активаторных ионов.

В настоящей работе представлены результаты исследования зависимых от температуры спектрально-кинетических характеристик так называемых “самоактивированных” кристаллических микрочастиц LiHoF_4 , в которых в качестве люминесцирующего иона используется катион Ho^{3+} матрицы-основы.

Материалы и методы

Рост кристаллов LiHoF_4 осуществлялся в вакууме из шихты $\text{LiF} + \text{HoF}_3$ химической чистоты 0.9999 при температуре 798 °С методом Бриджмена-Стокбаргера в графитовых тиглях. Субмикронные частицы получены путём перетирания монокристаллов в агатовой ступке.

Контроль размера частиц осуществлялся на микроскопе JENVAL Carl Zeiss при увеличении в 400 раз. Было установлено, что частицы имели близкую к сферической форму (рис. 1а). Измерения при помощи программы Fiji ImageJ показали, что наблюдаются частицы малого размера со средним диаметром (1 ± 0.5) мкм, а также агломераты частиц размером порядка 4 мкм.

Порошок микрочастиц наклеивался на медную пластинку тонким слоем с помощью клея ПВА, разведённого водой в соотношении 1:10. Пластика затем помещалась в держатель для образцов криостата Janis ST-100 для проведения спектрально-кинетических исследований в диапазоне температур 80–350 К. В качестве хладагента использовался жидкий азот. С помощью температурного контроллера LakeShore 325 и нагревателя, встроенного в криостат, температура образца поддерживалась с точностью 0.1 К. Свойства образцов в оптическом диапазоне изучались с использованием спектрофлуориметра Fluorolog-QM-75-22-C (Horiba). Возбуждение люминесценции образцов осуществлялось излучением ксеноновой лампы высокого давления Hamamatsu L2174-01 UXL75XE, прошедшим через двойной монохроматор возбуждения спектрофлуориметра (фокусное расстояние 380 мм, решётки 1200 шт./мм, длина волны блеска 500 нм). Люминесценция анализировалась с помощью двойного монохроматора с аналогичными характеристиками. Спектральное разрешение в спектрах люминесценции и возбуждения составляло 1 нм. В качестве фотоприёмника использовался ФЭУ R13456-11 (Hamamatsu) с термоэлектрическим охлаждением до –70 °С. Регистрация кинетик люминесценции образцов осуществлялась фотоэлектрическим способом на этом же приборе, но с использованием импульсной лампы L4633 (Hamamatsu).

Для определения температуры частиц по их спектрально-люминесцентным характеристикам использовались два способа:

1. Способ на основе изменения интенсивностей полос люминесценции, обусловленных переходами с различных электронных уровней, разделённых энергетическим зазором ΔE . В случае, если ΔE не превышает $\sim 2000 \text{ см}^{-1}$, такие уровни являются термически связанными и населённости i -ого уровне подчиняются распределению Больцмана:

$$F(E) = N_0 \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right), \quad (1)$$

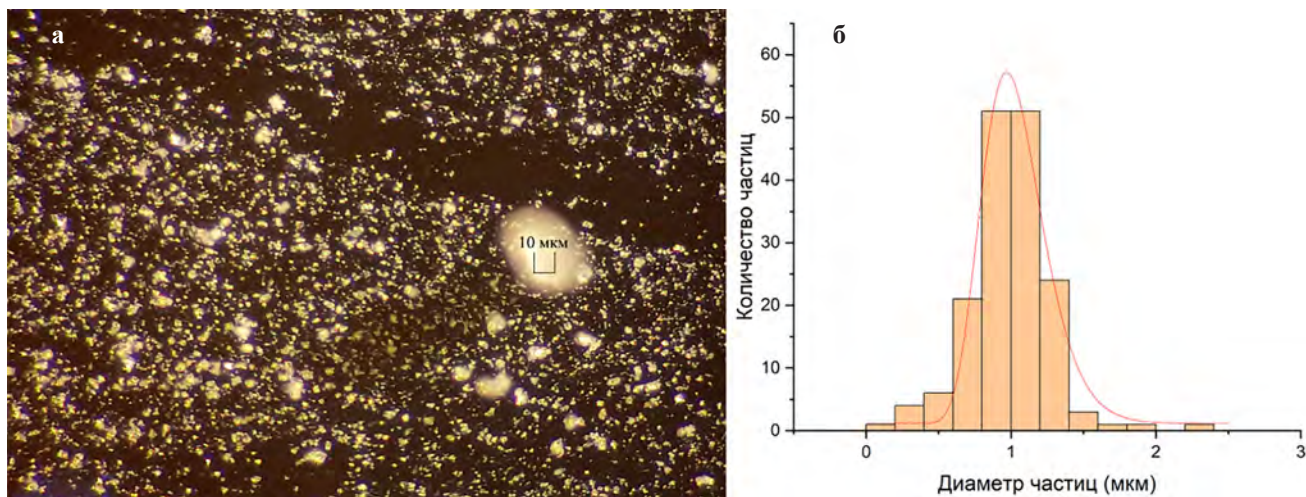


Рис. 1. Микрофотография (а) и гистограмма распределения по размеру исследуемых образцов LiHoF_4 (б).

где N_0 – концентрация люминесцирующих частиц, $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, E_i – энергия i -ого уровня, отсчитываемая от наиболее низкоэнергетического состояния термически связанных возбуждённых состояний, T – температура в К. Таким образом, отношение интенсивностей таких полос в спектре люминесценции LIR (Luminescence intensity ratio) оказывается независимым от характеристик возбуждения и при соответствующей калибровке может являться мерой температуры люминесцирующей частицы (2):

$$LIR = \frac{I_j}{I_i} = \frac{\Phi_j}{\Phi_i} \frac{N_j}{N_i} = \frac{\Phi_j}{\Phi_i} \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right), \quad (2)$$

где Φ_i, Φ_j – некие постоянные, зависящие от множества факторов, таких как, например, форма частиц, квантовая эффективность излучения и т. д.; N_i, N_j – населённости соответствующих энергетических уровней; ΔE – разница энергий между уровнями.

2. Способ, основанный на изучении температурной зависимости времени жизни возбуждённых состояний, с которых наблюдаются излучательные переходы. При этом в случае близкой к экспоненциальной зависимости спада интенсивности люминесценции от времени $I(t)$ (3), в качестве измеряемого параметра выступает показатель $\tau(T)$ при экспоненте, в другом случае, измеряется время, за которое интенсивность люминесценции падает в e раз:

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau(T)}\right). \quad (3)$$

Время жизни возбуждённых состояний зависит от множества различных процессов, протекание которых, в свою очередь, зависит от температуры. Поэтому его использование предполагает обязательную предварительную экспериментальную градуировку.

Для интерпретации наблюдаемых переходов были использованы литературные данные для изоструктурного кристалла $\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$ [22].

Результаты и их обсуждение

Ионы Ho^{3+} обладают разветвлённой системой уровней и интенсивной люминесценцией в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Для примера на рис. 2 приведена схема переходов ионов Ho^{3+} в кристаллах SrF_2 . При высоких концентрациях ионов Ho^{3+} из-за процессов концентрационного тушения люминесценции часть из приведённых на рис. 2 переходов имеют низкий квантовый выход люминесценции и не наблюдаются в эксперименте.

С целью выявления наиболее перспективных участков спектра для люминесцентной термометрии были исследованы температурные зависимости спектров люминесценции микронных частиц LiHoF_4 в диапазоне от 370 до 688 нм. Возбуждение образцов осуществлялось

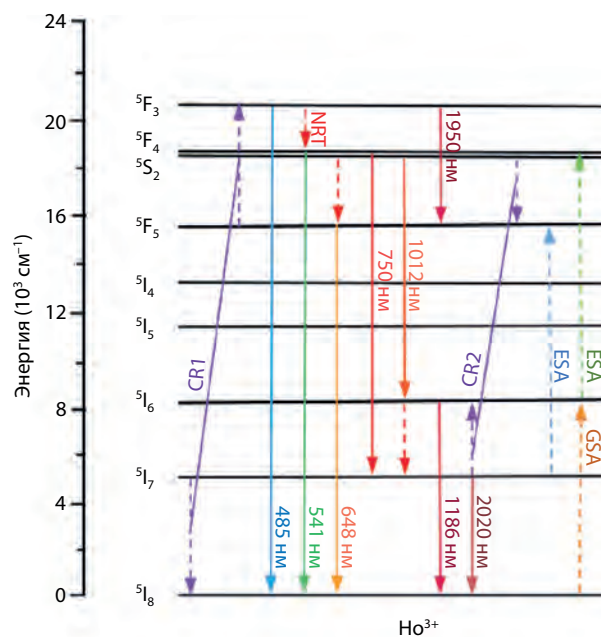


Рис. 2. Схема энергетических уровней в кристалле SrF_2 , активированного ионами Ho^{3+} с концентрацией 0.1 мол.%, и основных наблюдаемых процессов населения и релаксации его возбуждённых состояний, где CR – переходы с кроссрелаксацией, NRT – безызлучательные переходы [23].

на длине волны 350 нм. Температура менялась от 80 до 350 К.

Анализ обзорных спектров показал, что в исследованном диапазоне наблюдаются линии люминесценции, соответствующие межмультиплетным переходам, изображённым на рис. 3. Установлено, что наибольшую температурную чувствительность демонстрируют группы линий, соответствующие переходу ${}^5F_5 - {}^5I_8$.

Они локализованы в спектральной области 15000–16000 cm^{-1} (625–667 нм). Число и положение линий в спектре определяется штарковским расщеплением мультиплетов 5F_5 и 5I_8 , а температурные изменения обусловлены перераспределением электронов по термически связанным штарковским подуровням возбуждённого мультиплета 5F_5 . В то же время в этой же спектральной области возможны переходы между мультиплетами уровней ${}^5F_3 - {}^5I_7$.

Спектр люминесценции в области перехода ${}^5F_5 - {}^5I_8$ и её спектр возбуждения приведены на рис. 4а и б соответственно. Из спектра возбуждения видно, что наиболее эффективно люминесценция в области ${}^5F_5 - {}^5I_8$ переходов ионов Ho^{3+} возбуждается на длинах волн 440–490 нм. Поэтому с целью предотвращения избыточного нагрева образца излучением возбуждения для исследования температурной зависимости спектров люминесценции было использовано излучение с длиной волны 484 нм.

Для этого были выбраны несколько пиков люминесценции в области 635–670 нм и рассчитаны их отношения интенсивностей $LIR(\lambda_1, \lambda_2, T_i)$ при всех исследуемых температурах:

$$LIR(\lambda_1, \lambda_2, T) = \frac{I(\lambda_1, T_i)}{I(\lambda_2, T_i)}, \quad (4)$$

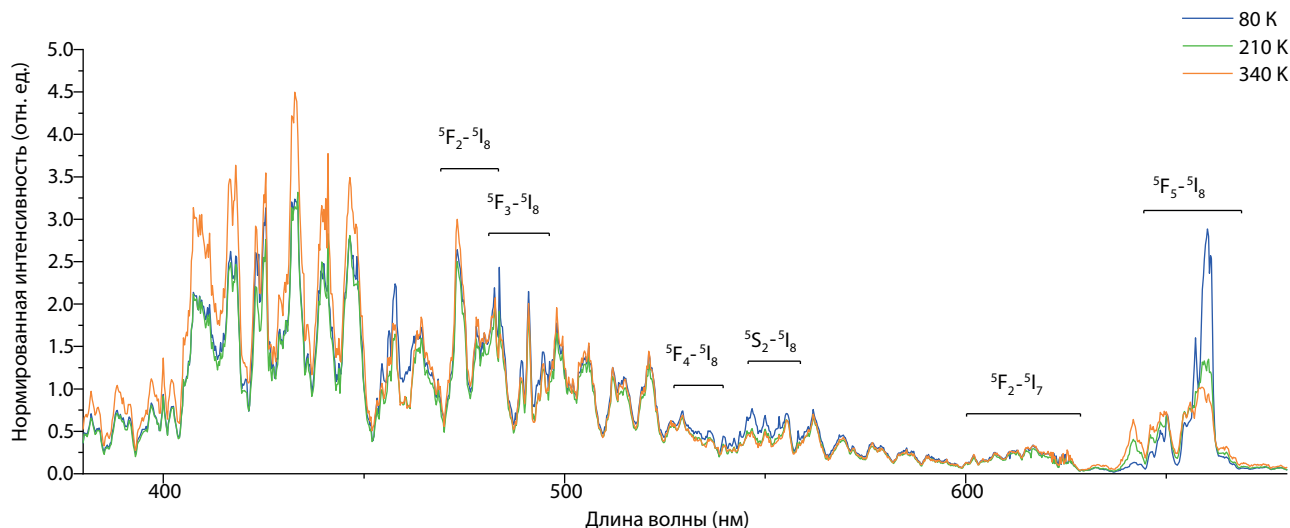


Рис. 3. Обзорный оптический спектр LiHoF_4 при разных температурах при $\lambda_{\text{ex}} = 350$ нм со спектральным разрешением 1 нм.

где $I(\lambda, T)$ – интегральные интенсивности линий люминесценции образца на длины волн λ и температуре T , нормированные на их спектральную ширину.

Результат расчётов приведён на рис. 5, из которого видно, что максимальное значение $\text{LIR}(\lambda_1, \lambda_2, T_i)$ соответствует температурам в области 80–100 К, следовательно, для неё будет реализовываться наиболее высокая абсолютная температурная чувствительность (S_a) сенсоров на основе микрочастиц LiHoF_4 . Она характеризует изменение LIR при изменении температуры на 1 К и определяется по формуле (5):

$$S_a = \frac{d\text{LIR}}{dT}. \quad (5)$$

Кроме того, для сравнения свойств различных температурных сенсоров применяется относительная чувствительность (S_r), которые представляет собой процент изменения значения LIR при изменении температуры на 1 К (6) [23]

$$S_r = \frac{1}{\text{LIR}} \frac{d\text{LIR}}{dT}. \quad (6)$$

Поскольку расчёт производных зависимостей $\text{LIR}(\lambda_1, \lambda_2, T_i)$ по малому числу экспериментальных точек сопряжён с большими ошибками, для подобных расчётов принято аппроксимировать экспериментальные зависимости $\text{LIR}(\lambda_1, \lambda_2, T_i)$ гладкими функциями. Учитывая, что в нашем случае изменения интенсивностей пиков люминесценции определяются распределением Больцмана, аппроксимация $\text{LIR}(\lambda_1, \lambda_2, T_i)$ осуществлялась экспоненциальной функцией. Результаты аппроксимации также представлены на рис. 5, а полученные зависимости $S_a(T)$ и $S_r(T)$ – на рис. 6.

С учётом указанных выше данных в табл. 1 приведены оценки минимальной разницы температур образца, которые могут быть зарегистрированы LIR-методикой. Расчёты осуществлялись по формуле:

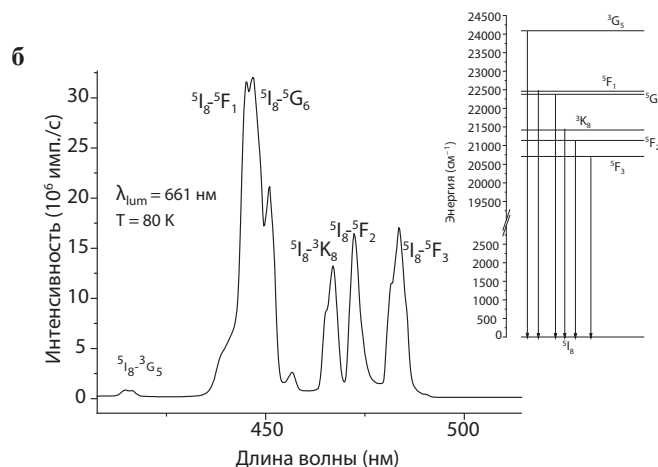
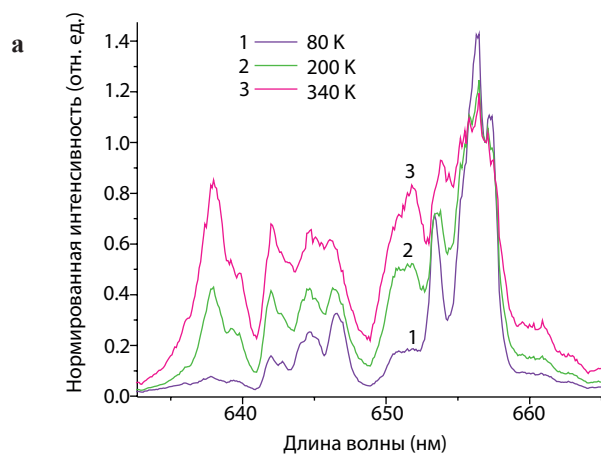


Рис. 4. Спектры люминесценции микрочастиц LiHoF_4 в области перехода ${}^5\text{F}_5 - {}^5\text{I}_8$ при разных температурах (а) и спектры возбуждения люминесценции микрочастиц LiHoF_4 в области перехода ${}^5\text{F}_5 - {}^5\text{I}_8$ при $T = 80$ К $\lambda_{\text{ex}} = 484$ нм (б).

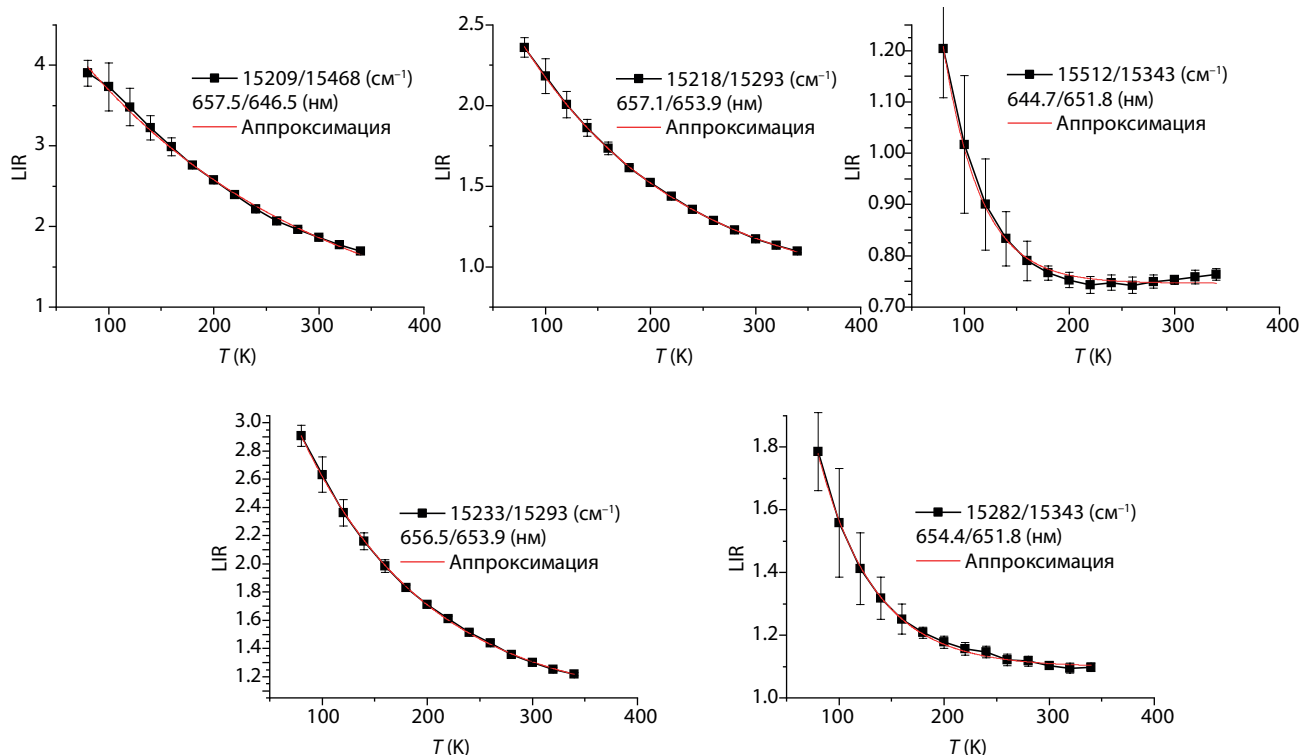


Рис. 5. Зависимость отношения интенсивностей спектральных линий люминесценции, соответствующим различным частотам, указанным на графиках, от температуры образцов субмикронных частиц LiHoF_4 .

$$\delta T = \frac{\delta I}{S_r} \left(\frac{1}{I_1} + \frac{1}{I_2} \right), \quad (7)$$

где отношение $\delta I/I_i$ – является отношением сигнал/шум для измерения спектров при конкретной температуре.

Как следует из результатов расчётов, для реализации наибольшей обнаружительной способности к изменению температуры целесообразно использовать LIR пары пиков люминесценции ионов Ho^{3+} на длинах волн 656.5 и 653.9 нм. В этом случае можно ожидать

уверенную регистрацию изменения температуры порядка ~ 2 К в диапазоне температур образцов от 80 до 180 К. На рис. 7 наглядно отображены зависимости для разных пар пиков.

Существует иной популярный метод в люминесцентной термометрии, позволяющий детектировать нагрев по зависимости времён жизни возбуждённых состояний от температуры [9].

Для выяснения возможности использования подобной методики были исследованы зависимости кинетик люми-

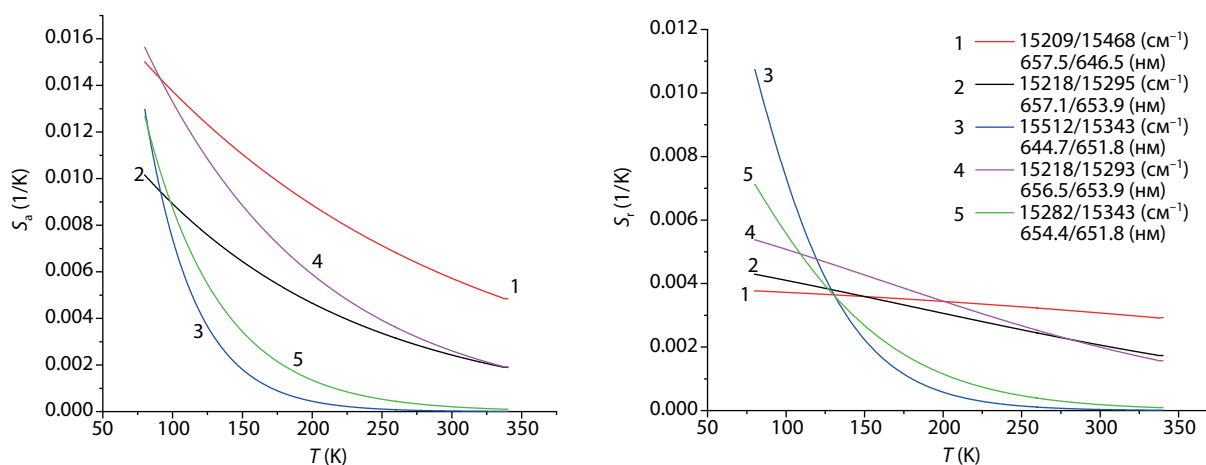


Рис. 6. Температурные зависимости абсолютных $S_a(T)$ и относительных $S_r(T)$ температурных чувствительностей для разных пар линий люминесценции.

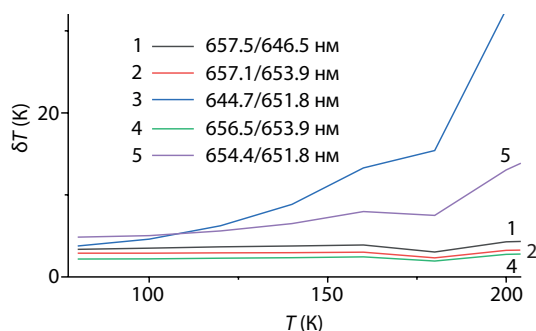
Таблица 1. Оценки минимальной разницы температур микрочастиц LiHoF_4 , которые могут быть зарегистрированы LIR-методикой для различных пар пиков люминесценции, обусловленных $^5\text{F}_5 - ^5\text{I}_8$ переходами ионов Ho^{3+} .

T (К)	δT (К)				
	15209/15468 cm^{-1} 657.5/646.5 нм	15218/15293 cm^{-1} 657.1/653.9 нм	15512/15343 cm^{-1} 644.7/651.8 нм	15233/15293 cm^{-1} 656.5/653.9 нм	15282/15343 cm^{-1} 654.4/651.8 нм
80	3.4	2.9	3.8	2.2	4.9
100	3.5	2.9	4.6	2.2	5.0
120	3.7	2.9	6.2	2.3	5.6
140	3.8	3.0	8.8	2.4	6.5
160	3.9	3.0	13.3	2.5	8.0
180	3.0	2.3	15.4	1.9	7.5
200	4.3	3.2	32.6	2.8	13.1
220	4.5	3.4	—	2.9	17.0
240	4.8	3.5	—	3.2	22.8
260	5.2	3.7	—	3.4	30.5
280	7.0	4.9	—	4.7	—
300	7.6	5.2	—	5.2	—
320	8.4	5.7	—	5.8	—
340	9.3	6.1	—	6.4	—

несценции на длине волны 661 нм в области перехода $^5\text{F}_5 - ^5\text{I}_8$ от температуры, из которых установлено, что люминесцентное время жизни мультиплета $^5\text{F}_5$ уменьшается с ростом температуры образцов. Вид кинетик люминесценции приведён на рис. 8а.

Из рис. 8а следует, что зарегистрированные кинетики люминесценции с высокой точностью имеют экспоненциальный вид, что позволяет аппроксимировать спад люминесценции экспоненциальной функцией (3). Зависимость люминесцентного времени жизни мультиплета $^5\text{F}_5$ от температуры приведена на рис. 8б. Установлено, что люминесцентное время жизни мультиплета $^5\text{F}_5$ почти не изменяется в диапазоне температур 80–130 К и составляет около 40 мкс. Средняя погрешность определения времён жизни составила $\Delta\tau = \pm 2$ мкс.

Наиболее значимым параметром, характеризующим эффективность люминесцентной термометрии по временам жизни возбуждённых состояний, является нормированный коэффициент температурного времени жизни люминесценции:

**Рис. 7.** Зависимости оценок минимальной разницы температур микрочастиц LiHoF_4 δT , которые могут быть зарегистрированы LIR-методикой для различных пар пиков люминесценции, обусловленных $^5\text{F}_5 - ^5\text{I}_8$ переходами ионов Ho^{3+} , от температуры образца.

$$\alpha = \frac{d\tau}{dT}, \quad (8)$$

где τ – люминесцентное время жизни, нормированное на значение при комнатной температуре 25 °С.

Для определения величины искомого параметра осуществлена аппроксимация экспериментальной зависимости времени жизни мультиплета $^5\text{F}_5$ τ от температуры T функцией вида:

$$\tau = \frac{A}{1 - B \exp(-C/T)}, \quad (9)$$

где A , B и C – некие параметры. Далее вычислена производная от функции (6) и получена зависимость α от температуры (рис. 8в).

Как видно из рис. 8в, нормированный коэффициент температурного времени жизни α спадает и возрастает на промежутках от –140 до –40 °С и от –40 до 57 °С соответственно. Тем не менее, исследуемый параметр слабо меняется с температурой, откуда следует, что метод люминесцентной термометрии по времени жизни состояния $^5\text{F}_5$ обладает гораздо худшей температурной чувствительностью по сравнению со способом, связанным с температурным изменением формы спектров люминесценции.

Заключение

В работе произведена оценка применимости кристаллических микрочастиц LiHoF_4 в качестве высокочувствительных температурных сенсоров для люминесцентной термометрии.

Исследованы спектрально-кинетические свойства микрочастиц в зависимости от их температуры. Установлены температурные зависимости интенсивностей

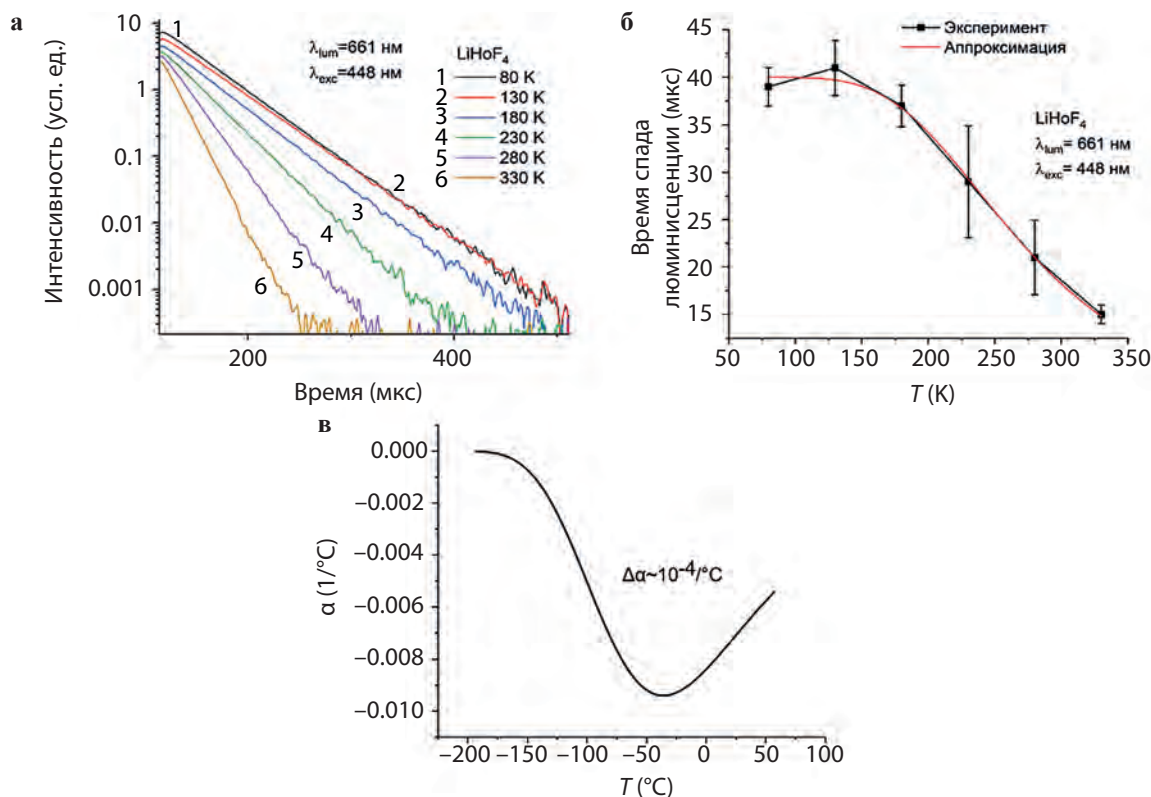


Рис. 8. Кинетики люминесценции при разных температурах на длине волны 661 нм (а), зависимость люминесцентного времени жизни мультиплета 5F_5 от температуры. Параметры наблюдения и результаты аппроксимации приведены в б, зависимость нормированного коэффициента температурного времени спада люминесценции пика на 661 нм от температуры (в).

наблюдаемых пиков в спектре люминесценции и люминесцентного времени жизни мультиплета 5F_5 ионов Ho^{3+} в микрокристаллах LiHoF_4 . Определены относительная и абсолютная термочувствительность температурных сенсоров на основе этих микрочастиц и оценена минимально детектируемая разность температур для пяти наиболее перспективных пар пиков люминесценции.

Наилучшие показатели наблюдались в области температур 80–130 K для пары пиков 656.5 и 653.9 нм. При этом обнаружительная способность сенсора к изменению температуры составила ~ 2 K.

Показана малоприспособность микросенсоров этого типа при использовании способа измерения температуры по кинетике его люминесценции ввиду слабой зависимости нормированного температурного коэффициента времени спада люминесценции от температуры.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения Ho^{3+} -активированных соединений для люминесцентной термометрии, визуализации распределения температуры и для различного рода применений.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников Распределённого коллективного спектро-аналитического Центра изучения строения, состава и свойств веществ и материалов

Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Федерального исследовательского центра “Казанского научного центра Российской академии наук” за проведённые исследования и помощь в обсуждении результатов.

Литература

1. Thomas S., Nguyen T.A., Ahmadi M., Farmani A., Yasin G.: *Nano-sensors for Smart Manufacturing*, p. 623. Elsevier 2021.
2. Swoboda T., Wainstein N., Deshmukh S., Köroğlu C., Gao X., Lanza M., Hilgenkamp H., Pop E., Yalob E., Rojo M. M.: *The Royal Society of Chemistry* **15**, 7139–7146 (2023)
3. Marciniak L., Piotrowski W., Szalkowski M., Kinzhybalov V., Drozd M., Dramicanin M.D., Bednarkiewicz A.: *Chemical Engineering Journal* **427**, 8 (2022)
4. Far L.D., Dramicanin M.D.: *Nanomaterials* **32**, 32 (2023)
5. Romshin A.M., Zeeb V., Glushkov E., Radenovic A., Sinogeikin A.G., Vlasov I.I.: *Scientific Reports* **13**, 8546 (2023)
6. Choe S., Yoon J., Lee M., Oh J., Lee D., Kang H., Lee C.H., Lee D.: *Current Applied Physics* **18**, 1066–1070 (2018)
7. Liu C.F., Leong W.H., Xia K., Feng X., Finkler A., Denisenko A., Wrachtrup J., Li Q., Bao R.: *National Science Review* **8**, 9 (2021)
8. Malits M., Nemirovsky Y.: *Sensors* **17**, 12 (2017)
9. Jaque D., Vetrone F.: *Nanoscale* **4**, 4301–4326 (2012)
10. Dramicanin M.D.: *Methods Appl. Fluoresc.* **4**, 24 (2016)
11. Trejgis K., Ledwa K., Bednarkiewicz A., Marciniak L.: *Royal Society of Chemistry* **4**, 437–446 (2022)
12. Zhou J., del Rosal B., Jaque D.: *Nat Methods* **17**, 967–980 (2020)
13. Behrouzkhia Z., Joveini Z., Keshavarzi B., Eyvazzadeh N., Aghdam R.Z.: *Oman Medical Journal* **31**, 89–97 (2016)

14. Ho C.J.H., Balasundaram G., Driessen W., McLaren R., Wong C.L., Dinish U.S., Attia A.B.E., Ntziachristos V., Olivo M.: *Sci. Rep.* **4**, 481–485 (2014)
15. Gezimati M., Singh G.: *Opt. Quant. Electron.* **55**, 151 (2023)
16. Pudovkin M.S., Zelenikhin P.V., Shtyreva V.V., Evtugyn V.G., Salnikov V.V., Nizamutdinov A.S., Semashko V.V.: *Journal of Nanoparticle Research* **21**, 13 (2019)
17. Pudovkin M.S., Kuznetsov S.V., Proydakova V.Y., Voronov V.V., Semashko V.V.: *Ceramics International* **42**, 9 (2020)
18. Pudovkin M.S., Korableva S.L., Koryakovtseva D.A., Lukinova E.V., Lovchev A.V., Morozov O.A., Semashko V.V.: *Journal of Nanoparticle Research* **21**, 14 (2019)
19. Ryabochkina P.A., Khrushchalina S.A., Yurlov I.A.: *RSC Advance* **10**, 26288–26297 (2020)
20. Semashko V.V.: The 30th International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'23), 18–21 September 2023, Samara, Russia.
21. Pudovkin M.S., Morozov O.A., Pavlov V.V., Korableva S.L., Lukinova E.V., Osin Y.N., Evtugyn V.G., Safiullin R.A., Semashko V.V.: *Journal of Nanomaterials* **21**, 13 (2017)
22. Walsh M., Grew G.W., Barnes N.P.: *Journal of Physics: Condensed Matter* **17**, 7643–7665 (2005)
23. Wang L., Li L., Yuan M., Yang Z., Han K., Wang H., Xu X.: *Nanoscale Research Letters* **17**, 1–12 (2022)

Многофункциональная импульсная программа для получения изображений на специализированном магнитно-резонансном томографе с индукцией поля 0.4 Тл

В. Л. Одиванов, Я. В. Фаттахов, А. Р. Фахрутдинов, В. А. Шагалов, А. Р. Баязитов

Лаборатория методов медицинской физики

Магнитно-резонансная томография является одним из наиболее информативных методов медицинской диагностики. В настоящее время в лаборатории разработан и изготовлен макет магнитно-резонансного томографа ТМР-0.4 на базе постоянного магнита с индукцией поля 0.4 Тл. Для проведения обследований пациентов и научных экспериментов на этой установке разработано программное обеспечение, выполняющее все функции, необходимые при обследовании пациентов во взаимодействии с аппаратурой с получением результатов в виде томографических изображений, численных и графических параметров, их сохранением и визуализацией.

Multifunctional pulse program for obtaining images on a specialized magnetic resonance imaging system with a field induction of 0.4 T

V. L. Odivanov, Ya. V. Fattakhov, A. R. Fakhrutdinov, V. A. Shagalov, A. R. Bayazitov

Laboratory of medical physics

Magnetic resonance imaging is one of the most informative methods of medical diagnostics. Currently, the laboratory has developed and manufactured a model of the TMR-0.4 magnetic resonance imaging system based on a permanent magnet with a field induction of 0.4 T. To conduct patient examinations and scientific experiments on this installation, software has been developed that performs all the functions necessary for examining patients in interaction with the equipment to obtain results in the form of tomographic images, numerical and graphical parameters, their storage and visualization.

Функции программного обеспечения

В составе современных методик МРТ имеется множество методов сканирования, основанных на различных импульсных последовательностях (ИП) воздействий на объект и различных алгоритмах обработки данных измерений. Кроме того постоянно появляются новые методики, которые должны дополнять существующие. В связи с этим программное обеспечение для выполнения сканирования разделено на основное приложение и набор модулей методик сканирования и измерений. Основное приложение выполняет следующие функции:

- предоставление пользовательского интерфейса для выполнения всех функций ПО;
- ведение учёта пациентов, сохранение соответствующей информации;
- выбор и загрузка модулей методик для проведения обследований;
- задание параметров сканирования или измерений для методик;
- выполнение операций сканирования или измерений при взаимодействии с аппаратными средствами томографа и ПО модулей методик;

- графическая визуализация сигналов ЯМР в процессе настройки и сканирования, а также промежуточных результатов обработки;
- визуализация получаемых и полученных изображений в процессе и после окончания сканирования;
- сохранение полученных изображений и результатов измерений с возможностью их последующего просмотра с восстановлением параметров настройки;
- вывод изображений и результатов измерений в различных форматах (DICOM, BMP);
- выполнение интерактивных измерений геометрических и яркостных параметров изображений с результатами в численной и графической форме [1, 2];
- предоставление программных средств и интерфейса для разработки и отладки новых методик сканирования и измерений.

Модули методик выполняются в форме динамически загружаемых библиотек (DLL) с универсальным интерфейсом взаимодействия с основным приложением. Разработка модулей выполняется на языке C++ с использованием специальной библиотеки функций и макросов, обеспечивающих компиляцию кода с формированием управляющих массивов для загрузки в память блоков

томографа. Интерфейс обеспечивает задание параметров методики, а также основные операции в процессе выполнения функций:

- Функция инициализации `void Init()` вызывается однократно при загрузке модуля методики. В ней определяется набор настраиваемых параметров методики, их наименование, тип, начальное значение и диапазон изменения или набор вариантов. Эти параметры визуализируются в соответствующем диалоговом окне приложения в форме элементов управления с возможностью их изменения.
- Функция `void main()` (может иметь другой идентификатор) вызывается после загрузки модуля, а также при запуске операции настройки или сканирования. В ней выполняется вычисление параметров последовательности на основе заданных параметров модуля с контролем их допустимости и приведением к допустимым значениям, компиляция кода с созданием управляющих массивов. После выполнения функции приложение загружает созданные массивы из модуля, передаёт их в спектрометр томографа, а при задании ненулевого значения параметра запуска `fRun` выполняет запуск последовательности на исполнение.
- Функции промежуточной обработки (может быть несколько, до 7) вызываются из приложения при выполнении спектрометром томографа запрограммированных операций, вызывающих прерывания. В этих функциях выполняется загрузка из приложения и предварительная обработка порции измеренных данных. Вызовы в процессе сканирования производятся циклически заданное количество раз для формирования полного массива для получения изображений.
- Функция окончательной обработки `void PostProcessor()` (может называться по-другому) вызывается приложением при завершении цикла сканирования или при его досрочном прерывании. В ней выполняются операции конечной обработки массива данных сканирования для получения изображений. Для визуализации и сохранения изображений вызываются соответствующие функции приложения. Также эта функция может вызываться из функций промежуточной обработки для визуализации улучшающегося изображения одного слоя в процессе сканирования при ненулевом значении `fRun`. В этом случае сохранение изображений не производится.

Импульсная программа для получения изображений

Одной из основных и наиболее часто используемых методик сканирования изображений является методика с использованием ИП “Спиновое эхо”. Преимуществами этой методики является отсутствие повышенных требований к однородности основного поля и возможность

получения изображений с различными задержками эха от импульса возбуждения.

Описываемый модуль методики предназначен для сканирования с получением изображений нескольких слоёв в режиме 2D спинового эха и градиентного эха. Пространственное кодирование выполняется за счёт выделения слоя путём градиентного воздействия во время действия РЧ импульсов с частотой, определяющей смещение слоя, частотно-кодирующего градиента при регистрации сигналов эха и градиентных импульсов с изменением амплитуды с заданным шагом по направлению фазокодирования. В результате сканирования для каждого слоя получается двумерная матрица К-пространства, к которой применяется 2D-преобразование Фурье для получения матрицы изображения слоя.

Выделение слоёв

Возбуждение спин-системы объекта осуществляется РЧ-импульсами заданной длительности с амплитудной модуляцией гауссовой формы, чтобы ограничить спектр воздействия. Операция производится в сопровождении градиентного воздействия в направлении выбора слоёв. При этом частота РЧ-импульса определяет смещение слоя относительно центра поля зрения. В таком случае возбуждаются только спины, находящиеся в данном слое, а другие спины остаются в равновесном состоянии. Это позволяет выполнять сканирование нескольких слоёв объекта без пауз для восстановления равновесной намагниченности, при условии, что шаг между слоями достаточен, чтобы избежать взаимного влияния. Амплитуда градиентного импульса рассчитывается по формуле:

$$SI_{\text{Amp}} = \frac{C_{sl}}{T_h T_{\text{rf}}} K_n ,$$

где $C_{sl} = 10^6$ – эмпирический коэффициент для учёта размерностей параметров и коррекции толщины слоя, T_h – толщина слоя, мм, T_{rf} – длительность РЧ-импульса, мкс, K_n – коэффициент ядра (отношение гиромагнитного отношения протона к заданному ядру). Размерность результата – Гц/см.

Перед включением возбуждающего и инвертирующего РЧ-импульса селективный градиент включается заранее с опережением на время TS_{set} для установления уровня. После завершения возбуждающего РЧ-импульса выполняется дефазирование – компенсация набега фазы за время действия градиентного импульса. Для этого после РЧ-импульса подаётся селективный градиент в течение времени TS_{set} противоположной полярности с амплитудой

$$SA_{\text{deph}} = SI_{\text{Amp}} \frac{T_{\text{rf}}}{2TS_{\text{set}}} .$$

Дефазирование после инвертирующего РЧ-импульса выполняется путём сохранения градиентного воздействия

после РЧ-импульса на время TS_{set} , поскольку при инверсии набег фазы по обе стороны импульса компенсируется.

Сдвиг частоты РЧ-импульса от резонансной настройки в Гц для выбора слоя рассчитывается по формуле:

$$\Delta F = \frac{Sl_{\text{Amp}} Sh}{10K_n},$$

где Sh – смещение слоя от центра поля зрения по селективному направлению в мм.

Частотное кодирование

Для пространственного кодирования вдоль оси Y изображения во время регистрации сигнала спинного эха подаётся градиентный импульс по соответствующему направлению с амплитудой

$$Ro_{\text{Amp}} = \frac{P_{ro}}{FOV_y T_{\text{adc}}} K_n,$$

где $P_{ro} = 10^7$ – эмпирический коэффициент для учёта размерностей параметров и коррекции размера изображения по Y , FOV_y – заданное поле зрения по Y , мм, T_{adc} – период регистрации точек сигнала эха, мкс. Частотно-кодирующий градиент включается за TR_{set} мкс перед началом интервала регистрации эха для установления уровня. Чтобы максимум сигнала эха наблюдался в середине интервала регистрации, выполняется предфазирование путём подачи градиента по направлению частотного кодирования во время действия фазокодирующего градиента. Амплитуда предфазирования рассчитывается так, чтобы в середине интервала регистрации набег фазы был нулевой:

$$RA_{\text{pre}} = Ro_{\text{Amp}} \frac{TR_{\text{set}} + T_{\text{adc}} N_{\text{adc}} / 2}{T_{\text{cod}}},$$

где N_{adc} – количество регистрируемых точек эха, T_{cod} – длительность импульса фазокодирования по X и предфазирования, подаваемых одновременно. Предусмотрено 2 варианта подачи этих импульсов в последовательности “спинное эхо”: сразу после возбуждающего импульса или перед интервалом регистрации эха. Также ИП позволяет выполнять сканирование с использованием импульсной последовательности “градиентное эхо”.

Фазокодирование

В параметрах ИП задаётся поле зрения по X , которое определяет шаг изменения амплитуды фазокодирующего градиента. Для обеспечения максимальной чёткости изображений после обработки шаг изменения градиента должен быть постоянным. При ограниченной разрядности ЦАП градиента постоянство шага обеспечивается искусственно путём коррекции поля зрения. Целочисленный шаг ЦАП:

$$Ph_{\text{Step}} = \frac{P_{\text{ph}}}{T_{\text{cod}} FOV_x} G_{\text{ph}} K_n,$$

где $P_{\text{ph}} = 8.6 \cdot 10^6$ – эмпирический коэффициент для учёта размерностей параметров и коррекции размера изображения по X , G_{ph} – коэффициент преобразования кода ЦАП в величину градиента в Гц/см. Фактический шаг градиента в единицах Гц/см:

$$PhSt_{\text{Amp}} = \frac{iPh_{\text{Step}}}{G_{\text{ph}}},$$

фактическое поле зрения по направлению X в мм:

$$FX = \frac{P_{\text{ph}}}{T_{\text{cod}} PhSt_{\text{Amp}}} K_n.$$

В ИП выбирается проекция изображений относительно осей поля зрения томографа, что определяет соответствие между X - и Y -осями изображения и X -, Y - и Z -осями поля зрения установки. Ось X поля зрения расположена горизонтально перпендикулярно вектору основного поля, ось Y – вертикально сверху вниз, Z – в направлении вектора поля.

При трансаксиальной (TRX) проекции плоскость изображения перпендикулярна оси X , частотно-кодирующий градиент направлен вдоль оси Y , фазокодирующий – вдоль Z , селективный по X .

При корональной (COR) проекции плоскость изображения перпендикулярна Y , частотно-кодирующий градиент по X , фазокодирующий – по Z , селективный по Y .

Аппаратные и программные средства установки позволяют также получать изображения наклонных слоёв относительно выбранной проекции за счёт векторного сложения пары градиентов.

Диаграммы вариантов последовательностей

На рис. 1–3 представлены диаграммы основных импульсных последовательностей.

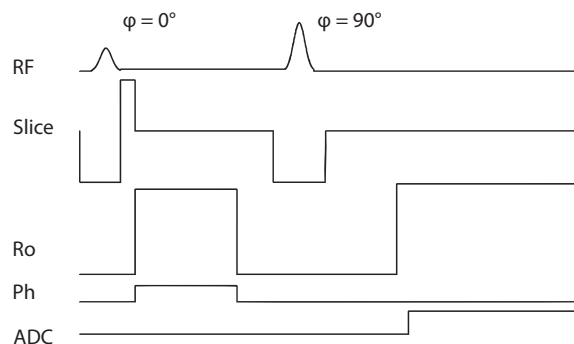


Рис. 1. Цикл последовательности “2D спинное эхо” в режиме фазокодирования и предфазирования после возбуждения. Slice – селективный градиент, Ph – фазокодирующий, Ro – частотно-кодирующий, RF – модуляция РЧ, ADC – окно регистрации эха, ϕ – фаза РЧ-импульса.

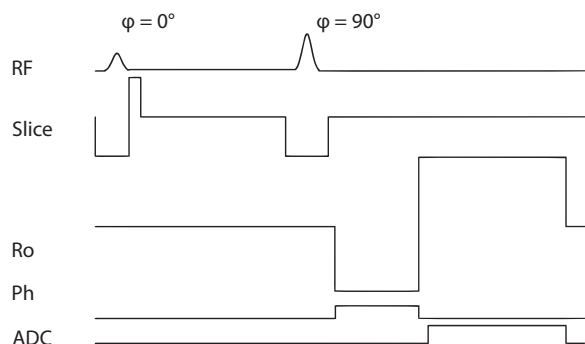


Рис. 2. Цикл последовательности “2D спиновое эхо” в режиме фазокодирования и предфазирования перед регистрацией эха. Обозначения см. рис. 1.

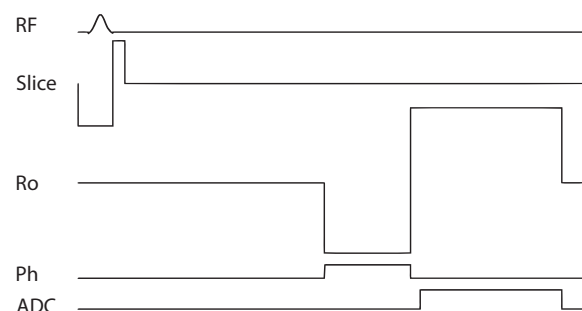


Рис. 3. Цикл последовательности “2D градиентное эхо”. Обозначения см. рис. 1.

Мультиэхо

ИП предусматривает возможность получения нескольких изображений в каждом слое с различными параметрами контрастирования. Для этого в одном цикле возбуждения могут регистрироваться несколько (1, 3, 5, 7, 9) сигналов спинного эха по принципу последовательности Карра-Парселла (рис. 4).

В последовательности “спиновое эхо” с кодированием после возбуждающего РЧ-импульса градиентные импульсы фазокодирования и предфазирования подаются после возбуждающего, причём вторая половина частот-

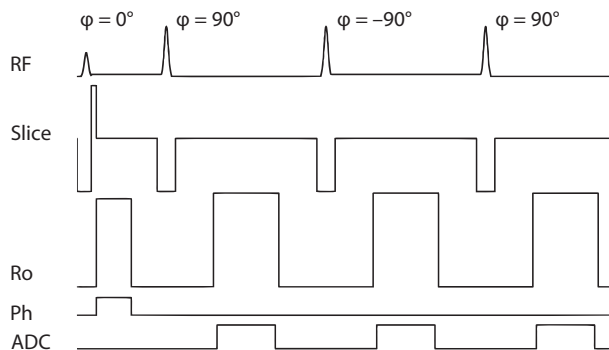


Рис. 4. Режим спиновое мультиэхо с 3 сигналами. Фазокодирование и предфазирование после возбуждения. Обозначения см. рис. 1.

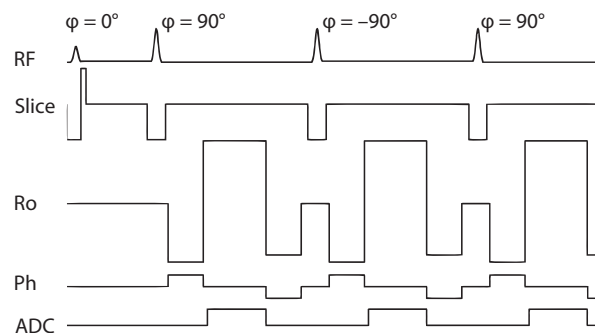


Рис. 5. Режим спиновое мультиэхо. Фазокодирование перед интервалом регистрации. Обозначения см. рис. 1.

но-кодирующего градиента в интервале регистрации эха выполняет функцию предфазирования для следующего сигнала эха, а для компенсации действия градиента в течении времени установления TR_{set} такое же время градиент сохраняется после интервала регистрации.

В режиме кодирования перед интервалом регистрации кодирующие и предфазировующий градиенты подаются перед регистрацией эха, а после него кодирующие градиенты подаются в обратной полярности для дефазирования в соответствующих направлениях (рис. 5).

Восстановление намагниченности

При исследовании объектов с длинным временем T_1 между циклами возбуждения и регистрации сигналов требуются длительные паузы для установления равновесной намагниченности спин-системы. Режим восстановления намагниченности позволяет сократить эти паузы за счёт искусственного восстановления исходного вектора намагниченности. Это достигается путём подачи двух РЧ-импульсов и градиентных воздействий в конце цикла.

В режиме кодирования после возбуждающего импульса после регистрации последнего сигнала эха подаётся инвертирующий РЧ-импульс, после которого выполняется дефазирование спин-системы градиентными импульсами с полярностью, противоположной кодирующим импуль-

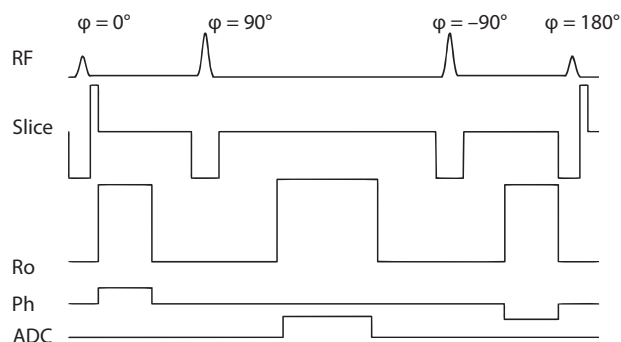


Рис. 6. Цикл с восстановлением намагниченности. Фазокодирование после возбуждения. Обозначения см. рис. 1.

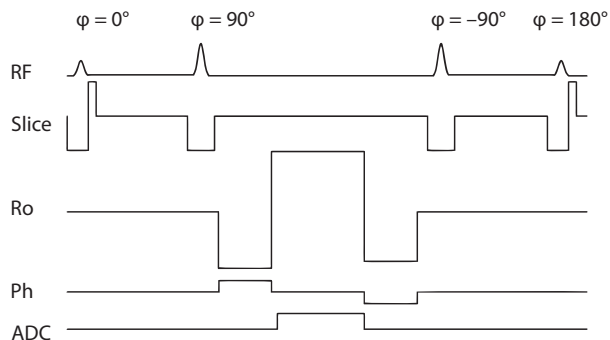


Рис. 7. Цикл с восстановлением намагниченности. Фазокодирование перед регистрацией эха. Обозначения см. рис. 1.

сам. После этого вектор намагниченности возвращается и исходное положение 90-градусным импульсом с фазой, противоположной возбуждающему (рис. 6).

В другом режиме кодирования дефазирование выполняется после каждой регистрации сигнала эха, поэтому между восстанавливающими 180- и 90-градусными импульсами градиенты не подаются (рис. 7).

При расчёте амплитуд градиентов в соответствии с выбранными параметрами ИП могут получиться амплитуды, превышающие максимально допустимые, которые составляют ± 4000 Гц/см. В этом случае заданные параметры программы могут быть автоматически скорректированы, чтобы уложиться в допустимый диапазон. В частности, такими параметрами могут быть шаг АЦП, толщина слоёв, длительность кодирующих импульсов, количество шагов фазокодирования.

Функции запуска и промежуточной обработки данных модуля разработаны с возможностью симуляции работы спектрометра при сканировании объекта заданной формы в виде параллелепипеда определённых размеров. Сигналы эха вычисляются по модели вместо получения их из спектрометра при отсутствии связи с ним. В этом случае операции запуска и промежуточной обработки вызываются при значении параметра $f_{\text{Run}} = 2$. Такая симуляция позволяет отладить функции обработки данных.

Параметры ИП

Модуль ИП 2D MULTIECHO SE GE выполнен в форме динамически загружаемой библиотеки multi_SGE.pdl, исходный код на языке C++ в файле multi_SGE.ppr. Настраиваемые параметры ИП:

1. “Сечение” – выбор проекции слоёв из сагиттальной SAG (по-умолчанию), трансаксиальной TRX, корональной COR.
2. “Поле зр. X, мм”; “Поле зр. Y, мм” – задаваемые размеры изображения. При пересчёте фактическое поле зрения по X может быть больше.
3. “Слой, мм” – толщина слоя. Определяет амплитуду селективного градиента во время РЧ-импульсов. При нуле – полный слой, градиент не подаётся.

4. “Пер. АЦП, мкс” – задаваемый период отсчётов сигнала эха, может быть увеличен при пересчёте.
5. “Точек АЦП” – количество точек регистрации эха. При обработке это количество расширяется нулями в обе стороны до величины, кратной степени 2.
6. “Параметры” – позволяет быстро установить базовые временные параметры ИП для выбранного режима контрастирования (T_1 (по-умолчанию), T_2 , спиновая плотность).
7. “TR (мс)”, “TE (мс)” – задают базовые параметры ИП, могут быть изменены при пересчёте.
8. “РЧ имп., мкс” – длительность радиочастотных импульсов ИП гауссовой формы.
9. “Мульти N” – количество регистрируемых сигналов эха в цикле для каждого слоя: от 1 (по умолчанию) до 9.
10. “Восстановление” – позволяет включить или выключить (по-умолчанию) режим восстановления намагниченности спин-системы, т. е. дополнительные РЧ- и градиентные импульсы в конце цикла для приведения спин-системы в состояние, близкое к исходному.
11. “Число строк” – количество циклов фазокодирования, определяющее разрешение изображения по X. При обработке это количество расширяется нулями в обе стороны до величины, кратной степени 2.
12. “Накоплений” – количество накоплений сигнала эха для каждого шага фазокодирования, кратно 2. Накопления выполняются с изменением фазы возбуждающих РЧ-импульсов: 4 фазы, если количество накоплений кратно 4, иначе – 2 фазы.
13. “Режим” – выбор режима запуска: Настройка эха (по-умолчанию), Настройка поля, Съёмка.
14. “Показывать” – включает (по умолчанию) режим демонстрации промежуточных результатов обработки по мере накопления массива фазокодирования. Начинается после 16 циклов фазокодирования и повторяется после каждых 4 циклов.
15. “Результат” – выбор формата сохранения данных изображений: вещественный (по-умолчанию) или комплексный.
16. “Предфазирование” – выбор расположения фазокодирующих и предфазированных градиентных импульсов в последовательности “спиновое эхо”: после возбуждающего РЧ-импульса (по умолчанию), перед и после регистрации сигнала эха, а также выбор последовательности “градиентное эхо”.
17. “Фазокодирование” – выбор порядка прохождения фазокодирования: последовательно (от минимума к максимуму); увеличение $\pm$ от нуля (по умолчанию); сбалансированный (чередование максимальной и минимальной амплитуд градиента для равномерного нагрева элементов схем градиентных усилителей).
18. “RF90A”, “RF180A” – амплитуды 90- и 180-градусных РЧ-импульсов. Могут заполняться в автоматически при выборе датчика в приложении.
19. “TPh, мкс” – длительность градиентных импульсов фазокодирования и предфазирования (в формулах – T_{cod}).

При пересчёте может изменяться при выходе амплитуд градиентов за допустимые пределы.

20. “TSset, мкс”, “TRset, мкс”, – время предустановки селективного и считывающего градиентных импульсов перед активным интервалом для установки градиентов и после него для дефазирования.

В режиме показа графиков результатов в режимах сканирования и настройки эха показывается результат накопления сигналов эха.

При сканировании для каждого слоя заполняется двумерная матрица К-пространства, которая при обработке подвергается 2D Фурье-преобразованию для получения матрицы изображения слоя. Полученные изображения слоёв сохраняются в отдельных файлах в списке изображений пациента. Разрешение изображений в пикселах по X и Y определяются ближайшими величинами в сторону увеличения до степени 2 заданных параметров количества строк и количества точек АЦП соответственно, но физическое разрешение изображения будет определяться фактическим значением параметров. При прерывании сканирования после получения минимум 16 строк фазокодирования изображения формируются исходя из текущего количества строк, т. е. с меньшим фактическим разрешением по X .

Заключение

Разработана многофункциональная импульсная программа для получения изображений на специализированном магнитно-резонансном томографе с индукцией поля 0.4 Тл. Данная программа позволяет проводить как обследования пациентов, так и научные эксперименты. Представленное ПО выполняет функции, необходимые при обследовании пациентов с получением результатов в виде томографических изображений, численных и графических параметров, их сохранением и визуализацией.

Литература

1. Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А.: Вычисление профиля яркости пикселей томографического изображения вдоль выделенного прямоугольника. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ от 16.12.2022 г. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Федеральный исследовательский центр “Казанский научный центр Российской академии наук”.
2. Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А.: Вычисление средней яркости пикселей томографического изображения в пределах выделенного контура. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ от 16.12.2022 г. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Федеральный исследовательский центр “Казанский научный центр Российской академии наук”.

Синтез непланарных углеродных нанотрубных структур на поверхности никеля методом CVD

Е. Ф. Куковицкий, С. Г. Львов, В. А. Шустов

Лаборатория физики углеродных наноструктур и композитных систем

На примере металлического никеля экспериментально показана возможность синтеза методом CVD периодических углеродных нанотрубных (УНТ) структур без нанесения дополнительного катализатора на поверхность металлов каталитически активных в процессах пиролиза углеводородов. Структурирование поверхности никелевых подложек выполнено формированием поверхностного рельефа методом пластической поверхностной деформации с помощью шаблона. С использованием методов пассивации-активации различных участков поверхности никелевых подложек селективный рост УНТ реализован таким образом, что плоскость участков с УНТ ($\sim 500 \times 500$ мкм²) не совпадает с плоскостью несущей подложки. Полученные структуры субмиллиметрового масштаба являются фактически непланарными структурами.

CVD synthesis of non-planar carbon nanotube structures on a nickel surface

E. F. Kukovitsky, S. G. Lvov, V. A. Shustov

Laboratory of carbon nanostuctures physics and composite systems

Using the example of metallic nickel, the possibility of CVD synthesis of periodic carbon nanotube (CNT) structures without applying an additional catalyst to the surface of metals, that are catalytically active in the pyrolysis of hydrocarbons, has been experimentally demonstrated. Surface structuring of nickel substrates was implemented with use of surface relief forming by plastic surface deformation with patterning. Using passivation-activation methods for various surface areas of nickel substrates, the selective growth of CNTs is implemented in such a way that the plane of the CNT sections ($\sim 500 \times 500$ μm^2) does not coincide with the plane of the supporting substrate. The resulting submillimeter-scale structures are actually non-planar structures.

Введение

Одним из важных требований для практических приложений углеродных нанотруб (УНТ) является возможность их контролируемого роста на различных подложках. В частности, некоторые приложения УНТ требуют селективного роста нанотрубок на подложках со специфичным узором нанесения катализатора по поверхности. К настоящему времени развиты различные методы нанесения катализатора, ориентированные на кремниевые технологии получения электронных устройств. В соответствии с используемыми в литографии терминами, все существующие стратегии по нанесению катализатора и изменению свойств заданной области поверхности можно разделить на два типа: масочные и безмасочные. В масочных методах изменение поверхностных свойств достигается путём воздействия на поверхность через шаблоны, в то время как в безмасочных методах шаблоны отсутствуют. Среди масочных способов можно отметить фотолитографию, микроконтактную печать, использование металлических шаблонов. Примеры безмасочных методов: струйная печать, электроннолучевая литография, зондовая литография.

В случае выращивания УНТ на подложках упомянутые приёмы нанесения катализатора и структурирования поверхности пригодны для любого материала подложек. Для некоторых практических приложений необходимо использование металлических электродов с выращенным слоем УНТ. Такие слои могут быть получены непосредственно на поверхности металла без применения внешнего катализатора, если использовать для изготовления электропроводных подложек переходные металлы Fe, Co, Ni или их сплавы. Эти металлы обладают высокой каталитической активностью в высокотемпературных реакциях разложения углеводородов с выделением элементарного углерода на поверхности. В основе роста УНТ непосредственно на поверхности каталитически активного металла лежит разрушение его поверхностного слоя при нагреве в присутствии углеводородов (metal dusting). Процесс фактически является высокотемпературной коррозией металла в углеводородной атмосфере. Такая коррозия является крайне нежелательным явлением в различных промышленных процессах переработки углеводородного сырья и множество исследований проведено по её изучению и разработке методов защиты. В то же время контролируемая коррозия и оптимизация

условий её протекания позволяют реализовать своеобразный процесс CVD (Chemical Vapor Deposition) для выращивания УНТ. Процесс начинается с разложения углеводородов на поверхности металла-катализатора при высокой температуре (300–500 °C) и осаждения на ней слабографитизированного элементарного углерода. Углерод растворяется в поверхностном слое металла до достижения насыщения, после чего твёрдый раствор начинает распадаться с выделением частиц графита. Из-за разности удельных объёмов металла и графита в поверхностном слое возникают значительные напряжения, приводящие к фрагментации металла и образованию нанокompозита, состоящего из наночастиц графита и наночастиц металла, насыщенных углеродом (рис. 1) [1]. Металлические наночастицы инициируют рост УНТ от основания, поскольку они погружены в слой композита и достаточно прочно связаны с ним. Выращивание УНТ непосредственно на поверхности каталитически активных металлов имеет ряд преимуществ перед использованием нанесённого катализатора:

- устраняется утомительная и времязатратная процедура нанесения катализатора;
- в силу особенностей механизма роста УНТ на массивном металле обеспечивается отличная адгезия нанотрубного слоя к металлической подложке и отсутствуют металлические наночастицы на вершинах УНТ;
- обеспечиваются хорошая электропроводность подложки и малое электросопротивление на интерфейсе металл-УНТ;
- пластические свойства металлов значительно расширяют спектр методов модификации и структурирования поверхности и позволяют создавать электроды различных форм и конфигураций;
- использование металлов обеспечивает хорошую совместимость с технологиями современной вакуумной

эмиссионной электроники (например, керны оксидных термоионных катодов изготавливаются из никеля).

УНТ структуры, полученные на поверхности каталитически активных металлов, могут найти применение в качестве сенсоров различных электрохимических устройств, в конденсаторах с двойным электрическим слоем, в устройствах, использующих полевую эмиссию. Практическая реализация таких устройств подразумевает разработку методик селективного роста УНТ на поверхностях металлических электродов разной конфигурации. Поскольку в данном случае отсутствует нанесённый катализатор, структурирование поверхности металла-катализатора можно провести какими-либо методами активации-пассивации отдельных участков поверхности, формируемых с помощью известных масочных и безмасочных методик. Кроме того, пластические свойства металлов дают возможность сравнительно легко структурировать поверхность путём создания поверхностного рельефа с использованием шаблонов. Цель настоящей работы состоит в экспериментальной демонстрации возможности получения УНТ структур субмиллиметрового масштаба методом CVD на рельефных подложках металлического никеля.

Эксперимент и результаты

Нанотрубки выращивались на никелевых подложках в вертикальном CVD-реакторе закрытого типа при давлении несущего газа (гелий) 1.5–2.0 атм. Гранулированный полиэтилен был использован в качестве углеводородного прекурсора. Детальное описание реактора, конфигурации размещения подложек и процедуры выращивания изложены в работе [2]. Применялись квадратные подложки 10×10 мм² из никелевой фольги марки НПЗ толщиной 0.3 мм. Никель марки НПЗ содержит среди прочих примеси серы (0.015%) и углерода (0.15%) по массе [3]. Подложки подвергались тонкой механической

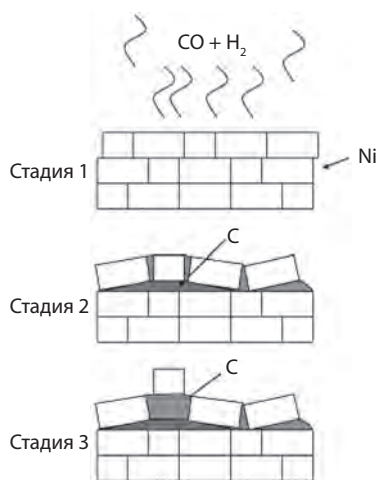


Рис. 1. Схематический процесс фрагментации поверхностных слоёв металлического никеля при насыщении углеродом

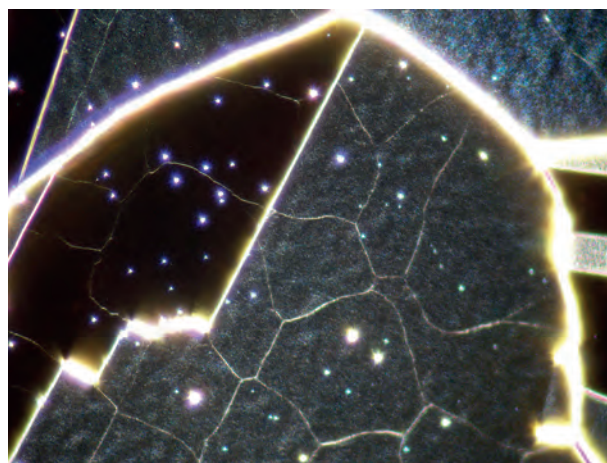


Рис. 2. Микроснимок плёнки оксида никеля, выращенной на поверхности никеля. Видны межзёрненные границы никеля, уширенные рефракцией света в плёнке, и трещины в ней.

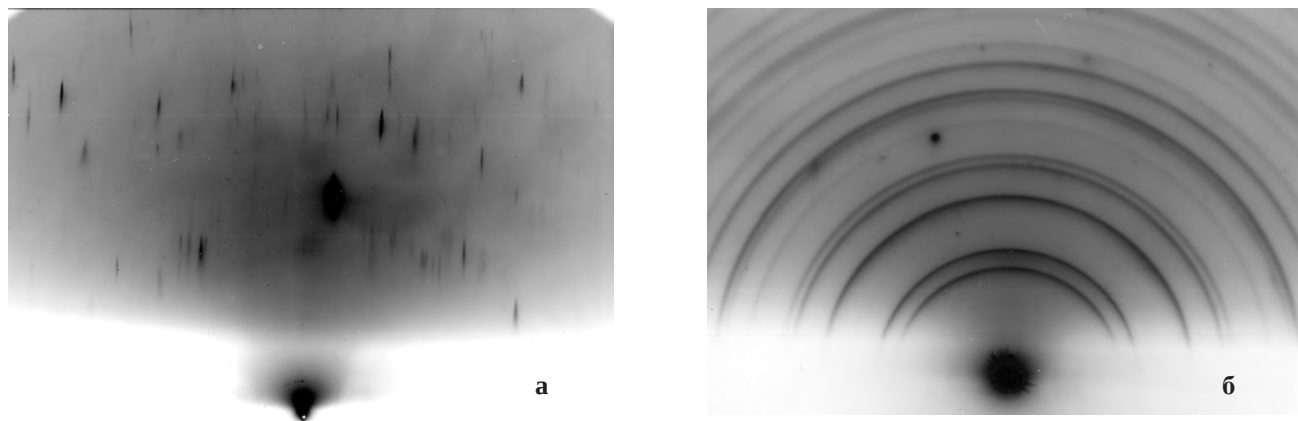


Рис. 3. а Электронная дифракция плёнки оксида никеля, выращенной на поверхности никеля. “Точечная дифракция” свидетельствует о монокристалличности плёнки. б Электронная дифракция поликристаллической плёнки оксида никеля.

шлифовке на абразивной бумаге P1200 для устранения следов прокатки исходной фольги и затем химически полировались. Полированные подложки отжигались в вакууме для восстановления пластичности. После отжига на пластичные подложки накладывалась никелевая сетка с ячейкой ~ 500 мкм и такая сборка прессовалась либо на основе из закалённой стали, либо на основе из отожжённой меди. Таким способом были сформированы на подложках никеля два различных типа периодического поверхностного рельефа. Для защиты от контакта с углеводородной атмосферой на рельефных подложках выращивались пассивирующие крупнокристаллические плёнки оксида никеля. Они были получены путём отжига подложек в техническом вакууме ($\sim 10^{-5}$ мм. рт. ст.) при температуре 1200°C . Наличие плёнки обнаруживается при микроскопическом исследовании: межзёрненные границы из-за рефракции света выглядят размытыми и разложенными в спектр. При неосторожном обращении на плёнке появляются трещины (рис. 2). На рис. 3 приведены снимки электронной дифракции от поверхности плёнки на поверхности приготовленных подложек и (для сравнения) от поликристаллической плёнки окиси никеля.

Оже-спектр выращенной плёнки (рис. 4) обнаруживает присутствие атомов никеля, кислорода и аморфного углерода. Присутствие на поверхности углерода не удивительно, так как синтез плёнок проходил в остаточной атмосфере, содержащей пары вакуумного масла. При отжиге подложек в условиях сверхвысокого вакуума (не хуже $\sim 10^{-10}$ мм. рт. ст.) при температуре 500°C оксид никеля диссоциирует и Оже-спектр фиксирует только никель и содержащиеся в нём примесные серу и следы углерода, которые при прогреве сегрегируют на поверхность. Для активации отдельных областей поверхность подложек подвергалась осторожной механической полировке алмазной пастой. Активация при этом осуществляется только на выступающих частях поверхности. Такая процедура обеспечивает удаление пассивирующей плёнки, задаёт начальную механическую фрагментацию поверхностных слоёв металла и переводит их в наноструктурное состояние в результате интенсивной пластической деформации [4]. На поверхности никеля при этом возникают многочисленные области с растягивающим остаточным напряжением, а также наночастицы оксида, которые являются активными центрами для каталитического разложения

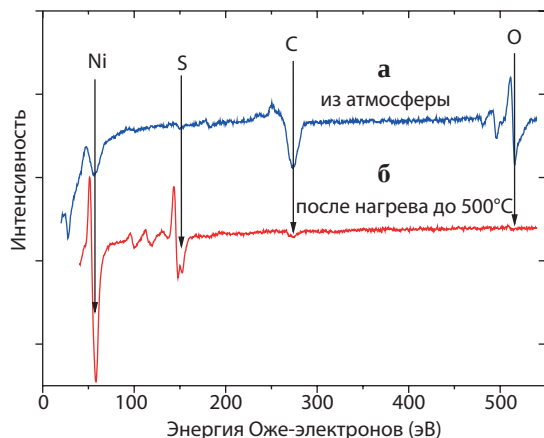


Рис. 4. Оже-спектр поверхности никеля с плёнкой оксида (а) и без плёнки (б).

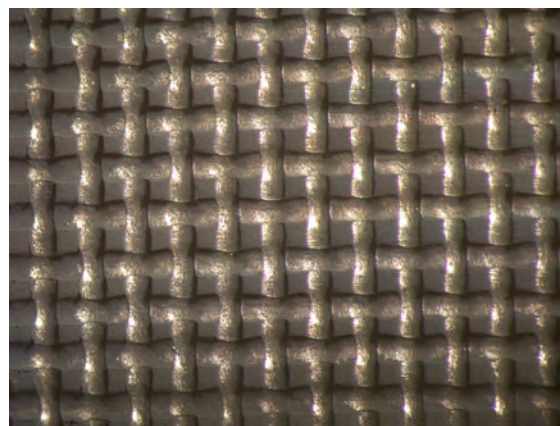


Рис. 5. Периодическая УНТ структура №1. Чёрные квадраты (области с УНТ) находятся выше светлых областей окисленного никеля.

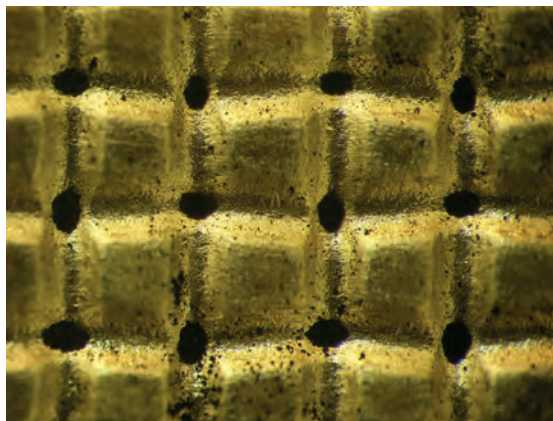


Рис. 6. Периодическая УНТ структура №2. Чёрные овалы (области с УНТ) находятся выше светлых областей окисленного никеля.

молекул углеводородов. Кроме того, развитая система межзёренных границ в наноструктурном материале способствует быстрой диффузии осаждённого на поверхности углерода внутрь металла и быстрой фрагментации его поверхностного слоя. После процесса CVD на рельефных подложках образуется периодическая структура из пятен с селективно выращенными углеродными нанотрубками. На рис. 5 и 6 приведены микрофотографии структур для подложек, полученных прессованием на поверхности стали (структура №1) и меди (структура №2) соответственно. Полученные таким образом периодические структуры являются структурами субмиллиметрового масштаба ($\sim 500 \times 500$ мкм²), который задаётся размером ячейки сетки (шаблона), использованной для пластической деформации поверхности металлического никеля.

Выводы

Настоящая работа показывает, что поверхностные УНТ структуры могут быть получены методом CVD на поверхности металлов каталитически активных в реакциях разложения углеродсодержащих газов без трудоёмкой процедуры подготовки катализатора. Пластической деформацией металла с помощью шаблонов может быть легко создан периодический поверхностный рельеф. Необходимая для роста УНТ модификация отдельных областей рельефных поверхностей достигается использованием простых методов пассивации-активации. Структуры УНТ,

синтезированные методом CVD на рельефных подложках, фактически являются непланарными структурами. Периодически расположенные площадки с нанотрубками находятся вне плоскости несущей подложки. Такая конфигурация удобна, например, в экспериментах по изучению эмиссионных характеристик нанотрубок, поскольку нет вклада соседних участков в эмиссионный ток. Очевидно, что для продвижения таких УНТ структур в область микронных размеров потребуются использование современных методов структуризации и модификации поверхности металлов-катализаторов: лазерного излучения (лазерная гравировка), сфокусированных пучков энергетических частиц, имплантации ионов высокой энергии и т. п. Подобные УНТ-структуры смогут найти применение в качестве различных сенсоров и в слаботочных устройствах вакуумной эмиссионной электроники.

Более подробно данное исследование приведено в работе [5].

Литература

1. Zeng Z., Natesan K.: Chem. Mater. **15**, 872–878 (2003)
2. Kukovitsky E.F., Lvov S.G.: ECS Journal of Solid State Science and Technology **2**(1), M1–M8 (2013)
3. Свойства элементов. Справочник. Москва: “Металлургия” 1985.
4. Kukovitsky E.F., Lvov S.G., Sainov N.A., Shustov V.A.: Applied Surf. Sci. **215**, 201–208 (2003)
5. Куковицкий Е.Ф., Львов С.Г., Шустов В.А., Файзрахманов И.А.: ФММ **126**, № 6 (2025) (в печати).

ABSTRACTS

Isolation of single upconversion luminescent nanoparticles on a surface by precise micromanipulation in a scanning probe microscope

A. P. Chuklanov, V. V. Nikulina, Ye. O. Mityushkin, N. M. Lyadov, L. A. Nurtdinova, D. K. Zharkov, A. V. Leontyev, V. G. Nikiforov, N. I. Nurgazizov

In this work, an approach has been developed and implemented that allows manipulation of upconversion microparticles deposited on the substrate surface. An algorithm for cleaning the substrate surface with upconversion microparticles with an area of about $100 \times 100 \text{ } \mu\text{m}^2$, moving individual microparticles over distances up to fractions of a micrometer, and controlled transfer of relatively small conglomerates of microparticles to a macroscopically clean surface has been implemented. The proposed method allows for guaranteed registration of the upconversion luminescent response from a specific single object in an optical confocal microscope.

PAGE 24

Ion synthesis of Ag nanoparticles in GaAs matrix

A. L. Stepanov, D. A. Kononov, A. M. Rogov, V. F. Valeev, V. I. Nuzhdin

A technique for creating a plasmonic composite material based on GaAs containing Ag nanoparticles using ion implantation is demonstrated. A novel material obtained is presented as a demonstration example using the following process conditions: thin GaAs layers were irradiated by Ag^+ ions with an energy of $E = 30 \text{ keV}$ at a current density of $J = 5 \text{ } \mu\text{A}/\text{cm}^2$ and a dose of $D = 6.2 \cdot 10^{16} \text{ ion}/\text{cm}^2$. The formed sample was analyzed using scanning electron microscopy and optical reflectance spectroscopy. The experimental reflectance spectra were compared with optical extinction data which were calculated within the electromagnetic Mie theory. It was found that during ion implantation, Ag nanoparticles with sizes from 5 to 40 nm demonstrating the effects of plasmon resonance were synthesized in the GaAs layer.

PAGE 30

Laser heating and crystallization of nanoporous germanium layers formed by silver ion implantation, arising from excitation of Raman scattering

A. L. Stepanov, D. A. Kononov, A. M. Rogov, V. F. Valeev, V. I. Nuzhdin, A. V. Pavlikov, A. M. Sharafutdinova

Thin amorphous nanoporous PGe layers consisting of nanowires were formed by low-energy (30 keV) implantation with Ag^+ ions into a crystalline c-Ge substrate at different irradiation doses of $7.4 \cdot 10^{16} - 1.3 \cdot 10^{17} \text{ ion}/\text{cm}^2$. With increasing dose, the rise in the average value of the nanowire diameters from 29 to 36 nm was observed. The obtained PGe layers were studied by the Raman spectroscopy using exciting He-Ne and Ag lasers emitting at wavelengths of 633 and 488 nm respectively. It was shown that laser interaction with the implanted amorphous layers leads to their local heating and partial crystallization. The crystallization thresholds were established, which amounted to $3 \text{ kW}/\text{cm}^2$ for the He-Ne laser and $1 \text{ kW}/\text{cm}^2$ for the Ag laser. The relationship between the crystallization threshold values and the light penetration depth in Ge at different wavelengths is discussed. The fraction of crystalline volume in implanted layers is determined, which reached a maximum value of 6–7% at the most intense laser exposure.

PAGE 34

The effect of a magnetic field on the electric polarization of small ferromagnetic cylindrical particles

T. S. Shaposhnikova, R. F. Mamin

The occurrence of an inhomogeneous magnetic state and the associated appearance of inhomogeneous electric polarization in the volume of small cylindrical magnetic particles in the absence of an external magnetic field has been theoretically studied. All calculations are performed within the phenomenological approach. The microscopic mechanism of the relationship between magnetization and polarization is due to the spin-orbit interaction. The specific type of magnetization and polarization is determined by the shape and size of the particles. A vortex state in the form of three-dimensional magnetic vortices occurs only for cylindrical particles whose radius is greater than a certain critical value, and a homogeneous magnetic state occurs for particles with a smaller radius. It is shown that inhomogeneous electric polarization appears in the vortex state. The vectors of local polarization are directed towards the axis of the cylindrical particle. The area of existence of such inhomogeneous states is determined. A change in the local electric polarization of small cylindrical magnetic particles is considered when a small external magnetic field is applied. The results are obtained for long cylindrical particles in the approximation of weak magnetic field. An expression for the magnetoelectric susceptibility of cylindrical particles in a weak external magnetic field is obtained.

PAGE 40

A new approach to reach Bose-Einstein condensate

K. M. Salikhov

It is shown that under conditions of exchange narrowing of the EPR spectra of dilute solutions of paramagnetic particles, conditions are created and Bose-Einstein condensation of quasiparticles can occur. These quasiparticles are elementary excitations of collective modes of spin motion of unpaired electrons of paramagnetic particles. These collective modes are formed due to the effect of the transfer of spin coherence from the collision partner (the "recoil effect") as a result of the Heisenberg exchange interaction between particles during a random collision. It is shown that elementary excitations (quasiparticles) associated with these collective modes are bosons. Thus, under the conditions of electron paramagnetic resonance spectroscopy experiments, a mixture of Bose gases is created. As the rate of spin coherence transfer increases, the spectrum collapses into a narrow, uniformly widened line (the effect of exchange narrowing of the spectrum), and the microwave field pumps quasiparticles of only one of the collective modes. And this creates the prerequisites for the Bose-Einstein condensation of identical quasiparticles.

PAGE 45

EPR study of nitric oxide content in the spinal cord of rats seven days after combined brain and spinal cord injury

V. V. Andrianov, L. V. Bazan, A. I. Arslanov, Kh. L. Gainutdinov

EPR spectroscopy showed that seven days after combined brain and spinal cord injury, NO production in the spinal cord significantly decreased by 60% in the region located rostral to the area with the injury focus. While in the injured area (in the injury site) of the spinal cord and in the spinal cord caudal to the injury, NO production changes unreliably with a tendency to decrease.

PAGE 51

Features of the application of a Gaussian pulse for measuring the phase relaxation time in a multi-pulse sequence

R. B. Zaripov, I. T. Khairutdinov

The simulation of spin echo signals from a sequence of five Gaussian pulses was performed. The delays between the pulses were selected so as to isolate the moments of time of formation of the primary spin echo and its refocused signals from all other echo signals. This makes it easier to find the phase relaxation time T_2 in the experiment based on the decay of the amplitude of the refocused echo signals, since their relaxation process depends only on time T_2 . The effective rotation angles of the Gaussian pulse were obtained by numerical approximation by analogy with the rotation angle of a non-selective pulse depending on the microwave field amplitude.

PAGE 55

Magnetic properties of $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$

I. V. Yatsyk, R. M. Eremina, R. F. Likero, R. G. Batulin

The magnetic resonance spectra of ceramics $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$ have been measured in a wide temperature range. At temperatures below 250 K in $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$ a change in the shape of the magnetic resonance spectrum line is observed; with a further decrease in temperature, the line is divided into three, which indicates a phase separation in the sample. The temperatures of phase transitions to an ordered state in spin subsystems at 197 and 165 K are determined from the temperature at which the maximum in the temperature dependence of the inverse integral intensity of the signals is observed. The values of the Curie-Weiss temperature $\theta = -764$ K and the effective magnetic moment equal to $5.38\mu_B$ were determined from the temperature dependence of the susceptibility, which indicates the antiferromagnetic nature of the exchange interactions between cobalt ions with spin 5/2 and 3/2.

PAGE 59

Heptanuclear Fe(II)–Fe(III) complex as a multifunctional magnetic material

A. R. Sharipova, E. E. Batueva, E. N. Frolova, L. V. Bazan, O. A. Turanova

Magnetic properties and proton relaxation of the heptanuclear mixed-valence $[\text{Fe}(\text{II})(\text{CN})_6\{\text{Fe}(\text{III})(\text{L})\}_6](\text{SCN})_2$ complex, where L is the dianion of N,N'-bis[(2-hydroxyphenyl)methylene]-4-azaheptane-1,7-diamine, have been studied. Spin-crossover properties have been discovered. The dependence of the relaxation rate on concentration is studied, and the relaxivity of the compound is calculated.

PAGE 63

Self-assembly of cyclic dipeptides based on alanine and phenylalanine in thin films as by AFM

A. S. Morozova, E. O. Kudryavtseva, A. A. Kamaletdinova, S. A. Ziganshina, M. A. Ziganshin, A. A. Bukharaev

The process of self-assembly of cyclic dipeptides based on phenylalanine and alanine with the formation of crystal structures is investigated.

PAGE 66

Optimization methods for combining quantum memory systems on optical resonators

N. S. Perminov, S. A. Moiseev

A scheme for connecting two quantum memory cells on high-quality optical microresonators through central buffer resonators using a controlled switch is proposed. The spectrum of the system is studied depending on the frequencies and coupling forces between the resonators. Optimization of dynamics at different stages of signal storage in subsystems is proposed. It is shown that it is possible to transfer the field from the second memory block to the first one with high efficiency close to 100%, this opens up the possibility of effectively combining several quantum memory systems.

PAGE 69

The impact of spin correlations on the transport properties of $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$

D. E. Zhelezniakova, I. I. Gimazov, Y. I. Talanov

The results of microwave absorption and resistivity measurements of cobalt-doped BaFe_2As_2 single crystals are presented. The behavior of the microwave absorption amplitude is described accounting for the temperature dependence of resistivity, magnetic susceptibility, and the scattering rate by spin fluctuations. An alternative explanation for the nonlinear dependence of resistivity above the magnetic ordering temperature is proposed. Estimates of the scattering rate indicate a nematic nature of fluctuations above the ordering temperature.

PAGE 73

Identification of EPR spectrum components of mechanically activated calcium gluconate in the W-range

M. M. Akhmetov, G. G. Gumarov, R. B. Zaripov, Yu. V. Sadchikov, A. N. Ashikhmin

Calcium gluconate obtained by mechanical activation has been studied by the electron paramagnetic resonance method in the X- and W-ranges. The spectrum in the W-range is three-component and is well described by contributions from two types of radicals with different g-factors: carbon radicals of δ -gluconolactone and the radical $(\text{Ca}-\text{OC}_6\text{H}_{11}\text{O}_6)^\bullet\delta\text{-GL}$ containing a calcium atom. The parameters of these spectra, obtained as a result of quantum-chemical calculations, are completely consistent with the experimental ones.

PAGE 77

Determination of optical nonlinearity of new d- π -A chromophores by femtosecond spectroscopy

D. N. Petrov, A. G. Shmelev, B. A. Khabibillin, A. V. Leontyev, L. A. Nurtdinova, D. K. Zharkov,
L. N. Islamova, A. A. Kalinin, M. Yu. Balakina, V. G. Nikiforov

As part of the work on measuring the nonlinear optical coefficient d_{33} of chromophores, a new installation has been created, characterized by the use of amplified femtosecond pulses with a carrier wavelength of 800 nm as pump radiation. The chromophores under study belong to the D- π -A type chromophores. The samples are presented in the form of composite materials – thin films of polymers with chromophores embedded in them. It is shown that the obtained values of the nonlinear optical coefficient measured using femtosecond pulses at a wavelength of 800 nm coincide with the data obtained using femtosecond pulses at a wavelength of 1054 nm, which allows using this method for samples that exhibit strong absorption or luminescence in the regions of 1000 and 500 nm.

PAGE 80

Pulsed annealing of silicon implanted with indium and antimony ions

R. I. Batalov, V. V. Bazarov, V. I. Nuzdin, V. F. Valeev, G. A. Novikov, V. A. Shustov

Monocrystalline silicon (Si) was sequentially implanted with indium (In^+) and antimony (Sb^+) ions with an energy of 30 keV and a dose of $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ for each ion grade. A powerful pulsed ($\sim 100 \text{ ns}$) ion beam (C^+/H^+) with an energy of 300 keV and a pulse energy density of 1.0 J/cm^2 was used to anneal implanted Si:(In+Sb) layers, resulting in the formation of a melt on the Si surface. The calculation of the deep profile of impurity atoms showed their maximum concentration of 40 at.% at a depth of about 20 nm. As a result of pulsed annealing, the segregation of impurity atoms to the Si surface and their diffusion deep into the crystal were detected. Studies of the phase composition indicate the formation of the InSb phase with a level of tensile strain in layers of 0.6–0.7%. The concentration of electrons in the layer ($2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) due to the donor impurity Sb is estimated from the optical IR spectra and the formation of an intense absorption band at $3.85 \mu\text{m}$ is shown. Measurements of the photoresponse on a diode mesa structure at 300 K showed a shift in the edge of photosensitivity to 1240 nm compared with a typical Si photodiode (FD-24).

PAGE 84

Photoluminescence of oxygen vacancies in rutile (TiO_2) irradiated with argon ions

E. M. Begishev, V. V. Bazarov, V. F. Valeev, D. K. Zharkov, N. M. Lyadov, V. I. Nuzhdin, A. G. Shmelev, R. I. Khaibullin

Single-crystal (001)-oriented rutile (TiO_2) plate was irradiated with 40 keV argon ions at a high dose of $1.5 \cdot 10^{17} \text{ ion/cm}^2$. Intense ion irradiation changes the color of rutile from colorless to blue due to the formation of oxygen vacancies in the irradiated rutile layer. A procedure for the spatial displacement of positively charged oxygen vacancies under the action of an applied electric field was carried out. The effect of the concentration and charge state of oxygen vacancies on the photoluminescence spectra of rutile was shown. The interpretation of the observed photoluminescence lines was carried out on the basis of the band electron structure of nonstoichiometric rutile with defect levels in the band gap.

PAGE 89

Two-channel (Quadrature detection) EPR spectroscopy of copper impurity centers in barium fluoride (BaF_2)

R. B. Zaripov, V. F. Tarasov, V. A. Ulanov

Paramagnetic centers formed by $^{63}\text{Cu}^{2+}$ impurity ions in a BaF_2 single crystal have been studied by continuous wave electron paramagnetic resonance (EPR). The measurements have been carried out on an ELEXSYS E580 spectrometer using a dielectric resonator with a two-channels of spectra recording. The EPR spectra of in-phase and out-of-phase by 90° (orthogonal) magnetic field modulation were recorded in the first and second channels, respectively. It has been found that at a sufficiently high power of microwave radiation corresponding to partial saturation of resonance transitions, intense resonance lines belonging to high-spin ($S = 1$) copper dimer associates appear in the orthogonal channel, and there are no signals from low-spin ($S = 1/2$) single ions. We attribute the appearance of the lines in the orthogonal channel with the special features of the spin dynamics of high-spin electron systems. With sufficiently intense resonance excitation of magnetic dipole transitions, the magnetic dipole moment of the spin system transforms into an electric quadrupole moment, while the interaction of dipole and quadrupole oscillators occurs in the spin system. This leads to the appearance of resonance absorption signals, the phase of which is orthogonal to the phase of the magnetic field modulation. The observed effect makes it possible to identify high-spin and low-spin paramagnetic centers by comparing the EPR spectra recorded in different channels during quadrature detection of the spectra relative to the phase of the magnetic field modulation.

PAGE 95

Opportunity estimation of using the Jamen interferometer to create a state primary standard for the longitudinal ultrasonic waves speed in transparent solids

A. D. Shishkin, V. V. Semashko, A. A. Karabutov

The shortcomings of the existing state primary standard of ultrasonic wave velocities in solids are analyzed. For the first time it is proposed to use a transparent solid body as a standard of sound velocity and to measure the sound velocity by using a Jamen interferometer. Initial theoretical evaluations have been carried out, which showed the promising potential of the proposed approach. The most significant obstacles to its experimental implementation and the ways to overcome them are established.

PAGE 100

Luminescent thermometry based on LiHoF₄ microcrystals

V. I. Kolesnikova, G. S. Shakurov, O. A. Morozov, S. L. Korableva, A. G. Shmelev, V. V. Semashko

The applicability of crystalline LiHoF₄ microparticles as highly sensitive temperature sensors for luminescent thermometry was performed. The relative and absolute thermal sensitivity of temperature sensors based on these microparticles were determined and the minimum detectable temperature difference was estimated for the five most promising pairs of luminescence peaks caused by ⁵F₅–⁵I₈ transitions of Ho³⁺ ions. The best performance was observed in the temperature range 80–130 K for a pair of peaks at 656.5 and 653.9 nm. In this case, the detection ability of the sensor for temperature changes was ~2 K. The prospects of using Ho³⁺-activated compounds for luminescent thermometry and visualization of temperature fields have been demonstrated.

PAGE 107

Multifunctional pulse program for obtaining images on a specialized magnetic resonance imaging system with a field induction of 0.4 T

V. L. Odivanov, Ya. V. Fattakhov, A. R. Fakhrutdinov, V. A. Shagalov, A. R. Bayazitov

Magnetic resonance imaging is one of the most informative methods of medical diagnostics. Currently, the laboratory has developed and manufactured a model of the TMR-0.4 magnetic resonance imaging system based on a permanent magnet with a field induction of 0.4 T. To conduct patient examinations and scientific experiments on this installation, software has been developed that performs all the functions necessary for examining patients in interaction with the equipment to obtain results in the form of tomographic images, numerical and graphical parameters, their storage and visualization.

PAGE 115

CVD synthesis of non-planar carbon nanotube structures on a nickel surface

E. F. Kukovitsky, S. G. Lvov, V. A. Shustov

Using the example of metallic nickel, the possibility of CVD synthesis of periodic carbon nanotube (CNT) structures without applying an additional catalyst to the surface of metals, that are catalytically active in the pyrolysis of hydrocarbons, has been experimentally demonstrated. Surface structuring of nickel substrates was implemented with use of surface relief forming by plastic surface deformation with patterning. Using passivation-activation methods for various surface areas of nickel substrates, the selective growth of CNTs is implemented in such a way that the plane of the CNT sections (~500×500 μm²) does not coincide with the plane of the supporting substrate. The resulting submillimeter-scale structures are actually non-planar structures.

PAGE 121

АСПИРАНТЫ И МОЛОДЫЕ УЧЁНЫЕ

Премии и награждения

– Гимазов Ильнур Илхамович, м.н.с. лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники, стал лауреатом премии КФТИ им. Б. М. Козырева среди молодых учёных 2024 года.



Слева направо: директор ФИЦ КазНЦ РАН А. А. Калачёв и м.н.с. лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники И. И. Гимазов.

– Гимазов Ильнур Илхамович, м.н.с. лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники, стал обладателем Казанской премии имени Завойского 2024 года (1-е место).



– Бегишев Евгений Михайлович, м.н.с. лаборатории радиационной физики, стал лауреатом премии КФТИ им. Н. С. Гарифьянова среди аспирантов 2024 года.



Слева направо: директор ФИЦ КазНЦ РАН А. А. Калачёв и м.н.с. лаборатории радиационной физики Е. М. Бегишев.

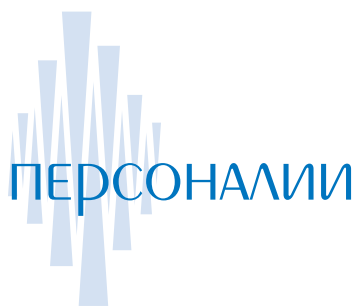
Победители конкурса “Лучший молодой учёный/аспирант ФИЦ КазНЦ РАН 2024”

В номинации “Лучший аспирант в области физических, технических и математических наук”:

- Эндерова Татьяна Николаевна “Исследование транспортных свойств топологического изолятора $\text{Bi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$ при помощи измерений сопротивления на постоянном токе и высокочастотных измерений” – I место
- Попов Даниил Владимирович “Магнитные и термоэлектрические свойства людовигита $\text{Mn}_{0.75}\text{Co}_{2.25}\text{VO}_5$ ” – II место
- Гатауллина Рамиля Мансуровна “Новый подход к получению наночастиц на основе фторидов РЗЭ, допированных лантаноидами, и их применение” – III место

Специальный приз по мнению жюри (приз от директора ФИЦ КазНЦ РАН):

- Железнякова Диана Евгеньевна “Электронный спиновый резонанс в кристаллах EuSn_2As_2 вблизи температуры магнитного упорядочения”



Алла Ивановна Андреева. К 80-летию со дня рождения

26 ноября 2024 года Алла Ивановна праздновала своё восьмидесятилетие.

В это трудно поверить, ведь Алла Ивановна прекрасно выглядит, полна сил, энергии, да и, кажется, совсем недавно отмечали её семидесятилетие.

В связи с семидесятилетием А. И. Андреевой коллеги подробно описали её жизненный путь и трудовую деятельность в стенах Казанского физико-технического института в сборнике Ежегодник 2014, стр. 167. Сегодня мы ещё раз говорим спасибо за добросовестный труд, ответственное отношение к работе и доброжелательное отношение к коллегам.

Поздравляя Аллу Ивановну с юбилеем, мы не могли не спросить, в чем секрет её молодости, энергии, спокойствия и доброжелательности.

Алла Ивановна поделилась своим секретом: “У меня хорошие гены и я люблю людей. Доброжелательна, потому что по-другому не могу. К людям надо относиться так, как хотелось бы, чтобы относились к тебе.

Секрет энергии?! Мне интересно то, что я делаю. Сначала занималась наукой, и мне это было интересно. По определённым обстоятельствам изменила направле-



Алла Ивановна Андреева

ние деятельности, но то, что я сейчас делаю, мне тоже интересно. Действие побуждает новое действие.

Я не жалею, оптимизм черпаю в себе.

Мне всегда везло, меня окружали хорошие люди, меня все любили: родители, друзья в институте, коллеги на работе. Добро рождает добро”.

Мы от всей души поздравляем А. И. Андрееву с юбилеем, желаем ей крепкого здоровья и надеемся, что Алла Ивановна ещё долго будет работать в нашем коллективе и бережно заботиться о нашем оборудовании.

Сотрудники лаборатории СФСХ

Александр Николаевич Аникин. К 70-летию со дня рождения

Александр Николаевич Аникин родился 5 февраля 1954 года в г. Казани.

Трудовая деятельность Александра Николаевича началась в 1971 году на КАПО им. С. П. Горбунова.

После службы в рядах вооружённых сил в 1974–1976 гг. он демобилизовался и вновь устроился работать на КАПО им. С. П. Горбунова в качестве наладчика станков с программным управлением. Работа была очень интересной и привлекала его своей сложностью в схемотехнике. Изучив научную литературу по основам электроники, А. Н. Аникин освоил различные виды станков, большую помощь в этом ему оказали коллеги по лаборатории, в которой он работал.

После окончания Казанского авиационного института им. А. Н. Туполева с красным дипломом А. Н. Аникин продолжил работать на том же заводе в качестве инженера-наладчика. В это время он занимался проектированием микропроцессорных систем на базе КР580ВМ80А, КМ1816ВЕ51 и др.

В 1991 году его пригласили работать в НПО “Нефтепромавтоматика”, где до 1997 года он занимался разработками контроллеров на базе КМ1816ВЕ51. Там он освоил программу PCAD и до сих пор занимается разработками печатных плат различной сложности.

Но перестройка внесла свои коррективы в жизнь.

Низкий уровень дохода заставил его искать более выгодную работу. В 1997 году Александр Николаевич устроился работать в Казанский онкологический центр в качестве ведущего инженера-физика. Затем, с мая 2002



Александр Николаевич Аникин

года по ноябрь 2014 года работал инженером-технологом в “ООО ИВПОР РТ”, в последствии ООО “ЭКОТРОН”.

Александру Николаевичу приходилось общаться с иностранными специалистами по запуску импортного оборудования. Хорошее знание английского языка очень помогло ему и в общении, и в понимании специфики работы импортного оборудования.

В ноябре 2014 года производство закрылось и с 27 ноября 2014 года Александр Николаевич работает в лаборатории ММФ КФТИ им. Е. К. Завойского, сначала ведущим инженером, а затем инженером-исследователем.



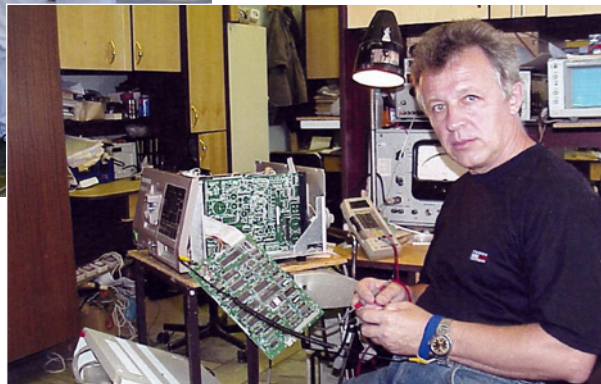
Начало марта 1985 года, озеро “Глубокое”.

После концерта, посвящённого Дню 8 Марта в ДК им. Ленина. 1979 год.



Инженеры ООО “ЭКОТРОН” и иностранные специалисты на прогулке по Казани.

Работа в Казанском онкологическом диспансере. 1999 год.



Ему приходится решать множество задач. Одной из интересных работ была переделка блока управления аппаратно-программного комплекса “Импульс-6”.

Вместе с коллегами по лаборатории ММФ и специалистами из Китая он занимался улучшением характеристик томографа, таких как однородность магнитного поля магнита, его температурная стабильность и улучшение шумовых показателей усилителей градиентов.

А. Н. Аникин рассказывает: “На сегодняшний день у меня отличный коллектив, я с огромным удовольствием приезжаю на работу рано утром и знаю, что каждый из этих ребят в трудную минуту протянет мне руку помо-

щи. Это классные специалисты, с ними любая трудная задача будет решена”.

А. Н. Аникин успешно освоил работу на токарном станке, и теперь может сам изготовить любые детали.

Александр Николаевич увлекается музыкой, владеет игрой на клавишных музыкальных инструментах – фортепьяно, электрооргане, синтезаторе, а также на трёх видах электрогитар (соло, ритм и бас). В юности он участвовал в концертах в составе вокально-инструментальных ансамблей заводской художественной самодеятельности, и, кроме исполнения музыки, изготавливал различные устройства для улучшения и разнообразия звучания электроинструментов.

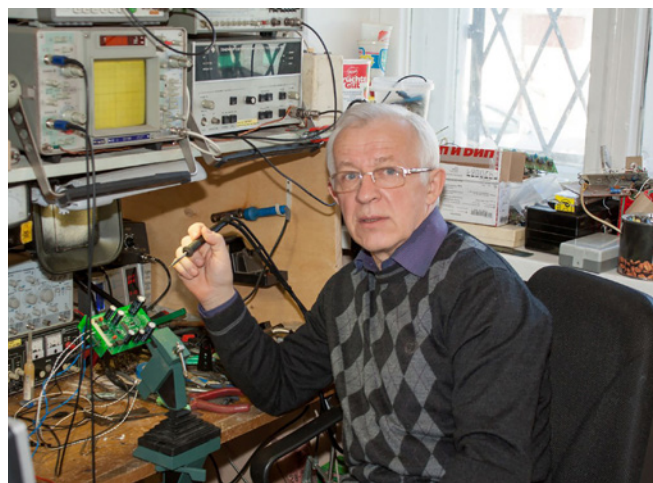


А. Н. Аникин с китайскими специалистами. 2014 год.



А. Н. Аникин у магнитного томографа, подготовка запуска.

Помимо увлечения музыкой, Александр Николаевич активно занимался спортом. Каждое утро просыпался рано и бегал по пять километров, затем следовали различные физические упражнения, обливания ледяной водой и растирание полотенцем. В 1985 году зимой начал



купаться в проруби, вплоть до 22 января 1988 года. В этот день он женился и переехал жить в другой район. С моржеванием пришлось покончить, так как до проруби добираться было очень далеко. Но бегать и заниматься физическими упражнениями он продолжает до сих пор.

Поздравляем Александра Николаевича с юбилеем, желаем крепкого здоровья, успехов и долголетия!

*Я. В. Фаттахов, А. Р. Фахрутдинов,
В. А. Шагалов, А. А. Баязитов*

Ленар Рафгатович Тагиров. К 70-летию со дня рождения

8 мая 2024 года Ленару Рафгатовичу Тагирову, ведущему научному сотруднику лаборатории нелинейной оптики, д.ф.-м.н., профессору, академику АН РТ исполнилось 70 лет. Он окончил Казанский государственный университет (КГУ) в 1976 году. Дипломную работу выполнял в КГУ под руководством проф. Бориса Ивановича Кочелаева. Сразу после окончания университета поступил в очную аспирантуру. Его кандидатская диссертация (КГУ, 1981 г.) была посвящена исследованию спин-спиновых взаимодействий в сверхпроводниках и их влияния на спектры ЭПР (научный руководитель проф. Кочелаев Б.И.). В рамках микроскопической теории сверхпроводников с магнитными и немагнитными примесями им было получено общее выражение для косвенного обменного взаимодействия между локализованными магнитными моментами, дальное действие которого равно длине когерентности сверхпроводника и может достигать десятков нанометров. В работах с Б. И. Кочелаевым было показано, что это специфическое взаимодействие в сверхпроводниках



Ленар Рафгатович Тагиров

приводит к обменному сужению неоднородно и дипольно уширенных линий ЭПР. Было получено нетривиальное обобщение широко известной формулы Андерсона для ширины обменно-суженных линий ЭПР на случай, когда дальное действие обмена превышает все другие характерные

длины в динамике намагниченности, и объяснены экспериментальные результаты группы И. А. Гарифуллина по аномальной температурной зависимости ширины линии ЭПР на локализованных магнитных моментах в сверхпроводниках. Цикл работ “Спиновая кинетика и магнитный резонанс в сверхпроводниках” был отмечен в 1988 году медалью и премией Академии наук СССР для молодых учёных. Продолжение работ по магнитному резонансу в сверхпроводниках привело, в конце концов, к защите в 1996 году докторской диссертации “Теория электронного парамагнитного резонанса в сверхпроводниках” в Московском инженерно-физическом институте (МИФИ). В дальнейшем наработки в теории магнитного резонанса в низкотемпературных сверхпроводниках и их применение к эксперименту пригодились для исследований явления высокотемпературной сверхпроводимости, что в совокупности было отмечено Государственной премией Республики Татарстан 2007 года за цикл работ “Исследования природы наноразмерных свойств сверхпроводников методами магнитного резонанса” в составе коллектива авторов (И. А. Гарифуллин, Н. Н. Гарифьянов, А. В. Дуглав, М. В. Ерёмин, Б. И. Кочелаев, Л. Р. Тагиров, Г. Б. Тейтельбаум, Э. Г. Харахашьян).

В начале 90-х годов Л. Р. Тагиров переместил фокус своих работ на исследования тонкоплёночных магнитных гетероструктур и гетероструктур сверхпроводник-ферромагнетик. Побудительным мотивом было твёрдое решение проф. И. А. Гарифуллина провести экспериментальные исследования тонкоплёночных магнитных и сверхпроводящих гетероструктур в КФТИ. А будет эксперимент, непременно будут и задачи для теоретика в новой тогда области исследований. Кроме того, тема была гораздо ближе к приложениям, поскольку начало 90-х годов было временем развития спинтроники – науки и технологии сверхплотной магнитной записи и высокоскоростной обработки информации с использованием тонкоплёночных магнитных гетероструктур. В сотрудничестве с группой проф. Хартмута Цабеля из Университета Рура в Бохуме, Германия, для объяснения результатов совместных экспериментов Гарифуллина-Цабеля была построена квазиклассическая теория слоистых наноструктур сверхпроводник-ферромагнетик (СФ) (1996–2006 гг.) и независимо от и одновременно с другими исследователями объяснены осцилляции температуры сверхпроводящего перехода при изменении толщины слоёв ферромагнитного металла в СФ бислоях (1996–1998 гг.); был предсказан эффект возвратной сверхпроводимости (1998 г.), экспериментально обнаруженный в совместных работах групп И. А. Гарифуллина и Х. Цабеля с участием Л. Р. Тагирова (2000–2006 г.). Работа 1999 года в *Physical Review Letters*, в которой был предсказан эффект сверхпроводникового спинового клапана в структуре F1/S/F2 (F1 – ферромагнитные металлы, S – сверхпроводник), вызвала большой интерес к функциональным СФ гетероструктурам и к настоящему времени процитирована более 400 раз (РИНЦ). Предсказательная работа по триплетному сверхпроводниковому спиновому клапану

(Письма в ЖЭТФ/2010 г.) была процитирована более 200 раз и реализована экспериментально И. А. Гарифуллиным в Казани в сотрудничестве с коллегами из Германии (2012 г. и дальнейшие работы по настоящее время).

В тот же отрезок времени экспериментальное наблюдение гигантского магнитосопротивления в магнитных наноконтактах (250% при комнатной температуре) проф. Николасом Гарсией в Мадриде подтолкнуло Л. Р. Тагирова к осмыслению экспериментальных фактов и идеям теоретического описания проводимости магнитных наноконтактов. Совместно с Б. П. Водопьяновым (КФТИ) и К. Б. Ефетовым (Университет Бохума, Германия, и Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау, Черногоровка) удалось построить первую версию квазиклассической теории точечных ферромагнитных контактов (2001), которая давала нужный порядок величины их магнитосопротивления при приближении к баллистическому режиму проводимости через контакт. Далее теория магнитосопротивления точечных ферромагнитных контактов была обобщена на случай квантования проводимости через контакт наноразмерного масштаба (2002, 2003) и было показано, что “квантовый спиновый клапан” может иметь магнитосопротивление, достигающее тысячи процентов при комнатной температуре, которое испытывает при этом гигантские флуктуации при изменении размера наноконтакта. Экспериментальное подтверждение предсказания было получено проф. Х. Чопрой в 2005 году (университет Баффало, США) на наноконтактах из кобальта, изготовленных электролитическим методом. В дальнейшем квазиклассическая теория проводимости магнитных и немагнитных наноконтактов была усовершенствована так, чтобы описывать все некантовые режимы проводимости непрерывно, от диффузного максвелловского до баллистического шарвиновского (2011–2020 гг.), давая правильные предельные выражения и в немагнитном случае (наноконтакты из золота).

Другая серия работ по СФ гетероструктурам была выполнена Л. Р. Тагировым в кооперации с проф. Р. Тидексом и проф. З. Хорном из университета Аугсбурга, Германия, и проф. А. Сидоренко из Института электронной инженерии и нанотехнологий АН Республики Молдова в 2003–2017 гг. В основу было положено использование ферромагнитного сплава CuNi – слабого ферромагнетика – в качестве магнитного материала в СФ гетероструктурах. Слабый ферромагнетик снимает жёсткие требования к толщине магнитного слоя быть в суб-нанометровом или нанометровом масштабах, что значительно упрощает технологию изготовления СФ гетероструктур и повышает достоверность полученных результатов. На этом пути были получены подтверждённые расчётом знаковые экспериментальные результаты по возвратному и двойному возвратному поведению сверхпроводимости в СФ гетероструктурах с ферромагнитными сплавами (2006–2013 гг.), а также наблюдаются эффекты триплетной сверхпроводимости и переключения между нормальным и сверхпроводящим состояниями в сверхпроводящих спиновых клапанах (2013–2017 гг.).

В последнее время в сотрудничестве с Р. В. Юсуповым, И. В. Янилкиным, А. И. Гумаровым из КФУ, Р. И. Хайбуллиным из КФТИ и И. А. Головчанским из МИСИС, Москва, Л. Р. Тагиров активно работает над исследованием спин-волновых и транспортных свойств эпитаксиальных плёнок ферромагнитного сплава Pd-Fe, состав которых меняется непрерывно по толщине плёнки (2021–2025 гг.). Материалы с переменными магнитными характеристиками по толщине или плоскости плёнки называются градиентными (или в наиболее общей формулировке градуированными – *graded*) и являются новыми материалами магноники – нарождающейся отрасли электроники, в которой информация переносится и обрабатывается с помощью магнонов – квантов спиновых волн. Было показано, что, меняя профиль распределения состава сплава Pd-Fe по толщине плёнки, можно управлять законом дисперсии и энергией спиновых волн в широком диапазоне, что необходимо для сопряжения со спин-волновыми возбуждениями других компонент магнонных процессоров. Кроме того, градиентные магнитные материалы обладают свойством невзаимности (т.е. большой разницей в свойствах магнонов, распространяющихся в противоположных направлениях), которое используется в магнонных диодах, логических вентилях и развязках между сегментами магнонных цепей.

Л. Р. Тагиров опубликовал более 240 работ в международных и отечественных рецензируемых журналах и изданиях, в том числе четыре статьи в *Physical Review Letters*, статья в *Europhysics Letters*, 3 статьи в *Applied Physics Letters*, 15 – в Письмах в ЖЭТФ, 5 – в Письмах в ЖТФ, 15 статей в *Physical Review B* и *Physical Review Materials*, 6 – *Journal of Applied Physics*, 5 – в ЖЭТФ, более 12 обзорных и оригинальных глав в коллективных монографиях, выступил составителем и редактором трёх

коллективных монографий издательств Kluwer (1) и Springer (2). Общее число цитирований работ Л. Р. Тагирова по SCOPUS составляет 3256 (на 12.02.2025), *h*-индекс = 26. РИНЦ индексирует 313 публикаций с общим числом цитирований 3964 (на 31.03.2025), *h*-индекс = 29.

В 2023 году Л. Р. Тагиров был избран действительным членом (академиком) Академии наук РТ. В настоящее время возглавляет комиссию АН РТ по поддержке талантливой молодёжи, в ведении которой находятся конкурс АН РТ по присуждению молодёжных премий, конкурс молодёжных грантов, конкурс стипендий АН РТ для студентов; является членом комиссии по присуждению Государственных премий по науке и технике РТ, членом комиссии по присуждению стипендии имени академика РАН Валиева К.А. За плодотворный труд и высокий уровень научной работы в 2024 году награждён Золотой медалью Академии наук Республики Татарстан “За достижения в науке” и званием “Почётный работник науки и высоких технологий РФ”. Л. Р. Тагиров – член Учёного совета Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, член Объединённого учёного совета ФИЦ КазНЦ РАН и диссертационного совета КФУ по физике конденсированного состояния.

Желаем Ленару Рафгатовичу крепкого здоровья, долгих лет плодотворной научной деятельности, новых выдающихся результатов и престижных публикаций!

*А. А. Калачёв, К. М. Салихов, М. Х. Салахов,
С. М. Хантимеров, С. А. Зиганишина,
Т. П. Гаврилова, Л. И. Савостина,
И. А. Гарифуллин, Р. М. Ерёмкина, В. Е. Катаев,
А. А. Камашев, Ю. И. Таланов, Р. И. Хайбуллин,
И. А. Файзрахманов, Р. Н. Шахмуратов, Р. В. Юсупов*

Ольга Олеговна Куприянова. К 70-летию со дня рождения

4 июня 2024 года исполнилось 70 лет Ольге Олеговне Куприяновой. Ольга Олеговна работает в физтехе с 1990 года. Она была принята на должность старшего лаборанта в лабораторию радиационной физики. За время работы она зарекомендовала себя дисциплинированным, ответственным и обязательным работником. Всё, за что она бралась, и то, что ей поручалось, всегда выполнялось на 5+. Ольга Олеговна всегда была готова к освоению новых процессов и делала это с большой отдачей. Её профессионализм и человеческие качества не могли остаться незамеченными руководством института, и в 2000 году Ольге Олеговне была предложена



Ольга Олеговна Куприянова

должность заведующей АХО. Кроме этого, она долгое время являлась бессменным комендантом базы отдыха института, на которой при ней был наведён почти идеальный порядок. С большим энтузиазмом она взялась и за новое по тем временам поручение – организовать горячее питание для сотрудников института. Многие сотрудники с большой ностальгией вспоминают эти наивкуснейшие блюда, приготовленные её золотыми руками. Порядок и чистота были идеальными, а блюда вкусными и полезными. Порой доходило до того, что сотрудники даже умудрялись заказывать Ольге Олеговне свои любимые блюда или что-то диетическое. Она не могла отказать в этом никому.

Но, несмотря на свою природную человечность и доброту, она всегда была беспощадно требовательна к людям, работающим под её руководством. И в первую очередь – к самой себе. Во время её работы в качестве заведующей АХО в институте идеально были организованы и вывоз мусора, и проведения всех плановых уборок.

А уж сколько она организовала фуршетов и банкетов по поводу защит всяческих диссертаций! И не сосчитать! Она умеет филигранно рассчитать и нужное количество продуктов, и накрыть просто роскошные столы при таком, казалось бы, скудном бюджете. Ни один “Завойский” не прошёл без её деятельного участия в организации фуршетов и кофе-брейков. А главное – если это поручено Ольге Олеговне – можно спать спокойно и быть уверенным, что всё пройдёт на высочайшем уровне!

С 2003 года Ольга Олеговна была избрана председателем комиссии по работе с ветеранами. И в этом же году ей была заслуженно присуждена премия имени Блатта, а в 2004 году вручена Почётная грамота РАН. В 2018 году в связи со структурными реорганизациями Ольга Олеговна была вновь переведена на должность лаборанта-исследователя.

Ольга Олеговна всегда доброжелательна и открыта в общении с людьми, никогда не ограничивается формальным подходом к своим обязанностям. С ней очень комфортно работать в любом коллективе, потому что она умеет работать с людьми, участвует во всех мероприятиях, проводимых лабораторией. Сотрудники относятся к ней с огромной симпатией и уважением, и она отвечает им тем же. А в праздники она с удовольствием балует своих “мальчиков” домашними вкусностями, ведь любое приготовленное ею блюдо сразу же и безоговорочно становится украшением всего стола. А уж как она поёт! Просто заслушаешься! Несмотря на свою большую занятость в институте, Ольга Олеговна содержит в идеальном порядке всё своё приусадебное хозяйство, выращивает изумительные по красоте цветы, разнообразные овощи и фрукты, делает вкуснейшие домашние заготовки.

Она прекрасная мама, замечательная бабушка, а её кипучей энергии можно только позавидовать.

Хотим пожелать Ольге Олеговне подольше оставаться такой же энергичной, хлебосольной, доброжелательной, накрепчайшего здоровья и долгих и насыщенных лет жизни!

Н. Г. Куркина

Ильдар Валеевич Гайнутдинов. **К 70-летию со дня рождения**

Ильдар Валеевич Гайнутдинов работает в Казанском физико-техническом институте в ставшей для нашего института практически уникальной, но и по-прежнему крайне необходимой, должности старшего лаборанта, лаборанта-исследователя, уже полвека, с января 1975 года. Является Ветераном КФТИ. Его деятельность на протяжении большей части этого времени была связана с созданием и совершенствованием экспериментальной базы лаборатории, с технологическим обслуживанием экспериментальных установок. На Ильдара Валеевича можно положиться при необходимости выполнения слесарных, токарных, фрезерных работ. Он освоил работу с элементами вакуумной техники и электротехники, выполнял паяльные работы, механическую обработку керамических материалов. В состоянии по техническому заданию самостоятельно собрать отдельные узлы средней сложности, обосновано выбрать наиболее подходящие



Ильдар Валеевич Гайнутдинов

для этого материалы, также обеспечивал выполнение и сварочных работ. Эти навыки и знания характеризуют его как лаборанта высокой квалификации. С непосредственным участием Ильдара Валеевича собрано несколько ростовых установок, установок по синтезу углеродных

материалов, обеспечивалось проведение научных исследований лаборатории, выполнение государственного задания и задач научных грантов.

Мы знаем Ильдара Валеевича как постоянного участника турниров по настольному теннису, а ранее и других спортивных соревнований в институте, горячего хоккейного болельщика. Ильдар – надёжный товарищ, всегда готовый прийти на помощь коллегам. Многим сотрудникам института он приходил на помощь и в нестандартных жизненных ситуациях. Неконфликтность,

доброжелательность и общительность позволяют ему устанавливать быстрый контакт с людьми и зачастую выполнять роль снабженца необходимыми инструментами и материалами, что бывает так ценно в современных сложных условиях. Оптимистический и уверенный в себе настрой характера Ильдара всегда придаёт силы и нам, его коллегам и товарищам. Так держать, сил и здоровья, наш Ильдар!

С. Г. Львов, Е. Ф. Куковицкий, Н. М. Сулейманов

Сергей Михайлович Ахмин. К 70-летию со дня рождения

2 сентября 2024 года исполнилось 70 лет кандидату физико-математических наук, начальнику редакционно-издательского отдела Федерального исследовательского центра “Казанский научный центр Российской академии наук” Сергею Михайловичу Ахмину.

Сергей Михайлович Ахмин родился в 1954 году в семье военного в Москве. В 1972 году он окончил казанскую среднюю школу № 18 с преподаванием ряда предметов на английском языке. В отличие от старшего брата Александра, который выбрал военную стезю, Сергей поступил на физический факультет Казанского государственного университета, где специализировался на кафедре физики твёрдого тела. Окончив университет в 1977 году, он начал свою трудовую деятельность во Всесоюзном НИИ геологии нерудных полезных ископаемых в должности инженера, но уже в мае 1979 года он был избран по конкурсу на должность младшего научного сотрудника. Круг научных интересов С. М. Ахмина в это время был сосредоточен на исследовании структурно-кристаллохимических характеристик минералов методом импульсного ЯМР. Сергей Михайлович работал с творческой инициативой и активно содействовал развитию изобретательства. Надо ли удивляться, что Сергей Михайлович является автором 23 рационализаторских предложений! Он был дважды награждён Почётной грамотой ВНИИгеолнеруда и неоднократно ему были объявлены благодарности.

Его творческая активность требовала новых предложений, и в 1985 году Сергей Михайлович поступил в аспирантуру с отрывом от производства Казанского физико-технического института КазНЦ РАН и начал свою научную работу в лаборатории ЭПР твёрдого тела, руководимой доктором физико-математических наук Юрием Васильевичем Яблоковым. Одним из на-



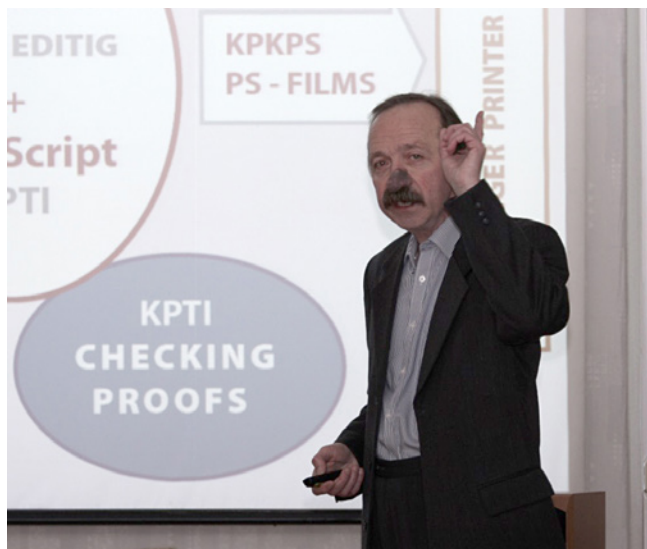
Сергей Михайлович Ахмин

правлений исследований, определяющих тематику этой лаборатории, было исследование примесных центров в кристаллах методами ЭПР и ДЭЯР. К тому времени наиболее систематически исследования электронно-ядерных взаимодействий методом ДЭЯР проводились в кристаллах фторидов. В значительно меньшей степени они были изучены в матрицах других галогенидов щелочных и щелочноземельных металлов, хотя несомненный интерес представляли сведения о лигандных сверхтонких (ЛСТВ) и лигандных квадрупольных (ЛКВ) взаимодействиях в кристаллах, где лиганды имеют более сложную электронную конфигурацию, чем ион фтора.

В ряду галогенидов хлориды являются классом соединений ближайших в фторидам, однако многие из попыток наблюдения ДЭЯР $^{35,37}\text{Cl}$ в этих соединениях оказались неудачными. К середине восьмидесятых прошлого века методом ДЭЯР были получены сведения о ЛСТВ и ЛКВ в кристаллах AgCl и NaCl , легированных ионами группы железа с электронной конфигурацией $3d^5$. Данные о параметрах взаимодействий лигандов с ионами группы редкой земли в хлорном окружении отсутствовали.

Перед аспирантом Сергеем Ахминым была поставлена трудная задача: надо исследовать экспериментально ЛСТВ

На торжественном собрании,
посвящённом юбилею
международного журнала
“Applied Magnetic Resonance”,
С. М. Ахмин рассказывает
о производстве журнала
в Казани.



и ЛКВ примесных парамагнитных ионов в кристаллах неорганических хлоридов изоструктурных кубическим фторидам с целью получения сведений о параметрах электронно-ядерных взаимодействий с лигандами и другими ионами окружения ионов группы редкой земли и ионов группы железа с электронной конфигурацией, отличной от $3d^5$. Ему пришлось приложить свои знания, все силы и старание, чтобы справиться с этой задачей. Им в соавторстве с коллегами исследованы кубические хлориды со структурой эльпасолита $\text{Cs}_2\text{NaYCl}_6$ и $\text{Cs}_2\text{NaInCl}_6$, легированные ионами Cr^{3+} , Fe^{3+} , Ce^{3+} , Gd^{3+} и Yb^{3+} , а также кристалл со структурным фазовым переходом $\text{CsCaCl}_3\text{:Co}^{2+}$. В результате проведённых исследований получены новые сведения о взаимодействии примесных ионов с лигандами и ионами следующих координационных сфер в хлоридах, изучено влияние эффектов внедрения и решёточной релаксации на характеристики фазового перехода в кристаллах со структурой перовскита.

Ахмин С.М. является автором 37 печатных работ.

В декабре 1990 года Сергей Михайлович Ахмин, уже младший научный сотрудник лаборатории ЭПР ТТ КФТИ, успешно защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук “Исследование электронно-ядерных взаимодействий примесных парамагнитных ионов в кристаллах хлоридов методом двойного электронно-ядерного резонанса”, научные руководители Юрий Васильевич Яблоков и Владимир Павлович Мейкляр, а в 1991 году Кев Минуллинович Салихов пригласил его работать в редакции “Applied Magnetic Resonance”. Цитирую выступление Сергея Михайловича во время празднования Дня науки и КФТИ 5 февраля 2015 года на сессии, посвящённой 25-летию журнала “Applied Magnetic Resonance”: “... как я теперь понимаю, это было предопределено знанием публикуемого материала, компьютерной техники и английского языка. В то время я только что защитил кандидатскую диссертацию, был свободен в выборе пути и охотно согласился на новое интересное дело.” И на этом поприще Сергей Михайлович прошёл весь путь от научного редактора (1991–1996), заместителя главного редактора журнала по производственным вопросам (1996–2013), ведущего научного редактора редакционно-издательской группы физтеха (2013–2018), а в апреле 2018 года он был переведён на должность начальника редакционно-

издательского отдела ФИЦ “Казанский научный центр Российской академии наук”.

В 1991 году С. М. Ахмин стартовал в новой для себя деятельности сразу с очень высокой планки: в соответствие с поставленной перед ним К. М. Салиховым задачей подготовил, а затем блестяще реализовал проект по производству журнала силами редакции “Applied Magnetic Resonance”. Если штрих-пунктиром в очень грубом приближении обозначить основные вехи, им была проведена закупка необходимого оборудования, подбор программных средств для современной издательской системы, освоена сложная технология обработки графического и текстового материала на уровне самых высоких полиграфических требований. С 1994 года вся допечатная подготовка журнала “Applied Magnetic Resonance” осуществлялась в физтехе. Это взгляд из космоса, без детализации, ответ на вопрос “что?”. Но наиболее интересным и важным является ответ на вопрос “как?” Как удалось выполнить задуманное? И ответ на этот вопрос дал сам Сергей Михайлович в уже упомянутом мною юбилейном выступлении (Ежегодник 2015, стр. 161–165). Очень рекомендую к прочтению. Это практически синопсис захватывающего бестселлера или даже сценарий для блокбастера о том, как молодой советский, а затем российский, учёный решил практическую задачу в актуальной проблеме, которую поставила жизнь.

Жизнь – удивительная штука! Никогда не знаешь, каким эхо откликнется случайная встреча.

В начале мая 1981 года в Славяногорске появилась внушительная команда из Казани (физтех, КГУ, ВНИИгеолнеруд и др.) – участники VII Всесоюзной школы по магнитному резонансу, организованной АН СССР, Научным советом по проблеме “Радиоспектроскопия конденсированных сред”, АН УССР, Донецким физико-техническим институтом и Московским физико-техническим институтом. И там мы с Сергеем Ахминым



За рабочим столом в редакции.

альный вестник международного общества ЭПР. Редакцию “EPR newsletter” накрыла волна неиссякаемого восторга. Однако мы знаем, свет не без добрых людей, и добрые люди донесли до нас мнение одного из высокопоставленных функционеров фирмы Брукер БиоСпин: “Да, они в Казани сделали замечательную работу, но они определили очень высокую планку, смогут ли они поддержать этот высокий уровень в последующих номерах?” Вопрос правомерный, но и следующий номер, и следующий за ним, и так на протяжении уже двадцати трёх лет показали, что эта высокая

планка непоколебима. И несколько лет спустя тот же Брукеровский Фома признал несостоятельность своих сомнений. Кстати, у меня самой такое ощущение, что каждый последующий выпуск лучше предыдущего.

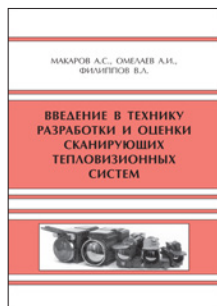
Огромной заслугой Сергея Михайловича является его инициатива в получении КФТИ лицензии на издательскую деятельность и проделанная для этого работа. С 2000 года все подготовленные в институте издания стали выходить под брендом ФизтехПресс. Получение лицензии позволило не только сократить время выхода изданий в свет, но и укрепило авторитет КФТИ как организации, самостоятельно издающей литературу научной направленности. Наличие лицензии имело определяющее значение для начала издания Ежегодников КФТИ и ИОФХ в 2002 и 2003 году.

Профессиональная работа редакционно-издательской группы, возглавляемой С. М. Ахминым в КФТИ, не осталась незамеченной в городе. Выполняя заказы на разработку макетов и допечатную подготовку, специалисты группы осуществили много совместных проектов с другими издательствами, а Сергей Михайлович состоялся как признанный дизайнер в полиграфии. В разные годы партнёрами по совместным проектам были: Казанский государственный университет, Академия наук РТ, ГИПО, КГМУ, КАМАЗ, КМИЗ, КПК ПС, СЗМН и др. На протяжении многих лет постоянными партнёрами редакционно-издательской группы являлись институты Казанского научного центра, что и послужило основанием для преобразования группы в редакционно-издательский отдел ФИЦ КазНЦ РАН. Приведём только избранный список осуществлённых издательских проектов под руководством и/или с непосредственным участием Сергея Михайловича.

пересеклись и очень обрадовались, когда признали друг в друге выпускников нашей замечательной “английской” школы № 18, членов нашего братства. Повспоминали наших любимых учителей, нашли общих знакомых среди учеников, обменялись цитатами из монологов Шекспира, и расстались с очень приятным послевкусием, но отнюдь не предполагая, что уже через четыре года мы будем работать в одной и той же лаборатории физтеха, а затем окажемся вовлечёнными в дела редакционные “Applied Magnetic Resonance”.

Более того, когда в 2002 году руководство Международного общества ЭПР решило перевести редакцию своего вестника “EPR newsletter” из Милуоки, Висконсин, США на родину ЭПР, в Казань (по рекомендации Кева Минуллиновича Салихова), Сергей Михайлович, естественно, получил предложение стать техническим редактором этого издания. И замечательно, что он согласился, поскольку перед новой редакцией “EPR newsletter” стояла амбициозная задача превратить этот вестник в полноценное полиграфическое издание. И только Сергей Михайлович с его опытом работы в полиграфии, изумительным чувством гармонии, творческим подходом к решению любой проблемы был именно тем человеком, который мог бы разработать макет издания и определить его лицо. И он сделал это!

Первый двойной выпуск том 13/1-2 (2003), несмотря на “несчастливый” номер, оказался счастливым. Он произвёл потрясающее впечатление на международное сообщество ЭПР, в чьих глазах Казань получила ещё одно измерение не только как родина открытия явления ЭПР Евгением Константиновичем Завойским, не только как город, где вручается международная премия им. Е. К. Завойского, но и как место, где издаётся офици-



Макаров А.С., Омелаев А.И.,
Филиппов В.Л.
Введение в технику разработки
и оценки сканирующих
тепловизионных систем

Научно-техническое издание.
Казань: Унипресс 1998 г.



Клеточная сигнализация

Сборник избранных статей
и воспоминаний, посвящённый
80-летию академика
И. А. Тарчевского.
Под общей редакцией А. Н. Гречкина.
Казань: ФЭН 2010 г.



Евгений Константинович
Завойский.
Материалы к биографии

Научно-историческое издание.
Под редакцией К. М. Салихова.
Казань: Унипресс 1998 г.



Казань и Российская академия наук

Историко-биографические
материалы.
Под редакцией А. И. Коновалова.
Казань: Унипресс 1999 г.



Семён Александрович Альтшулер.
Воспоминания

Научно-историческое издание.
Под редакцией Б. И. Кочелаева
и К. М. Салихова.
Казань: ФизтехПресс 2003 г.



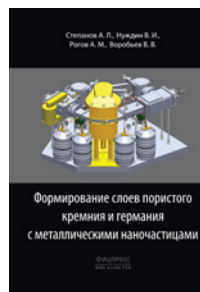
Казань и Российская академия наук

Историко-биографические
материалы. 2-е издание.
Под редакцией А. И. Коновалова.
Казань: ФизтехПресс 2005 г.



К. М. Салихов.
10 лекций по спиновой химии

Казань: Унипресс 2000 г.



Степанов А.Л., Нуждин В.И.,
Рогов А.М., Воробьев В.В.
Формирование слоёв
пористого кремния и германия
с металлическими наночастицами

Казань: ФИЦ КазНЦ РАН 2019 г.



Н. С. Барышев.
Свойства и применение узкозонных
полупроводников

Казань: Унипресс 2000 г.



Грани сотрудничества

К 10-летию Соглашения
о сотрудничестве между
Казанским и Гиссенским
университетами.
Сборник научных статей и обзорных
материалов.
Казань: Унипресс 1999 г.



Казанский научный центр
Российской академии наук

Издание посвящено 275-летию
Российской академии наук.
Казань: ФизтехПресс 1999 г.



Казанский физико-технический
институт имени Е. К. Завойского.
Краткий курс

Под общей редакцией
А. А. Калачёва.
Казань: ФизтехПресс 2016 г.



Российская академия наук.
Казанский научный центр.
Дорогами научных открытий

Издание посвящено 65-летию
Казанского научного центра РАН.
Казань: ФизтехПресс 2010 г.



Казанский физико-технический
институт имени Е. К. Завойского.
Исследования и разработки
2011–2015

Под общей редакцией
А. А. Калачёва.
Казань: ФизтехПресс 2016 г.



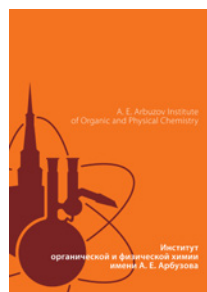
Федеральный исследовательский
центр "Казанский научный центр
Российской академии наук"

Казань: ФИЦ КазНЦ РАН 2020 г.



Казанский физико-технический
институт имени Е. К. Завойского.
Вып. 2.
Исследования и разработки
2016–2020

Под общей редакцией
К. М. Салихова.
Казань: ФИЦ КазНЦ РАН 2021 г.



Институт органической
и физической химии
имени А. Е. Арбузова.
65 лет

Казань: ФизтехПресс 2010 г.



Казанский институт биохимии
и биофизики. 65 лет

Казань: ФизтехПресс 2010 г.



Институт органической
и физической химии
имени А. Е. Арбузова.
70 лет

Казань: ФизтехПресс 2015 г.



Казанский институт биохимии
и биофизики. 70 лет

Казань: ФизтехПресс 2015 г.



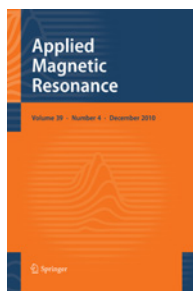
Институт органической
и физической химии
имени А. Е. Арбузова.
Ежегодник

Издаётся с 2003 г.



Казанский физико-технический
институт им. Е. К. Завойского.
Ежегодник

Издаётся с 2002 г.



Applied Magnetic Resonance

Международный журнал

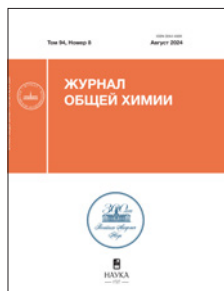
Springer VienaNewYork



EPR newsletter

Вестник Международного
общества ЭПР

The Publication of the International
EPR (ESR) Society



Журнал общей химии

Международный журнал
Российской академии наук

Москва: Наука

Стабильность – показатель мастерства, и Сергей Михайлович доказал всей своей деятельностью, что его профессионализм и мастерство достигли немыслимых высот. Для любой типографии работать с Сергеем Михайловичем – праздник. Никакой головной боли с “корявыми” файлами для печати, всё чётко и красиво. Его фирменный почерк!

Сергей Михайлович – перфекционист. Он ставит перед собой и сотрудниками высочайшие стандарты. Работать в команде с ним – это ежедневный вызов и напряжение всех своих способностей и знаний. И постоянное совершенствование. Как сказал поэт:

Ты – воплощенье совершенства,
Гармония – твой эталон.
Порядок строгий – верх блаженства,
Ты в этом виде чемпион!

Тебя мы трепетно лелеем,
Стараемся не раздражать,
И сил последних не жалеем,
Чтоб к идеалу ближе стать.

Его комментарии всегда по делу и обоснованы. Несомненно, у него педагогический талант, он щедро делится своими знаниями, объяснения его всегда детальны и исчерпывающи. Можно только восхищаться его терпением. Сергей Михайлович открыл секреты допечатной подготовки рукописей целой когорте учеников, для краткости назовём только сотрудников физтеха: Ольга Борисовна Яндуганова, Сергей Глебович Львов, Елена Николаевна Фролова, Диляра Вячеславовна Ильматова.

С. М. Ахмин пользуется заслуженным уважением среди сотрудников ФИЦа. Он не чурается общественной работы: несколько лет был председателем комиссии по трудовым спорам КФТИ, избирался в профком КФТИ, а с 1994 по 1995 годы исполнял обязанности председателя профкома КФТИ.

Сергей Михайлович отмечен многими благодарственными письмами и награждён Почётной грамотой РАН и Профсоюза работников РАН.

Дорогой Сергей Михайлович, поздравляем с юбилеем, желаем всего самого доброго Вам и Вашим близким, благодарим за чуткое и доброжелательное отношение, творческую атмосферу в коллективе. Вы обогатили нашу жизнь яркими впечатлениями, захватывающими рассказами, постоянной борьбой за совершенство и Вашим великолепным чувством юмора.

Many happy returns of the day!
Бодрости духа и тела!

От имени и по поручению нашей маленькой, но сплочённой команды соратников,

Л. В. Мосина

О моей благодарности Сергею Михайловичу Ахмину

В суете жизни часто не остаётся сил и времени вспоминать и говорить о чём-то очень важном. Исправить положение помогают знаменательные события.

Отчётный 2024 год был юбилейным для Сергея Михайловича. Чуть более 35 лет тому назад я стартовал с идеей создать международный журнал “Applied Magnetic Resonance”. Это было нечто типа “прыжка в омут” для начинающего пловца. В конечном счёте, сегодня уже выходит 56-ой том журнала, всё успешно развивается. Но всё это произошло не само собой. В значительной степени это стало результатом вдохновенной работы и Сергея Михайловича. Более того, я думаю, Сергей Михайлович дал хороший импульс повышению культуры печатной продукции не только в нашем институте и Федеральном исследовательском центре “Казанский научный центр Российской академии наук”, но и в Казани, и в мировом сообществе учёных в области электронного парамагнитного резонанса.

Я очень благодарен ему за всё, что он сделал для успешной реализации журнала “Applied Magnetic Resonance”.

Искренне желаю Сергею Михайловичу новых творческих удач и достижений.

К. М. Салихов

Интервью с Сергеем Михайловичем Ахминым в связи с его семидесятилетием

— Сергей Михайлович, поздравляем Вас с семидесятилетием. Спасибо за согласие ответить на несколько вопросов для нашего Ежегодника. Поскольку в Вашем докладе на торжественном мероприятии, посвящённом 25-летию Applied Magnetic Resonance (Ежегодник 2015, стр. 161–165). Вы уже детально рассказали о том, какие задачи Вам пришлось решать при реализации идеи Кева Минуллиновича Салихова, в нашем интервью мы сосредоточимся на других аспектах. Что определило Ваш выбор физфака КГУ для продолжения образования после окончания школы № 18 с углублённым изучением английского языка?

— Выбор физфака КГУ для продолжения образования после школы был предопределён рядом причин.

Так, уже в младшие школьные годы я очень любил мастерить и с большим интересом читал польский журнал “Горизонты техники для детей”, в котором популярно рассказывалось о явлениях природы, учёных и их открытиях. В те годы я обожал что-нибудь поджигать или взрывать, и со мной всегда были увеличительное стекло и спички.

Позже моим любимым журналом стал “Моделист-конструктор”, и я с увлечением строил модели самолётов, кораблей и подводных лодок по приводимым там чертежам. Мне доставляли радость дальность полёта или проплыва модели и точность её приземления или всплытия.

В то время, пока я учился в младших и средних классах и что-то взрывал или запускал с балкона или в котловане с водой, мой старший брат Александр увлекался сборкой радиоприёмников и передатчиков сначала на лампах, а потом на транзисторах и, когда я подрос, он научил меня паять, так что в старших классах к моим настольным журналам присоединился журнал “Радио”.

Следует отметить также, что в конце шестидесятых в моём сознании вокруг профессии физик сложился устойчивый романтический ореол. Тому способствовали первые пилотируемые полёты в космос, показ таких фильмов как “Девять дней одного года”, появление на телевидении передачи КВН и расцвет бардовской песни. В так называемом споре между физиками и лириками я был на стороне физиков, и это безусловно повлияло на мой выбор профессии.

Что касается углублённого изучения английского языка в школе, то с этим мне просто повезло. По понятным причинам школу № 18 выбирал не я, но я рад, что в третьем классе меня привели именно туда, и горд, что я окончил именно её. Да, конечно, мы изучали английский язык в большем объёме, чем в обычной школе, но при этом все остальные предметы нам также преподавали на самом высоком уровне. Однажды на школьном юбилее кто-то из поздравлявших чиновников сказал: “Школа № 18 специализируется на выпускниках для поступления в вуз”. Все улыбнулись, но по сути это была правда.

Так или иначе, я никогда не представлял своё будущее в публичном поле и всегда рассматривал знание английского языка лишь как исключительно полезное, но всё же дополнение к основной профессии, дающее вместе с тем и определённые преимущества.

— Чем запомнилась Вам работа во ВНИИгеолнеруде после получения диплома физика?

— Работа во ВНИИгеолнеруде была удивительным приключением, ставшим для меня, если угодно, введением в мир науки. В институт меня привёл мой приятель по университету Евгений Пермяков, который окончил физфак годом раньше и налаживал во ВНИИгеолнеруде исследования методом мёссбауэровской спектроскопии. В то время в стране активно внедрялись физические методы исследования самых разных материалов, и геологи не оставались в стороне. Минералы, привозимые ими из экспедиций, уже изучались в институте различными аналитическими методами, мне же было поручено организовать во ВНИИгеолнеруде изучение нерудных полезных ископаемых методом ЯМР.

На тот момент я смутно представлял себе, что такое ЯМР, и ничего не знал о минералах, но оказалось,

В лаборатории ВНИИгеолнеруда,
1980 год.



что в институте на балансе был малосерийный релаксометр ЯКР ИСШ-1 СКБ ИРЭ, который по каким-то причинам стоял в подвале кафедры МРС КГУ. Этот прибор перешёл в моё распоряжение, и начал я решение поставленной задачи с изучения аппаратной части проблемы. По понятным причинам за советами я обращался на кафедру минералогии геофака КГУ, где уже велись исследования минералов радиоспектроскопическими методами, и где мне, как “младшему брату” из родственного геологического института, охотно оказывали самые детальные консультации по всем вопросам. Поскольку предполагалось, что релаксометр ЯКР можно приспособить для изучения ЯМР, если дооборудовать его электромагнитом, то в скором времени я отправился в Черногоровку на Завод экспериментального приборостроения покупать магнит от РЭ-1306.

Когда магнит уже стоял рядом с консолью релаксометра, и я ломал голову над тем, что делать дальше, мне повезло. В институт в группу ЯМР, которую я представлял в гордом одиночестве, на работу был принят Раиль Наильевич Зарипов, как впоследствии оказалось, талантливый радиоинженер и замечательный человек. Нас стало двое, и теперь уже с удвоенным энтузиазмом мы стали внедрять метод ЯМР во ВНИИгеолнеруде. Поскольку ВНИИгеолнеруд до 1963 года был геологическим институтом КФАН СССР, и его лаборатории исторически размещались в главном здании КФАН на ул. Лобачевского, то именно там нам была выделена комната 162 в подвале рядом со столовой.

Построение лаборатории мы начали с ремонта комнаты, подводки электрических кабелей и шлангов для охлаждения магнита. Все работы планировали и выполняли самостоятельно. Вскоре мы перетащили релаксометр из подвала КГУ и занялись его освоением. Нас никто особо не подгонял, мы работали в своё удовольствие, но увлечённо и с большим интересом, искренне полагая, что находимся на переднем крае советской науки. Мы с упоением совершенствовали спектрометр, переделывая или заменяя его фабричные блоки на самодельные. В итоге от фабричного прибора осталась лишь красивая консоль с блоками питания, и даже магнит от РЭ-1306 был заменён на более мощный. Позже, чтобы добро не пропадало, на маленьком магните от РЭ-1306 Раиль собрал автодинный спектрометр ЯМР широких линий.

Финальным этапом нашего “творения” стала автоматизация импульсного спектрометра на базе микро-эвм ДЗ-28. Это было моё первое знакомство с компьютерной техникой и языками программирования. И, пока Раиль

продолжал совершенствовать свою любимую высокочастотную часть спектрометра, я с головой погрузился в мир микросхем, ЦАПов и АЦП. Задача автоматизации была успешно решена, и в процессе её решения я узнал, что такое компьютер, и приобрёл бесценный опыт его применения, пригодившийся мне в дальнейшем.

Хотя большую часть своего служения во ВНИИгеолнеруде я ассоциирую с организацией лаборатории, её оснащением и постройкой совершенного по меркам того времени релаксометра, это не означает, что мы не пробовали изучать реальные геологические объекты. Нашим куратором был доктор геол.-минерал. наук Марк Владимирович Эйриш, специалист по глинистым минералам. С его подачи мы начали изучение минералов с глины с красивым названием монтмориллонит. Эта глина является отличным сорбентом и, разбухая, способна удерживать большое количество воды. Изучению свойств этой связанной воды и были посвящены наши первые робкие эксперименты. Первая публикация, а точнее, тезисы на Всесоюзной конференции от нашей группы появились в 1980 году, то есть через три года после начала работ по внедрению ЯМР во ВНИИгеолнеруде. В том же году нам неожиданно назначили начальника. Им оказался Валерий Афанасьевич Гревцев, кандидат физ.-мат. наук, по каким-то причинам сменивший кафедру МРС КГУ на ВНИИгеолнеруд.

Методы руководства Валерия Афанасьевича были непривычны и, хотя с его появлением количество публикаций прибавилось, мы потеряли свободу в принятии решений, а поскольку регулярно были вынуждены помогать ему добираться до дома после “тяжёлого” трудового дня, его авторитет в наших глазах был невелик. Вскоре во ВНИИгеолнеруд трудоустроился Виктор Филиппович Крутиков, и вместе с ним в комнате 162 появился спектрометр ЭПР. Становилось тесновато. И в комнате, и в голове. Пришло понимание того, что романтика первых свершений заканчивается, наступает рутина, и что надо что-то менять. Немаловажным мотивом к изменениям была и потребность в росте материального благосостояния семьи. К тому времени мои сверстники по университету

начали защищать диссертации, и я решил, что, видимо, это и есть тот правильный путь, которым надо идти. Не будучи искушённым в вопросе защит диссертаций, я получил первые вводные от Виктора Филипповича Крутикова, который объяснил, что первым делом мне надо найти научного руководителя.

Имея в своём распоряжении релаксометр ЯМР, я начал искать научного руководителя среди специалистов, занимавшихся ЯМР или заинтересованных в этом методе исследования. По понятным причинам первым, к кому я обратился, был Владимир Михайлович Винокуров, заведующий кафедрой минералогии КГУ. Владимир Михайлович с пониманием отнёсся к моим устремлениям, но глинистая тематика его не привлекала, а ничего другого он предложить не смог, хотя и обещал подумать. Позже я встречался с Владимиром Дмитриевичем Федотовым, будущим директором КИББ, на тот момент профессором кафедры физики КХТИ. Владимир Дмитриевич изучал динамические свойства молекул воды в полимерах и вполне мог стать моим научным руководителем, однако именно в то время он переходил из КХТИ в институт биологии, и решение о моей возможной аспирантуре при его научном руководстве было отложено на неопределённый срок.

Продолжая работать во ВНИИГеолнеруде, я не скрывал своих намерений, что, по счастью, и привело к тому, что научный руководитель нашёл меня сам. Им был Владимир Павлович Мейкляр, старший брат моего друга по университету Миши. Именно Владимир Павлович пригласил меня в Казанский физико-технический институт и на последующие пять лет стал моим другом и наставником.

– Какие результаты Вашей научной работы наиболее Вам дороги и почему?

– Моя по-настоящему научная, а точнее, научно-исследовательская работа началась с поступления в очную аспирантуру Казанского физико-технического института. Вариант с поступлением в аспирантуру мне предложил Владимир Павлович Мейкляр, который на тот момент подумывал о написании докторской диссертации и был заинтересован в руководстве аспирантами. Поскольку сам он не обладал правом иметь аспирантов, он уговорил Юрия Васильевича Яблокова, заведующего лабораторией ЭПР твёрдого тела, стать моим руководителем на условиях их совместного руководства. Когда директор института Максуд Мухамедзянович Зарипов узнал, что в отраслевом институте я осваивал метод ЯМР, он выразил сомнение в успехе моей аспирантуры, но заявление о приёме подписал. Так я попал в физтех. С того момента моя жизнь круто изменилась, но я ни разу об этом не пожалел.

Первое посещение физтеха произвело на меня неизгладимое впечатление. Институт оказался большой и солидной организацией со своей хорошо отлаженной научной инфраструктурой. Меня поразило тогда наличие собственного машинного зала с современной по меркам того времени вычислительной машиной ЕС 1033 и прекрасно оборудованной экспериментальной мастерской, сравнимой

по своим размерам и возможностям с заводским цехом. Когда же я побывал в огромном гелиевом зале и узнал о назначении серых труб под потолком в коридорах, я осознал значительность и уровень исследований, проводимых в институте и понял, что сомнения, высказанные Максудом Мухамедзяновичем, были отчасти справедливы.

В лаборатории ЭПР твёрдого тела меня встретили доброжелательно, выделили стол в комнате 223 прямо напротив машинного зала, и я приступил к своим новым обязанностям. Прибор, на котором мне предстояло работать, был советским промышленным спектрометром ДЭЯР ЭЯ-1302 и располагался на первом этаже в комнате 115, там же было рабочее место моего руководителя Владимира Павловича Мейкляра. Поскольку конечной целью аспирантуры было написание диссертации, одну из глав он предложил посвятить популярной тогда теме автоматизации спектрометра. В нашем случае под автоматизацией подразумевалась оцифровка сигнала ДЭЯР в режиме реального времени и запись спектра в память микро-эвм для дальнейшей его численной обработки. Поскольку у меня был опыт сопряжения релаксометра с микро-эвм ДЗ-28 и я располагал всеми необходимыми схемами, мне не составило труда повторить свои же наработки.

Что касается экспериментальной части, то как раз во время моей аспирантуры Владимир Мейкляр начал свои первые исследования методом ДЭЯР лигандных и сверхтонких взаимодействий примесных парамагнитных ионов в новом классе соединений, в кристаллах двойных и тройных хлоридов. Володя был талантливым физиком-экспериментатором, но при этом он был ещё и очень красивым и харизматичным человеком. Его целеустремлённость и уверенность в успехе и поражали, и заражали одновременно. Ближайшим сторонником амбициозных планов Володи по изучению нового класса соединений был сотрудник лаборатории ЭПР твёрдого тела Александр Евгеньевич Усачёв.

В то время Александр Усачёв был непревзойдённым мастером по выращиванию монокристаллов методом Брижмена в институте и, несмотря на собственную научную тематику, с большим энтузиазмом взялся за выращивание монокристаллов галогенидов со структурой эльпасолита для исследований, предложенных Володи Мейкляром. Кристаллы росли по несколько суток, а то и недель, и не всегда получались сразу, но Саша Усачёв удивительным образом добивался результата и в итоге обеспечил образцами все проведённые эксперименты по изучению кристаллов хлоридов методом ДЭЯР.

На мою долю выпала самая ответственная работа. Я должен был обеспечивать так называемые “заливки”, дни, когда проводилась работа на спектрометре, своевременно подвозить из гелиевого зала и возвращать обратно “банки” с жидким гелием. Также в зоне моей ответственности были колоды перфокарт, которые надо было вовремя передавать в машинный зал, а затем забирать распечатки с результатами расчётов. Постепенно я был вовлечён в расшифровку спектров ДЭЯР, написание статей и выступления на семинарах. Однажды мне даже доверили

свозить на ремонт наш рабочий криостат в харьковский Физико-технический институт низких температур.

Три года аспирантуры пролетели незаметно, а диссертация, как водится, не была готова. Несмотря на это, меня оставили в лаборатории, и работа была продолжена. Уже были получены и опубликованы хорошие результаты, некоторые из них были получены впервые, но только при написании обзора и самой диссертации я начал понимать значимость проведённых исследований. Пока я разбирался с тем, что было намерено, и приводил свои знания в порядок, Володя Мейкляр и Саша Усачёв уже планировали изучение очередного нового класса соединений – бромидов. Под эту задачу в аспирантуру была принята Светлана Викторовна Юртаева.

Так совпало, что события, о которых идёт речь, происходили на фоне проходившей в стране горбачёвской перестройки. Жизнь менялась стремительно. В институте появились первые персональные компьютеры IBM PC/XT и прошли первые в истории физтеха выборы директора. Однако уже ощущались перебои с финансированием и ожидалось вынужденное сокращение. Сотрудники как могли приспосабливались к реалиям рыночной экономики, и никто тогда не знал, какие повороты судьбы ожидают всех и каждого в ближайшие два года.

В конце 1990 года я наконец защитил кандидатскую диссертацию, и первое, что я тогда испытал, было чувство большого облегчения от того, что не опозорился, рассказал всё достойно и не подвёл своих теперь уже коллег Владимира Павловича Мейкляра и Александра Евгеньевича Усачёва, которые фактически делегировали мне право изложить результаты нашей большой совместной работы. Следом пришло ощущение свободы и уверенности. Казалось, что теперь я запросто могу защитить ещё не одну такую диссертацию.

В 1991 году неожиданно для всех Володя Мейкляр уехал в Израиль, и Светлана Юртаева продолжила свою работу под руководством Саши Усачёва. Я как мог им помогал, но про бромиды мы так и не вспоминали. С Юрием Васильевичем Яблоковым мы обсуждали возможные варианты новых исследований в лаборатории с моим участием, но всё так-то не складывалось. К тому моменту я уже был вовлечён в работу над первым выпуском “Applied Magnetic Resonance”. Я и не думал тогда, что это надолго, но постепенно, вникая всё глубже в тонкости допечатной подготовки, я открывал для себя новую и удивительно интересную область знаний, которая увлекла меня настолько, что со временем стала моей основной профессией.

Марьям Ильгизаровна Ибрагимова. К 70-летию со дня рождения

6 ноября 2024 года исполнилось 70 лет нашему коллеге, старшему научному сотруднику, кандидату физико-математических наук Марьям Ильгизаровне Ибрагимовой.

В 1977 году Марьям Ильгизаровна окончила престижную школу № 131 г. Казани, затем поступила и успешно окончила дневное отделение физфака Казанского государственного университета им. В. И. Ульянова-Ленина по специальности радиофизика. Далее работала в вычислительном центре КГУ. В 1979 году была принята в лабораторию ФТТ в группу ИЛУ КФТИ. В 70-е годы прошлого века ионная имплантация была молодой и перспективной в прикладном отношении областью научных исследований, а руководитель группы ИЛУ И. Б. Хайбуллин был очень энергичным и деятельным человеком, стремящимся развивать в институте ионную имплантацию в различных направлениях. В частности, у нас были налажены хорошие связи с Государственным институтом прикладной оптики. Одной из актуальных задач оптоэлектроники, над которой работали сотрудники ГИПО, являлось создание фотоприёмников для ИК области излучения на основе узкозонных полупроводников



Марьям Ильгизаровна Ибрагимова

КРТ и МРТ (твёрдые растворы кадмий-ртуть-теллур и марганец-ртуть-теллур). Эти полупроводники определённого состава обладают прекрасными фотоэлектрическими характеристиками, однако имеют и существенный недостаток, связанный с выращиванием кристаллов нужного состава. Поэтому процент выхода годных кристаллов небольшой, а это сказывается на их цене. Перед Ибрагимовой М.И. была поставлена очень непростая задача по управлению составом и фотоэлектронными свойствами кристаллов КРТ и МРТ с использованием ионной имплантации. Ею



Сотрудники группы ИЛУ. 1985 г. М. И. Ибрагимова, И. Б. Хайбуллин, Г. Г. Закиров, Куличков В., И. А. Файзрахманов, В. Ю. Петухов, В. И. Нуждин, Я. В. Фаттахов, Д. А. Коновалов.

был проведён большой комплекс исследований, получены интересные, практически значимые и оригинальные результаты. По ним были опубликованы статьи, получены авторские свидетельства, сделаны доклады на научных конференциях различного уровня, а в 1991 году была защищена кандидатская диссертация.

После развала СССР и ликвидации отраслевых институтов или их тематик М. И. Ибрагимова резко сменила область научных интересов. Непросто одной фразой сформулировать их. Но, наверное, их можно объединить методикой исследований и в определённом смысле объектами исследований: ЭПР и живые организмы. Особо надо отметить, что эти направления исследований она определила самостоятельно. В рамках МНТЦ был получен большой международный грант, который касался разработки радиопротекторов. Случилась катастрофа на атомной станции в Чернобыле и такие препараты были весьма востребованными и поэтому работы по ним велись во многих научных центрах. После завершения этого проекта М. И. Ибрагимовой совместно с Республиканским онкологическим центром были выполнены поисковые

исследования по возможности выявления онкологических заболеваний различной локализации на ранней стадии с использованием ЭПР крови. Актуальность таких исследований не вызывает сомнений. Наконец в последние годы Марьям Ильгизаровной проводятся работы по ЭПР исследованиям крови спортсменов. Их цель – выявить применение допинга спортсменами.

Многие сотрудники института хорошо знают Марьям Ильгизаровну. Она общительный и доброжелательный человек, обладает хорошими организаторскими способностями, большим кругозором, широкой областью интересов, которая не ограничивается только наукой. Это и художественная литература, история, живопись, архитектура, религия. Есть и хобби – это экскурсии, путешествия. Объездила много стран и континентов!

Хочется пожелать ей от большого коллектива отдела здоровья дальнейших научных достижений, интересных путешествий и, главное, не терять любопытства ко всему, что нас окружает!

И. А. Файзрахманов

Памяти...

Памяти Ады Наумовны Спиваковской

2024... високосный год. Когда мы это произносим, то исподволь гоним мысль о том, что такой год выдаётся особенно сложным... Не стал исключением и этот год. Не стало Ады Наумовны Спиваковской. Нашей Адочки. Она запомнилась всем жизнерадостным и жизнелюбивым человеком, несмотря на то, что последние месяцы жизни она была прикована к постели. Я часто вспоминаю её отношение ко всему в этой жизни. И в работе, и в бытовых ситуациях она умела найти подход к человеку или освоить новый для неё процесс. Её житейская мудрость всегда была ненавязчива, но очень кстати применима. Она как-то умела “сохранять своё лицо”, всегда имела своё собственное мнение, которое готова была отстаивать в любых спорах и дискуссиях. Она была непреклонна в своих взглядах и считала недостойным быть “флюгером”, принимающим любое выгодное здесь и сейчас положение. И это выражалось во всём. Она гордилась, что несмотря на все “неприятности” сулимые так называемой “пятой графой”, она никогда и ни при каких обстоятельствах не меняла ни своей национальности, ни своих политических взглядов. Чем больше проходит времени без неё, тем больше я ощущаю, каким неординарным и “штучным” был этот человек. Таких людей невозможно забыть и очень нелегко терять. С ней можно было разговаривать часами... и об истории института, и о литературе, и об искусстве. Её мнения и оценки всегда интересовывали, стимулировали перечитать, переосмыслить. Она высказывала их очень тактично, без нажима, не настаивая на своей правоте. И, наверное, поэтому к ней тянуло, хотелось прислушиваться, общаться. Она умела говорить по делу,



Ада Наумовна Спиваковская
(2.06.1941–20.04.2024)

умела промолчать и умела выслушать. Её эрудированность, безупречная грамотность, которую многие хорошо знают, позволила ей очень многим помочь в наборе и правке текстов и формул в научных статьях, работах и диссертациях.

Ада Наумовна – дитя войны, жертва Холокоста. Её жизнь началась при весьма трагических обстоятельствах – война, голод... Но она никогда на это не жаловалась. Не жалела себя. Она умела принимать жизнь такой, какая она есть, радоваться ей и любить. Даже тогда, когда тяжёлая и изнурительная болезнь потихоньку одолевала, она не жалела себя, а стойко переносила все невзгоды и тяжести. Она была очень мужественным человеком, со своим собственным стержнем внутри. Умела любить и поддерживать. И теперь её очень не хватает... моей “второй” мамы... Спасибо за всё!

Г. Э. Фалина

Памяти Станислава Александровича Мигачёва

В июне 2024 года ушёл из жизни Станислав Александрович Мигачёв, которому 19 августа 2024 г. исполнилось бы 77 лет. Вся научная жизнь старшего научного сотрудника КФТИ Станислава Александровича Мигачёва была неразрывно связана с нашим институтом. В 1965 году он поступил на физический факультет Казанского государственного университета, который окончил в 1970 году, специализируясь на кафедре радиоспектроскопии и квантовой электроники, и в этом же году поступил в аспирантуру КФТИ, отдел квантовой акустики. В дальнейшем он прошёл в нашем институте славный научный путь начиная от инженера до старшего научного сотрудника. В 1982 году Станислав Александрович Мигачёв стал кандидатом физико-математических наук, защитив диссертацию в Казанском государственном университете им. В. И. Ульянова-Ленина.

Станислав Александрович вёл активную научную деятельность, им опубликовано более 80 статей в общесоюзных, общероссийских и международных научных журналах и получено в соавторстве четыре авторских свидетельства на изобретения и два патента. Он награждён знаком «Изобретатель СССР». Являлся руководителем либо консультантом по выполненным и успешно защищённым пяти кандидатским диссертациям.

Научная деятельность С. А. Мигачёва была многогранной. В течении ряда лет он исследовал электронные структуры оксидных нелинейных кристаллов для квантовой электроники. Большое место в его научной биографии занимают экспериментальные исследования по изучению магнито-акустических свойств легкоплоскостных антиферромагнетиков, имеющих перспективы использования в качестве рабочих тел управляемых магнитным полем акустооптических устройств. Особо следует отметить



Станислав Александрович Мигачёв
(19.08.1947–07.06.2024)

экспериментальное обнаружение и исследование ряда новых эффектов, подтверждающих основные теоретические положения о роли антиферромагнитного упорядочения в акустике и акустооптике сильных магнетиков.

При исследованиях в этом направлении в легкоплоскостном антиферромагнетике $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ были обнаружены поворот плоскости поляризации прошедшей через образец поперечной волны, превращение линейно поляризованной волны в эллиптически поляризованную, акустооптическая дифракция света на звуке, обусловленная магнитоупругой модуляцией поляризации нормальных оптических мод. Многие годы С. А. Мигачёв сотрудничал с М. И. Куркиным из Института физики металлов УрО РАН. В рамках их сотрудничества были осуществлены детальные исследования поведения квазиакустической ветви спиновых волн вблизи магнитного ориентационного фазового перехода по давлению магнитоакустическими методами.

Заметное место занимают прикладные исследования, выполняемые совместно с рядом организаций Минэлектронпрома, Минрадиопрома и других министерств и ведомств СССР. Основные из них: «Исследование

Восстановлено
автоматом "микроформная
Соборкина" ИБД

Союз Советских
Социалистических
Республик

**О П И С А Н И Е
ИЗобрЕТЕНИЙ**

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

(11) 480972

(61) Дополнительное к авт. свид-ву –
(22) Заявлено 24.07.73 (21) 1948480/24-25
с присоединением заявки № –
(23) Приоритет –
(43) Опубликовано 05.11.77, Бюллетень № 41
(45) Дата опубликования описания 23.11.77

(51) М. Кл. ³ Ф 01 Н 27/78

(53) УДК 539.193.538.07
.083.2 (088.8)

(72) Авторы
изобретения Н.А.Шанухов, В.А.Головкин-Кутузов и С.А.Мигачёв

(71) Заявитель
Физико-технический институт Казанского
филиала АН СССР

(54) ЧЕРКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ
АТОМНЫХ ЯДЕР

Союз Советских
Социалистических
Республик

**О П И С А Н И Е
ИЗобрЕТЕНИЙ**

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

(11) 524122

(61) Дополнительное к авт. свид-ву –
(22) Заявлено 09.04.74 (21) 2019770/25
с присоединением заявки № –
(23) Приоритет –
(43) Опубликовано 05.08.76, Бюллетень № 29
(45) Дата опубликования описания 05.11.76

(51) М. Кл. ³
G 01 N 27/78

(53) УДК 539.193.538.
.69.083.2 (088.8)

(72) Авторы
изобретения В. А. Головкин-Кутузов и С. А. Мигачёв

(71) Заявитель
Физико-технический институт Казанского филиала АН СССР

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ДЕФОРМАЦИИ
ОБРАЗЦА В АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЕ

Мастер спорта по подводному ориентированию добычу всегда найдёт.



фотоиндуцированных лазерным излучением эффектов в активных материалах”, “Разработка методов повышения стойкости кристаллов к длительному воздействию оптических и электрических полей”, “Разработка акустических селективных фильтров радиосигналов”.

В 2011 году за цикл работ “Исследование и практическое применение эффектов взаимодействия акустических волн с квантовыми системами в кристаллах” Мигачёву С.А. в составе научного коллектива присуждена Государственная премия РТ в области науки и техники.

В течение ряда лет С. А. Мигачёв плодотворно сотрудничает с сотрудниками кафедры промышленной электроники КГЭУ. Под его руководством там была разработана и создана установка для исследований оптоакустическим методом. По результатам применения методов оптоакустики для целей дефектоскопии сотрудниками кафедры успешно защищены две кандидатские диссертации.

В последнее время Станислав Александрович успешно вёл экспериментальные исследования оптических, фотопроводящих и диэлектрических свойств неупорядоченных сегнетоэлектриков, в том числе релаксоров и слаболегированных манганитов. Он принимал участие в работе по многим проектам РФФИ и по двум проектам РНФ. Во всех своих начинаниях он проявлял профессиональное отношение к научной работе. Приятный в общении, С. А. Мигачёв очень доброжелательно относился ко всем коллегам. Всегда был готов к научным обсуждениям, мог помочь в подготовке экспериментов как советом, так и каким-нибудь недостающим оборудованием или

прибором. Он изготавливал уникальное научное оборудование, потому что обладал большим научным опытом, и поскольку он давно прекрасно освоил специальности и токаря, и фрезеровщика. Например, ему не составляло труда единолично изготавливать различные криостаты, в том числе с оптическими окнами.

Нельзя не отметить, что в молодые годы С. А. Мигачёв был ведущим спортсменом-подводником Татарстана, лидером сборной республики, первым мастером спорта СССР в Татарстане по наиболее сложному виду подводного спорта – подводному ориентированию. Многие годы до самого последнего времени он передавал свой опыт молодым пловцам, занимаясь с ними и в бассейне, и на открытой воде. Многолетняя плавательная подготовка и навыки в подводном ориентировании позволили ему стать суперпрофессионалом в хобби, которые увлекло его на многие годы – подводной охоте. Один из осенних месяцев он непременно проводил на озёрах и протоках, в районе Нижнекамского водохранилища. И непременно уловом его были огромные сомы (на снимке не самый большой экземпляр), причём добычи хватало, чтобы угощать всех своих друзей и коллег в течение всей зимы. Среди его друзей и сослуживцев ходила устойчивая легенда, что во время вылазок на природу Станислав Александрович успеваеет настрелять два ведра рыбы в любом водоёме, пока его товарищи всё ещё пытаются разжечь костёр.

Коллеги и друзья будут помнить о научных и спортивных достижениях Станислава Александровича долгие годы.

Р. Ф. Мамин, В. Ф. Тарасов, А. М. Шегеда

Памяти Игоря Васильевича Овчинникова

“Человек обязан стремиться к счастью, у него должна быть установка на счастье и ни при каких условиях нельзя сдаваться”.

Л. Ландау

*“Я за гармонию, союз
Любви, науки, спорта, муз”.*
ИВО

12 июля 2024 года скончался профессор, доктор физико-математических наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации и Республики Татарстан, лауреат Государственной премии Республики Татарстан, лауреат медали за заслуги перед РТ и медали 300 лет РАН Игорь Васильевич Овчинников, основоположник нового научного направления – магнитные жидкие кристаллы на основе координационных соединений. Основные этапы его научной деятельности освещены в публикациях Ежегодника КФТИ за 2005, 2010, 2015, 2020 гг. [1–4]. В этой статье мы хотели немного рассказать о нём самом, основываясь на его рассказах о жизни, воспоминаниях сотрудников и близких.

Игорь Васильевич родился в Казани 20 сентября 1935 года. Отец, Василий Фёдорович, работал корреспондентом ТАСС, и семья переехала за ним из Татарстана в Тамбов. В начале Великой Отечественной войны Василий Фёдорович ушёл на фронт. Пятилетний Игорь с мамой, Верой Сергеевной, и двухлетней сестрой Светланой оставались в Тамбове. Фронт приближался быстро, город начали бомбить, и Овчинниковы эвакуировались в Омск. Мама работала на заводе – ей самой в то время было только 25 лет. Маленький Игорь присматривал за младшей сестрой, сам водил её в детский сад. Жили тогда в коммуналке – одной квартире на несколько семей, очень бедно, голодали. По воспоминаниям Игоря Васильевича, он всё время хотел есть. Вера Сергеевна работала целыми днями, чтобы заработать на какую-то еду. Иногда приносила пару зелёных картофелин из заводской столовой, чтобы хоть немножко накормить детей... А он всё время мечтал о хлебе – засыпал, просыпался и всё время мечтал, чтобы у него хлеб был. Однажды он заболел, был при смерти. Организм был слишком обессилен и врач сомневался, что ребёнок выживет. Тогда пришли на помощь соседи. Зарезали единственную свою курицу и несколько чашек куриного бульона буквально вернули мальчика к жизни. От того лихолетья у него остались неисчерпаемая воля к жизни и отношение к хлебу. В доме всегда должен быть хлеб, хоть немножко, пусть чёрствый, но хлеб должен быть. И ещё обеды, обеды. Кормили в доме Игоря Васильевича всегда, даже если люди приходили по делу или “на минутку”. Обязательно приглашали за стол, потчевали обедом, угощали чаем или чем-то ещё.

По воспоминаниям Игоря Васильевича, детство для него началось только после войны, когда в 1946 году был



Игорь Васильевич Овчинников
(20.09.1935–12.07.2024)

демобилизован отец и семья снова вернулась в Казань. Младший брат его, Василий, родился уже в Казани.

Овчинниковы поселились в коммуналке в доме у сада Эрмитаж. Там же он играл с мальчишками, они “бежали, хулиганили и глупости делали”. Бывало били его, дразнили за необычную внешность. Он дрался и всегда “давал сдачи”. Наверное, тогда и закалялся характер Игоря Васильевича: всегда готов к защите, к ответу на вызов. И позже, уже в научных спорах – было видно, как загораются его глаза, внутри его словно собирается какая-то пружина, и он с азартом парирует выпады оппонентов. Атаки всегда его оживляли, заставляли действовать быстро и решительно.

Учился Игорь Васильевич в мужской школе № 10 неподалёку от дома. Там с другом-одноклассником Лёнкой перепробовали все кружки какие только можно было. Куда они только не записывались, куда они только не ходили. На великах гоняли к Ленинской дамбе, на огороды, помогать родителям – тогда важное для семьи подспорье было. Тогда же он подружился с Роальдом¹ и Рустемом². В школе он учился хорошо и всегда старался быть лидером. Игорь Васильевич рассказывал, что, как-то раз им задали писать сочинение, и кто-то сделал сочинение в стихах. А он сказал, что тоже вот так же напишет. И сочинил целую поэму, чтобы быть

¹ Роальд Зиннурович Сагдеев – советский и американский физик. Академик РАН, АН СССР, директор Института космических исследований АН СССР (1973–1988 гг.). Герой Социалистического Труда, Советник Генерального секретаря ЦК КПСС М. Горбачёва по вопросам космонавтики и военных космических систем. Профессор, директор Центра “Восток-Запад” Университета штата Мэриленд, США, эксперт НАСА, член Наблюдательного совета Международного Люксембургского форума по предотвращению ядерной катастрофы.

² Рустем Абдуллович Сайфуллин – скрипач, ансамблист, профессор, заслуженный деятель искусств РТ, солист Тат. филармонии и квартета “Кантилена”.

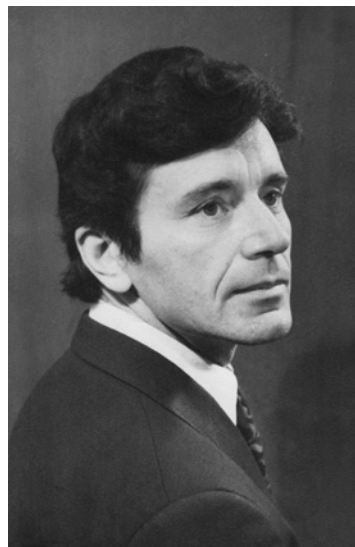


С друзьями. Игорь Васильевич во втором ряду справа.

первым. Стихи, эпиграммы и весёлые шаржи были его коньком и в зрелом возрасте. Юбилеи и дни рождения, праздники и самые разные события получали своё отражение в его рифмах.

Среднюю школу Игорь Васильевич окончил с серебряной медалью. В 1953 г. поступил на физико-математический факультет Казанского госуниверситета. Там уже вдруг стали говорить, какой он красавец. И его необычная внешность, делавшая его похожим на зарубежного артиста, напрочь “сносила головы” дамам. Во время учёбы Игорь Васильевич был членом факультетского Бюро ВЛКСМ, активно занимался спортом, ходил в походы, в горы, ездил на Кавказ, в Казахстан. Выбор видов спорта был тоже отражением его натуры – всегда скорость, ловкость, вызов. Бокс, гимнастика, альпинизм, волейбол, бадминтон. В бадминтон он начал играть одним из первых в Казани. Увидел игру – и влюбился в неё. Вместе с Фаридом Валеевым³ они нашли где-то правила игры и научились играть превосходно. Вот эти две страсти – бадминтон и волейбол прошли с ним через всю жизнь.

По окончании учёбы в 1958 году Игорь Васильевич поступил в аспирантуру кафедры теоретической физики



И. В. Овчинников

КГУ, затем работал младшим научным сотрудником в Институте органической химии АН СССР. Безусловной звездой небосклона теоретической физики того времени являлся Лев Давидович Ландау и Игорь Васильевич был увлечён его яркой личностью. Он стал поклонником “формулы счастья” Л. Д. Ландау, согласно которой в жизни человека три компоненты – работа, любовь и общение – должны находиться в балансе и что первейшая обязанность каждого человека – быть счастливым. Отсутствие любой из этих компонент нарушает душевную гармонию и лишает человека чувства удовлетворения. Каждый должен сделать счастливыми своих близких.

Первый и самый главный пункт – это работа, чтобы развиваться самому и приносить пользу другим. И в работе Игорь Васильевич был очень успешен [1, 4]. В 1963 году он защитил кандидатскую диссертацию. В 1964 году он был избран по конкурсу на должность доцента кафедры теоретической физики КГУ, а в 1966 году ему уже присвоено звание доцента. Как один из лучших учеников Семёна Александровича Альтшулера, в 1972 году он был приглашён на работу в КФТИ в лабораторию члена-корреспондента АН СССР Бориса Михайловича Козырева на должность старшего научного сотрудника и возглавил группу из пяти человек. К моменту принятия руководства лабораторией в 1979 году он стал одним из ведущих специалистов СССР в области радиоспектроскопии координатных соединений. Им было опубликовано 90 работ в центральных советских и зарубежных научных журналах. Под его руководством было подготовлено восемь кандидатов наук. Работая в КФТИ, Игорь Васильевич продолжал вести активную педагогическую работу в КГУ: читал несколько лекционных курсов, работал по совместительству на должности доцента, руководил курсовыми и дипломными работами студентов.

Игорь Васильевич успевал заниматься и общественной работой. Был членом комиссии научного совета АН

³ Фарид Габдуллович Валеев – тренер по бадминтону, кандидат педагогических наук, заслуженный работник физической культуры РТ, основоположник бадминтона в РТ. Открытая в 2017 году Республиканская спортивная школа по бадминтону носит имя Фариды Валеева, с 2016 года в Казани ежегодно проводятся Всероссийские соревнования среди юниоров и взрослых “Кубок Ф. Г. Валеева”.

СССР по неорганической химии, членом научного совета КФТИ, членом совета по защите диссертаций при КГУ, заместителем председателя НТО им. А. С. Попова КФТИ, заместителем председателя экспертной комиссии института и членом жилищно-бытовой комиссии месткома КФТИ, активно участвовал в работе философских семинаров, методических конференциях, избирательных кампаниях и, конечно, являлся активным участником спортивных мероприятий. За свою научную и общественную деятельность он был неоднократно отмечен благодарностями и занесён на доску почёта института.

Руководя группой, а потом и всей лабораторией, Игорь Васильевич всегда доверял своим сотрудникам. Он не стоял “над душой” – очень ценил инициативу и новые идеи. Он давал задание и давал свободу. И для него было важно, чтобы человек приносил результат, а всё остальное для него было как-то несущественно. Он никогда не торопил. Если был вопрос, Игорь Васильевич никогда его не решал в тот же момент, не принимал скоропалительных решений. У него не было резкого деления на “чёрное и белое”. Он всегда был вежлив, не хотел никого обидеть, и никогда не говорил о человеке плохо. Мы не могли вспомнить, чтобы он когда-нибудь повышал голос, а ведь столько лет вместе поработали. Два раза только он высказал своё недовольство действиями сотрудников, сказал тихо, но настолько жёстко, что присутствующим стало не по себе. Но если он к человеку хорошо относился, то недостатков не видел, готов был поддерживать и помогать.

Любовь и общение – это ещё две важнейших компоненты “формулы счастья”. Игорь Васильевич был обаятельным, интересным собеседником для всех, кто с ним близко соприкасался. Он был очень эрудирован и обладал прекрасным чувством юмора. Он мог говорить на любую тему, буквально о чём угодно, мог тактично промолчать и уметь оставить впечатление. На базе отдыха, когда он там отдыхал, его сотрудникам завидовали, говорили: “Ой, как вам повезло, какое счастье, что вы с ним работаете, что вы с Игорем Васильевичем общаетесь каждый день”. У него было много друзей, начиная со школьных и студенческих лет. Он был постоянен в своей дружбе, сохранял её через года. К другу-однокласснику Лёнке, который на склоне лет болел и жил в одиночестве, Игорь Васильевич приходил и заботился о нём до самой кончины.

И в любви – если он кого-то “в голову положил”, то уже не “выкладывал”. Со своей будущей женой, Изабеллой Павловной Буниной, он познакомился в студенческой компании, и, женившись в 1960 г., прожил с ней более шестидесяти лет. Игорь Васильевич очень любил свою дочь Олю. Она была талантлива, писала стихи. Игорь Васильевич был сильно ранен её болезнью, но никогда не жаловался, и сотрудники не знали, только догадывались об этом. Он не любил, чтобы люди со стороны видели, что у него есть проблемы, и никогда не предавался унынию. После ранней смерти Оли Игорь Васильевич нашёл в себе силы собрать и издать поэтический сборник дочери [5].



И. В. Овчинников и А. Р. Кессель

Двери дома Игоря Васильевича и дачи в Крутушке были открыты для сотрудников, друзей семьи, друзей Оли. У них бывали известные люди, музыканты и поэты. Ещё в молодости сложилась замечательная команда, которую сами участники называли “Физики-Лирики”. От физиков в неё входили близкие друзья Игоря Васильевича: Александр Рахмиэлевич Кессель⁴ и Владимир Дмитриевич Федотов⁵, музыкантов представляли семья Эры Абдулхаковны⁶ и Рустема Абдулловича² Сайфуллиных, Маргарита Яковлевна Коварская⁷ и др. Игорь Васильевич не только писал стихи сам, у него была превосходная память на стихи и песни. Он замечательно пел и петь очень любил, особенно романтические неаполитанские песни – голос был у него хороший. И в небольших вокальных баталлиях – кто лучше? – всегда стремился побеждать.

Игорь Васильевич был ценителем классической музыки, особенно любил скрипку. “Сколько раз я его

⁴ Александр Рахмиэлевич Кессель – физик-теоретик, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Лауреат государственной премии Республики Татарстан в области науки и техники и золотой медали имени П. Л. Капицы, заведующий лаборатории резонансных явлений КФТИ КазНЦ РАН.

⁵ Владимир Дмитриевич Федотов – доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент Академии наук Республики Татарстан. Заслуженный деятель науки Российской Федерации, директор института КИББ КазНЦ РАН с 1992 по 2002 годы.

⁶ Эра Абдулхаковна Сайфуллина – пианистка, заслуженный работник культуры РТ.

⁷ Маргарита Яковлевна Коварская – пианистка, концертмейстер, народная артистка РТ, заслуженный деятель искусств РТ, профессор, почётный работник высшего профессионального образования РФ, заслуженный работник культуры РФ.



После дружеского матча с юношеской волейбольной командой в Крутушке, август 2001 г.

видела, вот он сидит, закрывает глаза, и он весь в этой музыке. Мне тогда казалось, что он спит, но он не спал, а вот именно таким образом он слушал” – вспоминала сотрудница. “На Волге, на базе отдыха, он по берегу далеко уходил, именно вечером, когда закат. Смотреть на эту красоту он очень любил, очень. В Крутушке не было такого простора, а Игорю Васильевичу нужен был простор – для него это было очень значимо”.

У Игоря Васильевича был неиссякаемый интерес к жизни, он умел учиться у всех, с кем сводила жизнь. Много и с удовольствием путешествовал и по стране

и за рубежом, по туристическим путёвкам и во время многочисленных научных командировок. Работал приглашённым профессором в Шеффилдском Университете в Англии и в Университете г. Байройт в Германии. Вообще движение было его неотъемлемой частью, это движение, движение и ещё раз движение. Игорь Васильевич и ходил хорошо, и бегал хорошо, и плавал хорошо. Он был подтянутый и спортивный, выглядел молодо – трудно было угадать его возраст. В 65 лет ходил на каток у Артиллерийского училища, брал коньки на прокат и катался с молодёжью. Всегда любил экстрим – идти через лес неизвестным путём или спуститься с крутой горы без тропинки. Мог и в оконную форточку влезть, когда забыли ключи от дачи. И на даче, и в городе много ходил пешком, любил гулять по Кремлёвской, зайти в “Джузеппе” или посидеть в “Венском кафе”. В волейбольной команде ветеранов КФУ и в команде в Крутушке Игорь Васильевич играл до 2011 года, пока позволяло здоровье.

На склоне лет Игоря Васильевича начали настигать недуги, название каждого из которых могло бы сломить любого. Но не его. Он умел терпеть, умел держать удар.

Никогда не жаловался, не просил о помощи, не позволял болезням подчинить себе его жизнь. Даже когда врачи говорили, что надо замедлиться, он не хотел останавливаться. Он продолжал ходить на волейбол – пусть уже не играть, но хотя бы смотреть, болеть за своих. Он продолжал так же гулять по городу.

Он всё так же интересовался наукой, следил за открытиями, обсуждал физику, философию, литературу. Он не позволял себе угасать. Когда стало совсем трудно, он всё равно находил



Волейбольная команда ветеранов КФУ, март 2005 г. (И. В. Овчинников в первом ряду первый слева).

в себе силы улыбаться, поддерживать окружающих, не показывать, как тяжело ему самому. Это была его главная черта – он никогда не сдавался. Игорь Васильевич Овчинников ушёл из жизни так же, как и жил – с достоинством, с силой, с внутренним светом.

На его похоронах было много людей. Коллеги, друзья, ученики, соседи. Каждый, кто пришёл проститься, говорил о нём одно: он был человеком, который умел быть счастливым и учил этому других. Отдельный венок принесли соседи по даче в Крутушке. Волейболисты, узнав о его уходе, организовали матч памяти. Это было символично – ведь спорт, азарт, командный дух были неотъемлемой частью его жизни.

Игорь Васильевич оставил после себя не только научные труды, не только открытия, не только воспоминания. Он оставил атмосферу. Атмосферу жизни, полной смысла, любви, дружбы, познания, движения вперёд. Таким он и

останется в памяти тех, кто его знал – человеком, который до последнего дня жил так, как учил: с установкой на счастье, с любовью к миру, с верой в жизнь.

1. Домрачева Н.Е.: Игорь Васильевич Овчинников. К 70-летию со дня рождения. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2005. Ежегодник, с. 183–185. Казань: ФизтехПресс 2006.
2. Игорь Васильевич Овчинников. К 75-летию со дня рождения. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2010. Ежегодник, с. 190–191. Казань: ФизтехПресс 2011.
3. Овчинников И.В.: Игорь Васильевич Овчинников. К 80-летию со дня рождения. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2015. Ежегодник, с. 128–129. Казань: ФизтехПресс 2016.
4. Фролова Е.Н., Туранова О.А.: Игорь Васильевич Овчинников. К 85-летию со дня рождения. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2020. Ежегодник, с. 97–99. Казань: ФизтехПресс 2021.
5. Овчинникова О.: Зебра. Стихи. Казань: Б. и. 1996. 119 с.

Е. Н. Фролова от имени коллег и близких

* * *

ВОЛЕЙБОЛ

ПРИПЕВ:

Волейбол, волейбол,
Ты отрада без меры и боль,
Ты – загадочный мяч,
Ты – восторги удач
И печаль неудач, волейбол.

Вот подача, приём,
Пас, удар, блок, нырок,
И опять – пас, удар,
И опять – блок, нырок,
И кружит этот вальс
До победных “УРА!” –
Из чудесных мгновений
Сложилась игра.

Припев

Пусть разбиты колени
И плечи болят,
“Да бросай ты всё это”
Врачи говорят,
Но в блаженном полёте
Над сеткой лечу

И беззвучно кричу
Другу с детства – мячу:
О, моё божество,
Что со мною творишь:
То, проказник, поманишь,
А сам пролетишь,
То молось я тебе,
Сделав “рыбку” в прыжке,
То ты сокол – боец
У меня на руке.

Припев

Символичное “па” –
Передача и пас
Словно нитью единой
Связуешь ты нас.
Волейбольное братство
Помолвленных душ
Постарайся, мой друг,
Никогда не разрушь.

Припев

ИВО.

ПАМЯТИ ДРУГА*На смерть А. Р. Кесселя в 2003 г.*

Опять назойливая мысль –
В чём нашей жизни смысл?

Возможно, чтоб достойно жить
И всем на свете дорожить,
И что начертано судьбой
Должно быть пройдено тобой?

Сомненья время разрешило
Всего сполна при жизни было:

Экстаз научных озарений,
Желанных строк стихотворений.
И потрясение от оркестра,
Рыдания скрипки у маэстро,
От слов великого чтеца
И от тернового венца.

А разве чем-нибудь измеришь
Живой азарт спортивных зрелищ,
Восторг полотнами музея,
Тепло компании друзей,
А задушевные беседы,
Где всё – и радости и беды,
О жизни благодатной земной
И размышленья об иной.

И было счастье – мы любили,
И было счастье – нас любили.
Не верится, что только было,
И всё ж прекрасно – это было.

*И. Овчинников***НА ЮБИЛЕЙ Р. З. САГДЕЕВА**

Дорогой Роальд абы,
Кабы знать кем будешь ты,
Мы б в Ливадии не стали,
Когда мяч с тобой гоняли,
Бить кумира по ногам,
А строптивые мадам
Были б ласковей с тобою –
И владеть ты б мог любую.

Прокрути тот старый ролик
Где Роальд для нас лишь Ролик.
Вспомни те былые годы –
Маскарады и походы,
И восторги детворы,
И азарт большой игры,
Не забудь о вечерах
И пластинках на костях,
Оцени попробуй вновь
Ту наивную любовь ...

Как близки и далеки
Те счастливые деньки,
Что крутыми берегами
Нашу юность сберегали
У Казанки у реки.

Всё бесхитростно и просто,
Но какой трамплин для роста!

P.S.
Позволь на славный юбилей
От имени бывлых друзей
Мне выразить как прежде вновь
И восхищенье и любовь.

2003

*Игорь О.***В УЧЁНЫЙ СОВЕТ КФУ ПО ОПТИКЕ ПО ПОВОДУ ЗАЩИТЫ ГРАЧЁВОЙ
КАНДИДАТСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Козлов, Овчинников, Баранов
Решили отзыв написать
Чтобы Грачёвой (бывшей Субачёвой)
Научную дорогу дать.

Похоже всё предельно ясно –
Работа сделана прекрасно,
Но, вдруг чего-то не сбылось,
Тогда Совету мой вопрос:

Кого Совет в порыве мщенья
Козлом назначит отпущенья?

*Один из указанных выше
оппонентов.
15.02.2012*

Памяти Эльмиры Рашидовны Хисамовой

12 октября 2024 года скоропостижно скончалась Эльмира Рашидовна Хисамова.

Эльмира Рашидовна родилась 25 апреля 1967 года в Ташкенте. После окончания средней школы в г. Ташкенте, поступила в Казанский государственный университет на факультет ВМК по специальности прикладная математика. После окончания КГУ в 1989 году поступила по распределению на работу инженером в НПО “Волга”. Далее сменила много мест работы, освоила работу бухгалтера. В конце 2020 года поступила на работу в наш институт. Сотрудники института знали её по работе в отделе кадров института. Всегда приветливая, внимательная и доброжелательная!

Определённая часть сотрудников института, и я в том числе, познакомились с Эльмирой Рашидовной значительно раньше на нашей базе отдыха “Голубой залив”. У меня это знакомство состоялось в далёком 2007 году, когда мы организовали там выездной семинар отдела радиационных воздействий на материалы. С тех пор моя семья регулярно как минимум две недели отдыхала на нашей базе.

Оказалось, что у Эльмиры Рашидовны есть ещё сестра-близняшка Эльвира Рашидовна. Они как две капли воды были похожи друг на друга! И две большие семьи во главе с этими милыми женщинами проводили практически все лето на “Голубом заливе”.

Эльмира Рашидовна была, по моему мнению, азартным человеком. Очень любила рыбачить. Если готовить



Эльмира Рашидовна Хисамова
(25.04.1967–12.10.2024)

удочки меня учил Игорь Дюльдев, то прикормку я учился готовить под чутким и строгим руководством Эльмиры Рашидовны. Иногда мне приходилось выезжать в город вместе с ней. Водила она машину так, что я каждый раз говорил себе, что больше никогда не поеду с ней! Много купалась, причём в любую погоду. И даже в последний день в надежде, что полегчает, она поехала на базу и искупалась. К глубокому сожалению, это не помогло.

Эльмира Рашидовна была светлым и глубоко верующим человеком. Такой она нам и запомнится.

И. А. Файзрахманов

Памяти Вадима Алексеевича Голенищева-Кутузова

10 ноября 2024 года ушёл из жизни доктор физико-математических наук, профессор Вадим Алексеевич Голенищев-Кутузов.

Жизненный путь и значительный вклад В. А. Голенищева-Кутузова в развитие Казанского физико-технического института имени Е. К. Завойского неоднократно отражался в Ежегоднике (2002, 2007, 2012 и 2022 гг.) в связи с его круглыми датами, а в Ежегоднике-2017 опубликованы яркие воспоминания Вадима Алексеевича о становлении и развитии физических исследований в КФТИ в шестидесяти–семидесяти годы прошлого столетия.

Сотрудники института глубоко скорбят о кончине Вадима Алексеевича Голенищева-Кутузова и выражают искреннее соболезнование его родным и близким.



Вадим Алексеевич Голенищев-Кутузов
(1.07.1932–10.11.2024)



НАУЧНО–ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

О работе Учёного совета

В повестке заседаний Учёного совета 2024 года традиционно нашли своё место научные доклады не только сотрудников института о проделанной работе, но и наших гостей. Кроме того, активно обсуждались текущие дела, связанные с жизнью института и требующие голосования членов Учёного совета. Всего за год было проведено 32 заседания Учёного совета.

О молодёжи. Высокая активность молодых учёных КФТИ в представлении своих кандидатских работ в 2023 году принесла заслуженные защиты: Гимазов Ильнур Илхамович (6 марта 2024 г.), Ликеров Родион Фаридович (26 марта 2024 г.) и Гарипов Ранис Рамисович (19 апреля 2024 г.) успешно защитили свои кандидатские диссертации, а Гафарова Альбина Разитовна представила диссертацию в диссертационный совет. По материалам кандидатских диссертаций на Учёном совете в 2024 году доклады представили: 22 мая – Ахметов Мансур Миннурович на тему “Изучение структурных свойств глюконатов металлов методами магнитной спектроскопии” (рук. Г. Г. Гумаров) и 20 ноября – Новиков Герман Анатольевич на тему “Получение сильнолегированных сурьмой слоёв германия с использованием ионно-лучевых и лазерных технологий и их оптоэлектронные свойства” (рук. Р. И. Баталов). На одном из последних заседаний Учёного совета перед началом сезона отпусков 26 июня Камашев Андрей Андреевич, старший научный сотрудник лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники, представил доклад по материалам докторской диссертации “Экспериментальное исследование различных конструкций сверхпроводящего спинового клапана”. Желаем успехов и скорой защиты!

Конкурс на именные премии КФТИ для молодых учёных и аспирантов состоялся 15 мая, победителем конкурса на премию им. Н. С. Гарифьянова стал Бегишев Евгений Михайлович, аспирант 1-го года обучения, в конкурсе на премию им Б. М. Козырева победителем стал Гимазов Ильнур Илхамович, младший научный сотрудник лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники.

Осенью Учёный совет выдвинул Гимазова И.И. (в последствии выиграл первое место в конкурсе), Гарипова Р.Р., Ликерова Р.Ф., Морозову А.С. (стали участниками финального тура), Бегишева Е.М., Сахина В.О. для участия в конкурсе на соискание премии имени Е. К. Завойского для молодых учёных. Также Учёный совет рекомендовал Объединённому Учёному совету ФИЦ КазНЦ РАН выдвинуть для участия в конкурсе на соискание гранта Академии наук Татарстана для молодых кандидатов наук, планирующих защиту докторской диссертации в 2025 году Камашева А.А., Никифорова В.Г., Суханова А.А., Зарипова Р.Б., Хантимерова С.М., Яцыка И.В. Следует отметить, что после дальнейшего рассмотрения документов все кандидаты выиграли этот грант.

О гостях. В течение 2024 года помимо сотрудников института на заседаниях Учёного совета свои доклады представляли гости. 21 февраля Астафьев Олег Владимирович, сотрудник МФТИ (г. Долгопрудный) и Сколковского института науки и технологий (г. Москва), блестяще сделал доклад на тему “Квантовая оптика на искусственных квантовых системах” по материалам докторской диссертации. 20 марта Копасов Александр Андреевич, сотрудник Института физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород), представил доклад на тему “Состояния квазичастиц и электронный транспорт в сверхпроводящих гибридных структурах со спин-орбитальным взаимодействием” по материалам кандидатской диссертации. За 2024 год было утверждено четыре отзыва в качестве ведущей организации на кандидатские диссертации Ясюлевича И.А., Косарева Е.К., Прокопьева Д.А. и Носовой Н.М.

О выдвижениях. В марте состоялось обсуждение о выдвижении кандидатур для представления их к награждению юбилейной медалью “300 лет Российской академии наук”, было выдвинуто 30 кандидатур. В итоге медаль получили 11 сотрудников института. В мае по итогам тайного голосования Учёный совет рекомендовал Объединённому учёному совету ФИЦ КазНЦ РАН выдвинуть на ведомственную награду Министерства науки

и высшего образования РФ – почётное звание “Почётный работник науки и высоких технологий Российской Федерации” доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории нелинейной оптики Тагирова Ленара Рафгатовича. В июне 2024 года Учёный совет рекомендовал Объединённому учёному совету ФИЦ КазНЦ РАН выдвинуть доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника лаборатории радиоспектроскопии диэлектриков Тарасова Валерия Фёдоровича на Государственную награду Республики Татарстан – Медаль “За доблестный труд” и шесть сотрудников КФТИ на ведомственные награды РФ и РТ и муниципальные награды города Казани: д.ф.-м.н. Шахмуратова Рустэма Назимовича выдвинуть на поощрение Республики Татарстан “Благодарность Кабинета Министров”, д.ф.-м.н. Файзрахманова Ильдара Абдулкабировича – на поощрение Министерства науки и высшего образования РФ “Благодарность Министерства науки и высшего образования РФ”, к.ф.-м.н. Шегеду Анатолия Михайловича – на награждение ведомственной наградой Министерства науки и высшего образования РТ – Знак отличия “Почётный наставник”, Арсланова Ильгиза Альбертовича – на награждение ведомственной наградой Министерства науки и высшего образования РТ – “Почётная грамота”, Андрееву Аллу Ивановну и Куприянову Ольгу Олеговну на награждение муниципальными наградами города Казани.

В конце января на заседании Учёного совета была объявлена благодарность ФИЦ КазНЦ РАН за многолетний добросовестный труд, чуткое и внимательное отношение к сотрудникам (в связи с выходом на пенсию) Мухтасаровой Х.Л. и Гурьяновой О.М.

О научных результатах и отчётах. В начале февраля традиционно одно из заседаний посвящается Дню российской науки, который празднуется 8 февраля. В 2024 году к этой дате была приурочена устная сессия физической секции Итоговой конференции ФИЦ КазНЦ РАН, в рамках которой были отобраны лучшие работы: по одной работе заняли первое и второе место и третье место разделили две работы. В ноябре прошло обсуждение важнейших результатов 2024 года, в декабре были заслушаны отчёты по госзаданию в рамках двух тем.

О жизни и развитии института. В феврале на Учёном совете обсудили создание центра по дизайну, проектированию и изготовлению тонкоплёночных структур с

использованием атомно-слоевого осаждения отечественных прекурсоров на базе КФТИ.

Весной 2024 года на Учёном совете обсудили новые темы государственного задания. Наряду с продолжающейся темой государственного задания под руководством Калачёва А.А., с 2025 года в институте будет реализовываться новая тема “Физика функциональных материалов и гибридных мезоскопических структур для микроэлектроники, энергетики и информационных технологий” под руководством Тагирова Л.Р.

В мае заместитель руководителя по научной деятельности Т. П. Гаврилова представила отчёт администрации о финансово-хозяйственной деятельности института.

О составе Учёного Совета. В феврале к.ф.-м.н. Л. И. Савостина, заняв с 1 февраля 2024 года должность Учёного секретаря КФТИ, стала членом Учёного совета согласно Положению об Учёном совете. Т. П. Гаврилова, занимавшая в предшествующие годы должность Учёного секретаря и автоматически входившая в состав Учёного совета ранее, на заседании 31 января была кооптирована в состав совета на общих основаниях единогласным решением его членов. В сентябре 2024 года в связи с изменениями в составе Совета молодых учёных и специалистов КФТИ, председателем которого стал к.ф.-м.н. Гарипов Р.Р. вместо к.ф.-м.н. Камашева А.А. и автоматически занял его место среди членов УС согласно Положению. В отношении Камашева А.А. была проведена процедура кооптации и единогласным решением членов Учёного совета он был введён в состав членов Учёного совета. В ноябре заместителем председателя Учёного совета был выбран Ю. И. Таланов. В итоге членов Учёного совета стало 21.

О статистике. Одним из важных аспектов деятельности Учёного совета является обсуждение научных исследований, проводимых в институте. Всего в 2024 году было проведено 32 заседания Учёного совета, все заседания Учёного совета посетил к.ф.-м.н. Шакуров Г.С., на одно меньше – д.ф.-м.н. Файзрахманов И.А., на два меньше – д.ф.-м.н. Тарасов В.Ф., к.ф.-м.н. Гаврилова Т.П., д.ф.-м.н. Салихов К.М. и к.ф.-м.н. Хайбуллин Р.И. В течение года был сделан 51 научный доклад. Наибольшее число докладов (четыре сообщения) сделал академик РАН Кев Минуллинович Салихов, на втором месте (три доклада) – старший научный сотрудник лаборатории физики и химии поверхности Нургазизов Нияз Ильгизович.

Л. И. Савостина

Семинар памяти Григория Бенционовича Тейтельбаума

Второй семинар памяти Григория Бенционовича Тейтельбаума состоялся 20 декабря 2024 года. Для участия в его работе были приглашены коллеги, сотрудники нескольких российских и зарубежных институтов, которые в разное время работали вместе с Григорием Бенционовичем или сотрудничали с ним. Доклады представили: Павел Дмитриевич Григорьев, старший научный сотрудник Института теоретической физики имени Л. Д. Ландау (Черноголовка); Евгения Леонидовна Вавилова, с.н.с. КФТИ имени Е. К. Завойского, Владислав Евгеньевич Катаев, сотрудник Leibniz Institute for Solid State and Materials Research (Dresden); Владимир Моисеевич Пудалов, руководитель Центра высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов имени В. Л. Гинзбурга (ФИАН, Москва); Александр Сергеевич Мельников, заведующий отделом физики сверхпроводников Института физики микроструктур РАН (Нижний Новгород); Роман Валерьевич Юсупов, заведующий кафедрой квантовой электроники и радиоспектроскопии КФУ.

В начале семинара Кев Минуллинович Салихов поделился с обравшимися в конференц-зале КФТИ и с online участниками своими мыслями о том, чем для нас ценен Григорий Бенционович, о его вкладе в науку и его влиянии на жизнь института.

Первый научный доклад был представлен П. Д. Григорьевым в режиме online, через Zoom. Он назывался “Зеэмановская спин-орбитальная связь и магнитные квантовые осцилляции в антиферромагнитных проводниках. g -фактор электронов в антиферромагнитных металлах”. Рассказ Павла Дмитриевича вызвал большой интерес и оживлённую дискуссию. Совершенно неожиданный результат его и коллег теоретических расчётов – g -фактор электронов проводимости в антиферромагнетиках при определённых условиях может обращаться в нуль. Этот эффект можно обнаружить с помощью экспериментальных исследований магнитных квантовых осцилляций в металлах.

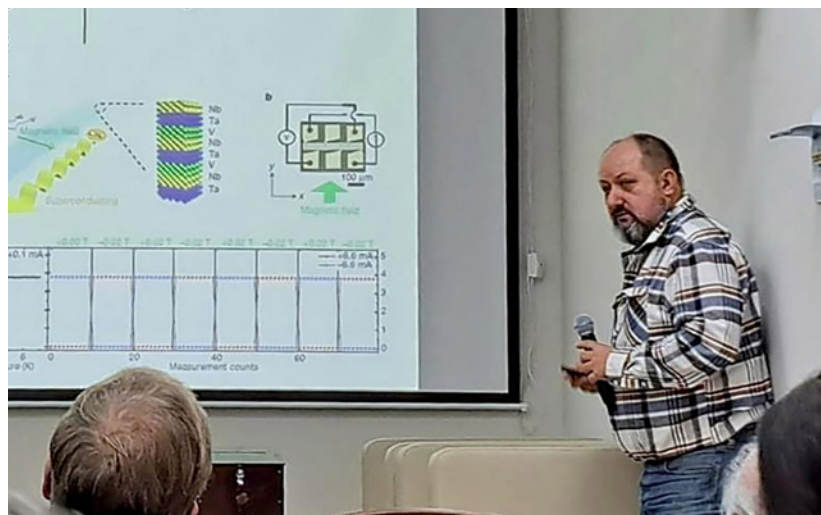
Следующий доклад под названием “Коррелированные режимы с медленной спиновой динамикой в сложных оксидах: $\text{LiMn}_2\text{TeO}_6$ ” был сделан Е. Л. Вавиловой. Евгения Леонидовна наглядно продемонстрировала, как метод ядерного магнитного резонанса позволяет распутать сложное сочетание экспериментальных фактов, понять необычное поведение различных магнитных параметров исследованного материала, на которые оказывают влияние сразу несколько факторов как структурного порядка, так и магнитные взаимодействия различной величины и направленности.

Владислав Евгеньевич Катаев представил доклад, как всегда, мастерски. Его сообщение “Ван-дер-Ваальсовский ферромагнетик Fe_4GeTe_2 : что в нём необычного?” не оставило слушателей равнодушными. Тем более, что магнитные материалы с Ван-дер-Ваальсовскими связями между слоями привлекают большое внимание и интенсивно исследуются в последнее время. На них возлагаются большие надежды в плане их использования для изготовления технических устройств нанoeлектроники и спинтроники, сочетающих уникальные транспортные и магнитные свойства. Однако изменение этих свойств при варьировании внешних условий, таких как магнитное поле и температура, часто выглядит весьма загадочным. Владислав Евгеньевич наглядно показал, что всесторонний анализ результатов магниторезонансных исследований даёт возможность разобраться во всех тонкостях поведения электронных и магнитных характеристик этих уникальных материалов.

Презентация “Сверхпроводимость в гидридах”, представленная Владимиром Моисеевичем Пудаловым в удалённом режиме, была посвящена последним достижениям в области сверхпроводимости гидридных соединений, которые демонстрируют рекордную критическую температуру T_c . Эти соединения, синтезированные и исследованные в условиях невообразимо больших давлений (до 2.5 миллионов атмосфер), могут переходить в сверхпроводящее состояние при температуре близкой к комнатной. Например, соединение LaH_{10} имеет критическую температуру $T_c = 250$ К при давлении 1.75 млн атм., а CSH_x – при давлении 2.7 млн атм. имеет $T_c = 288$ К (15 °C). Такая высокая температура перехода в сверхпроводящее состояние вызывает не только восхищение, но и удивление, поскольку по механизму образования куперовских пар (электрон-фононное взаимодействие) гидридные сверхпроводники являются “родственниками” не купратным высокотемпературным сверхпроводникам, а скорее обычным элементарным металлам (таким как свинец, индий, ртуть) и их сплавам (так называемым БКШ сверхпроводникам), T_c которых не превышает 20 К. Хотя некоторые характеристики гидридов ведут себя нетипично для БКШ материалов, демонстрируя линейную зависимость от температуры и магнитного поля, и это ставит под сомнение ферми-жидкостное описание их транспортных свойств. В конце Владимир Моисеевич сделал заключение о том, что многому в поведении гидридных сверхпроводников ещё предстоит дать объяснение. Тем они и интересны!

Доклад Александра Сергеевича Мельникова под названием “Фототоки в сверхпроводниках” был посвящён

А. С. Мельников (Н. Новгород) выступает с докладом “Фототоки в сверхпроводниках”.



теоретическому предсказанию эффекта увлечения носителей тока в сверхпроводнике электромагнитным полем. Согласно расчётам, этот эффект должен проявить себя в форме генерации постоянного электрического тока под действием наклонно падающего электромагнитного излучения. Александр Сергеевич показал, что эффект обусловлен квадратичным откликом сверхпроводящего тока на поле волны, который создаёт потенциал зарядового разбаланса и осцилляции модуля сверхпроводящего параметра порядка. Были приведены результаты расчёта зависимости постоянного сверхпроводящего тока и отклика на второй гармонике от частоты и угла падения волны. Докладчик предложил системы, которые, с его точки зрения, могут быть использованы для экспериментального обнаружения предсказанных эффектов.

Завершающий программу семинара доклад под названием “Сверхбыстрая фотоиндуцированная динамика волн зарядовой плотности в трителлуридах редких земель $R\text{Te}_3$ ($R = \text{Tb}, \text{Ho}, \text{Dy}$)” был представлен Р. В. Юсуповым. Роман Валерьевич рассказал о необычном состоянии электронной системы в двумерных проводящих материалах, каковыми являются теллуриды редкоземельных элементов, состоянии волны зарядовой плотности. В этих соединениях ниже определённой температуры возникает щель (запрещённая зона) в энергетическом спектре электронов проводимости, что приводит к существенному изменению их транспортных свойств и одновременно к перестройке кристаллической структуры, а именно к удвоению периода решётки. Для изучения процессов

релаксации электронной подсистемы после воздействия на неё коротким лазерным импульсом использовалась современная фемтосекундная оптическая система, которая позволила оценить времена фазовой и амплитудной релаксации. Оказалось, что они отличаются на 2–3 порядка друг от друга. Докладчик отметил, что появление щели в энергетическом спектре делает явление волны зарядовой плотности похожим в некотором отношении на сверхпроводимость. Поведение щели с изменением температуры в обоих явлениях хорошо описывается теорией Бардина-Купера-Шриффера (БКШ).

Участники семинара, и докладчики, и слушатели, с удовлетворением отметили высокий уровень и актуальность представленных работ, следствием чего стали активные дискуссии после докладов.

Продолжение семинара состоялось в буфете КФТИ, где собравшиеся в неформальной обстановке с тёплым чувством поделились воспоминаниями о научных и “околонаучных” мероприятиях, в которых они принимали участие вместе с Григорием Бенционовичем. В их и нашей памяти он остаётся живым...

Ю. И. Таланов

Проект “Наука как искусство”

В 2024 году ФИЦ КазНЦ РАН получил грант Минобрнауки России на популяризацию науки по проекту: “Наука как искусство”. Цель проекта – привлечение молодёжи в научную деятельность через знакомство с великими соотечественниками, учёными, внёсшими значительный вклад в развитие науки, жизнь и работа которых тесно связана с регионом Поволжье, демонстрация достижений научных школ современного поколения учёных Поволжья.

В рамках проекта был проведён большой цикл мероприятий:

- Создано 19 фильмов про научные школы Казани и регионов-партнеров проекта и короткие ролики к ним. Сценарии фильмов описывают научные школы от истоков до современности. Особенно важным для команды проекта было показать истории успеха от студента до академика, а также истории становления научных школ в сложные годы Великой Отечествен-

ной войны. Полная коллекция научно-популярных фильмов, созданных в рамках проекта “Наука как искусство”, размещена на канале RUTUBE: <https://rutube.ru/channel/37863892>.

- Проведён конкурс научно-популярных фильмов среди учащихся средней школы, студентов техникумов, колледжей, высших учебных заведений. Среди подписчиков VK канала “Наука как искусство” был проведён конкурс репостов фильмов, созданных участниками конкурса, для более широкого охвата аудитории и разыграны памятные призы.
- Сотрудниками ФИЦ КазНЦ РАН в кооперации с КФУ проведён цикл онлайн лекций по повышению квалификации для учителей школ Республики Татарстан
- В детских оздоровительных лагерях организованы мастер-классы по физике и химии, а также показаны фильмы о деятельности учёных Казанского научного центра
- В День знаний 1 сентября 2024 года прошло торжественное открытие мурала по улице Чистопольской, 57/59 в г. Казань. Создатели мурала (совместная идея учёных и художника) стремились показать не конкретных людей, а абстрактный образ учёного.
- В парковой зоне “Сосновая роща” представители институтов ФИЦ “Казанский научный центр РАН”



Открытие мурала.



Аллею хвойных деревьев к 300-летию РАН сажают учёные ФИЦ КазНЦ РАН.





“Праздник науки”, организованный в День знаний 1 сентября 2024 года.

высадили аллею хвойных деревьев в честь 300-летия РАН, а также организовали “Праздник науки” для детей. Школьникам были показаны научно-популярные фильмы о научных школах Казани и выдающихся

достижениях учёных, проведены викторины по химии, физике и биологии, Самых маленьких участников праздника развлекали аниматоры.

Р. М. Ерёмина

“День без турникетов”

В мае 2024 года Российский научный фонд в рамках проекта Правительства Москвы “День без турникетов” проводил всероссийскую акцию – научно-популярные экскурсии в сильнейшие научные лаборатории страны.

Российский научный фонд (РНФ) – это крупнейший в России фонд, который поддерживает ведущих учёных в их стремлении понять загадки природы и улучшить качество жизни миллионов людей. РНФ создан по инициативе Президента России в ноябре 2013 года.

Мероприятия охватили шесть городов, 17 научных и научно-образовательных организаций, более 50 лабораторий

и стали частью праздничных событий, приуроченных к десятилетию фонда.

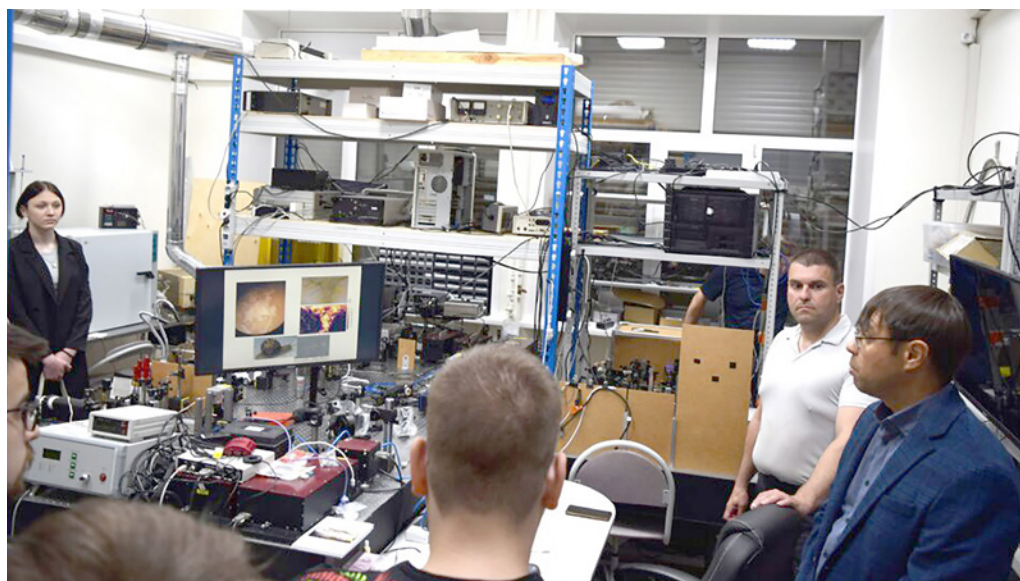
23 мая школьники, студенты и все желающие посетили с экскурсией несколько лабораторий Казанского физтеха.

Казанский физико-технический институт – один из ведущих мировых научных центров в области магнитной радиоспектроскопии, когерентной и нелинейного оптики, квантовой обработки информации, нанофизики перспективных материалов. Сегодня в 17 научных подразделениях института, оснащённых современным оборудованием, работает 130 исследователей.

Экскурсию по лаборатории физики и химии поверхности проводит руководитель лаборатории к.ф.-м.н. Н. И. Нургазизов.



О работе лаборатории квантовой оптики в алмазах рассказывает руководитель лаборатории к.ф.-м.н. В. Г. Никифоров.



За последние годы сотрудники института получили важные результаты в области квантовых оптических технологий, физике гибридных мезоскопических структур, внесли значительный вклад в развитие теории и экспериментальных методов магнитной радиоспектроскопии, а также узнали много нового о нестандартных физических свойствах новых материалов. Институт успешно занимается разработкой и внедрением медицинских МРТ, а прикладные исследования в области машиностроения используют такие компании, как ПАО «КамАЗ», НПО «ОКБ им. М. П. Симонова» и другие.

Совместные исследования ведутся со многими вузами и институтами России и других стран.

КФТИ является базовым институтом для кафедр ряда высших учебных заведений города Казани.

Сотрудники лабораторий рассказали о своей работе, показали оборудование и даже разрешили посмотреть, как проходят эксперименты.

Школьники и студенты посетили:

- лабораторию физики и химии поверхности, где учёные создают и исследуют наноструктуры с уникальными

свойствами. Основной инструмент работы – сканирующий зондовый микроскоп, позволяющий рассматривать поверхность с увеличением в миллионы раз и формировать на ней микро- и наноструктуры, которые в перспективе могут использоваться для записи и обработки информации с рекордно низкими затратами энергии. Этой энергии будет достаточно, чтобы, например, сердечный кардиостимулятор работал только за счёт тепла человеческого тела.

- лабораторию квантовой оптики в алмазах, которая занимается разработкой и созданием новых люминесцентных материалов нанометрового размера. Исследовать их свойства помогают различные микроскопы от простых и небольших до микроскопов, занимающих оптический стол метровых размеров. Эти микроскопы можно было увидеть на экскурсии.

- лабораторию радиационной физики, в которой занимаются синтезом новых наноструктурированных материалов. Для этого учёные внедряют ионы различных химических элементов в кристаллические и полимерные мишени. Материалы могут найти при-



О синтезе новых материалов в лаборатории радиационной физики рассказывает к.ф.-м.н. Р. И. Хайбуллин.

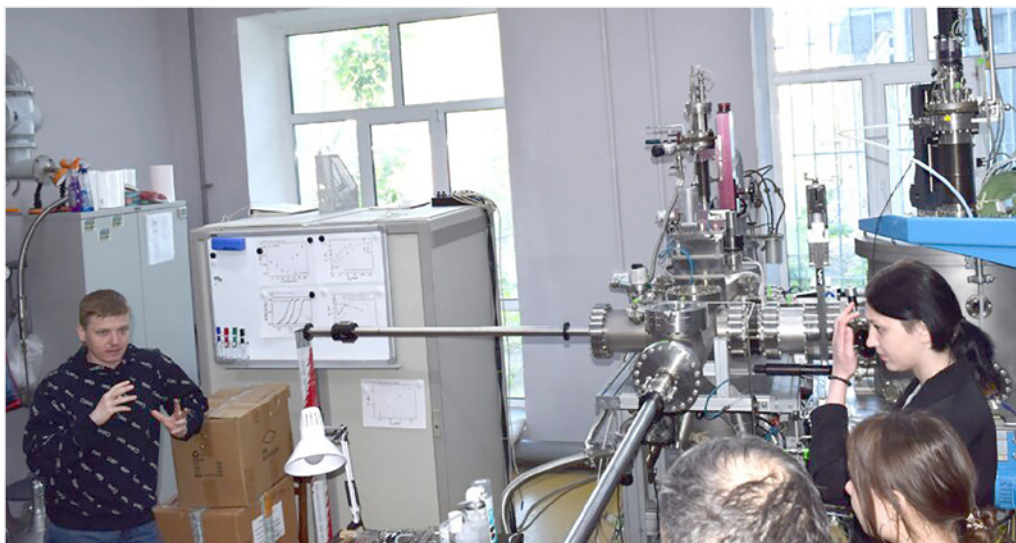


Особенности работы с криогенными жидкостями демонстрируют н.с. лаборатории радиоспектроскопии диэлектриков к.ф.-м.н. Р. Ф. Ликеров и с.н.с. лаборатории спиновой физики и спиновой химии И. В. Яцык.

Работу спектрометров ЭПР в лаборатории спиновой физики и спиновой химии показывает к.ф.-м.н. Р. Б. Зарипов.



Об экспериментах, проводимых в лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники, рассказывает руководитель лаборатории к.ф.-м.н. А. А. Камашев.



менение в современной микроэлектронике и спинтронике, оптике и магнетизме, энергосберегающих и диагностирующих технологиях и даже в геммологии – науке о драгоценных камнях. Посетители смогли познакомиться с работой ионно-лучевого ускорителя, с помощью которого получают новые материалы, с методами их исследования, а также посмотреть на опытные образцы синтезированных материалов.

– лабораторию радиоспектроскопии диэлектриков, где исследуют материалы, обладающие уникальными магнитными и термоэлектрическими свойствами. К таким материалам относятся двойные перовскиты, на основе которых можно создать устройства, чувствительные к изменению температуры и/или магнитного поля. В ходе экскурсии у посетителей была возможность поучаствовать в подготовке материалов для проведения дальнейших исследований.

– лабораторию спиновой физики и спиновой химии, где развивают методы спектроскопии электронного парамагнитного резонанса и ядерного магнитного резонанса. Во время проведения экскурсии можно было ознакомиться с уникальным набором спектрометров ЭПР, позволяющих исследовать свойства вещества в различных агрегатных состояниях (в том числе биологических объектов), при различных температурах и даже под действием лазерного излучения.

– лабораторию проблем сверхпроводимости и спинтроники, в которой создаются гетероструктуры типа сверхпроводник/ферромагнетик и исследуются возможности управления такими структурами с помощью внешнего магнитного поля. В ходе экскурсии посетители смогли пронаблюдать эксперимент по левитации сверхпроводника в магнитном поле.

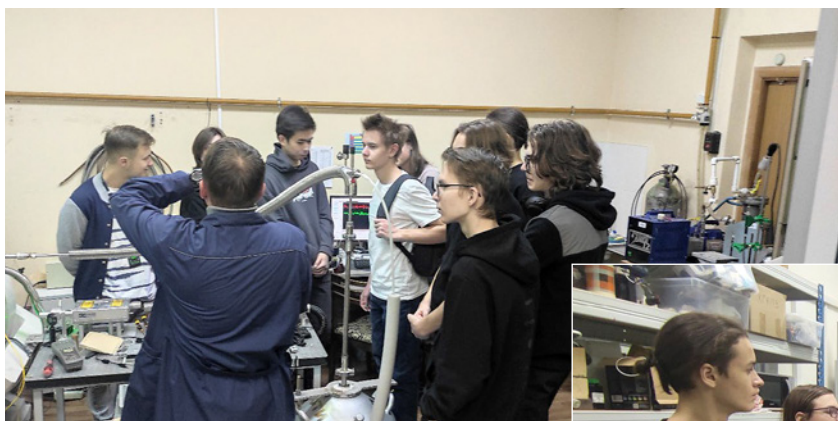
Т. П. Гаврилова

Гостеприимные учёные

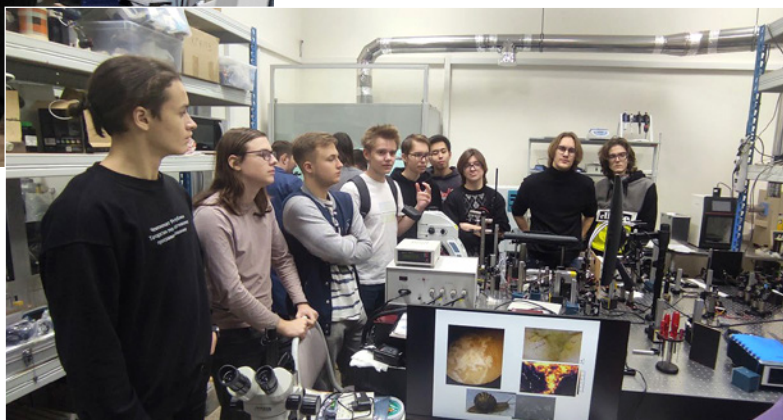
В течение 2024 года двери Казанского физико-технического института с радостью распахивались перед многочисленными гостями.

В марте КФТИ посетили коллеги из Научно-образовательного центра мирового уровня Республики Татарстан и Академии наук Республики Татарстан, включая директора центра Халитова Тимура Чингизовича.

Дважды институт посещали гости из Университета Иннополис: в апреле гостями лабораторий института стали ректор Иннополиса Александр Владимирович Гасников и советник ректора Зураб Автандилович Отарашвили; в декабре Зураб Автандилович повторно посетил институт с более чем полутора десятками студентов Университета Иннополис. Мы уверены, что



Визит студентов Университета Иннополис в КФТИ.



данные встречи – это залог будущего плодотворного сотрудничества.

В апреле институт посетила делегация из Объединённого института ядерных исследований (г. Дубна, Московская область). После экскурсии по лабораториям института состоялась плодотворная дискуссия об актуальности радиационных исследований в науках о жизни. Стороны определили, что они стремятся к достижению следующих результатов сотрудничества:

1. Новые методы визуализации в радиационной биологии и медицине: квантовые сенсоры, флуоресцентная микроскопия высокого разрешения, оптоакустическая томография;
2. Структурный анализ биомакромолекул на основе методов рентгеновского малоуглового рассеяния, синхротронного и нейтронного излучения;
3. Исследования механизмов нейродегенерации при действии ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками;

4. Исследования механизмов действия радиосенсибилизаторов для терапии онкологических заболеваний и радиозащитных препаратов.

В середине июня КФТИ посетила большая группа школьников старших классов из Москвы, участников и победителей российских олимпиад по физике и химии, в рамках туристической поездки по Казани от туристического агентства “Гольфстрим”.

В октябре на территории института состоялась плодотворная встреча с коллегами из Казанского государственного энергетического университета. Среди гостей были проректор по науке и коммерциализации КГЭУ Ившин Игорь Владимирович, проректор по развитию и инновациям Ахметова Ирина Гареевна, руководитель МКБ “Энергия взлёта” Соловьёв Александр Вячеславович и др., что позволило провести конструктивное обсуждение траекторий развития совместных проектов и исследований

Т. П. Гаврилова

Международная конференция “Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives” (EPR-80)

С 23 по 27 сентября 2024 года в Казани прошла международная конференция “Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives”, посвящённая 80-летию с момента открытия явления электронного парамагнитного резонанса. Основными организаторами конференции выступили Казанский физико-технический институт имени

Е. К. Завойского – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН (КФТИ), Казанский федеральный университет (КФУ) и Академия наук Республики Татарстан (АН РТ). Сопредседатели конференции – директор ФИЦ КазНЦ РАН член-корр. РАН А. А. Калачёв и первый проректор – проректор по научной деятельности КФУ



Приветственное слово А. А. Калачёва (слева) и К. М. Салихова (справа) на церемонии открытия конференции.



Участники стендовой сессии. Слева направо: Н. А. Чумакова, Е. Л. Вавилова, С. В. Демишев, А. В. Шестаков, Д. Е. Железнякова, Ю. И. Таланов.

д.ф.-м.н. Д. А. Таюрский. Сопредседатели программного комитета – академик РАН К. М. Салихов и профессор, д.ф.-м.н. Б. З. Малкин. В рамках конференции была организована церемония вручения Международной премии имени Е. К. Завойского. Устные заседания конференций были проведены в смешанном формате, когда часть учёных из России и других стран имели возможность онлайн-участия. Стендовая сессия была проведена в очном формате.

Обсуждаемые на конференциях темы были чрезвычайно разнообразны. В рамках конференции “Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives” обсуждались:

- Спиновая физика и спиновая химия;
- Достижения в области теории и приборостроения магнитного резонанса;
- Магнитный резонанс в твёрдом теле: от кристаллов до квантовых точек;
- Магнитный резонанс в химических и биологических системах;
- Обработка информации на основе спинов и оптические квантовые технологии;
- Мёссбауэровская спектроскопия и её применение.

В конференции приняли участие ведущие учёные и эксперты в области магнитного резонанса из Венгрии, Китая, Мексики, России, США, Турции и Франции. Более 180 участников конференции представили 8 пленарных, 14 приглашённых, 57 устных и 84 стендовых доклада. В конференции приняли участие восемь иностранных участников, ведущих специалистов из-за рубежа, в том числе два учёных из Национального политехнического института Мексики смогли принять очное участие в непростое для всей мировой общественности время. География участников из России была представлена более чем полутора десятками

городов, включая Владивосток, Дубну, Красноярск, Москву, Новосибирск, Пермь, Санкт-Петербург и другие.

Церемония открытия конференции и две первых пленарных лекции проходили в малом зале концертного блока “УНИКС” Казанского федерального университета под председательством директора Института физики КФУ Гафурова Марата Ревгеровича. Во второй день научного мероприятия состоялась церемония вручения премии имени Е. К. Завойского. Кев Минуллович Салихов, председатель международного комитета по присуждению Международной премии имени Е. К. Завойского, объявил имена двух лауреатов премии 2024 года. Лауреатами стали профессор Анатолий Ф. Ванин (Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук) и профессор Роберт Г. Гриффин (Массачусетский технологический институт).

Помимо докладов лауреатов международной премии им. Е. К. Завойского в разные дни конференции были представлены восемь пленарных докладов: А. В. Дуглав (КФУ, Казань, Россия) “How the EPR has been discovered? The analysis of Zavoisky’s logbooks”, Е. Л. Ивченко (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия) “Electron and hole g-factors in semiconductors and semiconductor nanosystems”, А. А. Камнев (Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов, ФИЦ “Саратовский научный центр Российской академии наук”, Саратов, Россия) “Microbiological applications of Mössbauer spectroscopy”, С. В. Демишев (Институт физики высоких давлений им. Л. Ф. Верещагина РАН, Троицк, Россия) “EPR as a tool for studying magnetic fluctuations in strongly correlated electronic systems”, К. С. Усачёв (ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия) “Magnetic resonance applications in structural studies of large macromolecular complexes”, К. М. Салихов (Казанский физико-технический институт

Вручение дипломов за лучший стендовый доклад на церемонии закрытия конференции в музее истории КФУ.
Слева направо: С. М. Хантимеров, А. Попов, Е. Батуева, Ф. Мурзаханов, М. Р. Гафуров.



имени Е. К. Завойского, Казань, Россия) “Current state of spin exchange theory. New spin exchange paradigm”, M. Zhitomirskii (Institut Laue-Langevin, Grenoble, France) “Longitudinal magnons: new collective quantum excitations in large-S magnets”, Ю. М. Буньков (Российский квантовый центр, Москва, Россия) “40 years of magnon Bose Einstein condensation”. Семь из восьми пленарных докладов были сделаны в очном формате, один доклад был представлен в режиме онлайн. Много ведущих специалистов в области магнитного резонанса, спиновой химии и физики магнитных явлений со всего мира выступали как приглашённые докладчики. Собрать их всех вместе в одно время – это сложная задача из-за плотного графика работы ведущих учёных. Онлайн-формат расширяет возможности участников и организаторов, и можно ожидать, что этот формат наряду с очным участием на долгие годы войдёт в практику проведения конференции. Однако несомненным остаётся тот факт, что очное присутствие, живое общение и возможность продолжать дискуссию в течение всего периода проведения конференции в большей степени способствует формированию долгосрочных партнёрских отношений и плодотворному научному сотрудничеству.

Проблематика научных докладов, представленных в рамках работы запланированных конференций, затрагивает результаты разработок в следующих областях: магнитные явления в физике, химии и биологии, применение методов магнитного резонанса в химии, биологии, медицине и развитии спиновых технологий; современное оборудование и методы исследований. Представленные на конференции результаты исследований имеют важное теоретическое и практическое значение для решения фундаментальных и

прикладных проблем современной спиновой физики, химии и спиновых технологий. Позиции российских учёных в этой области научных исследований и степень их влияния на развитие науки можно оценить как очень высокие.

В 2024 году были выбраны лучшие стендовые доклады среди работ молодых участников конференции. Лауреатами были выбраны Артёмий Попов (Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва), Фадис Мурзаханов (Казанский федеральный университет, Казань), Екатерина Батуева (Казанский федеральный университет, Казань).

Проведение мероприятия на достойном уровне было бы невозможно без помощи и поддержки партнёров и спонсоров конференции. Организаторы конференции искренне благодарны Министерству науки и высшего образования РФ, Министерству образования и науки РТ, Российской академии наук, Академии наук РТ, Казанскому федеральному университету, Фонду поддержки социальных программ, Компании “ЭЛЕМЕНТ”, Центру технического сопровождения “НАУКА”, Компании Криотрейд Инжиниринг, ООО “АДАНИ Рус”, Федеральному исследовательскому центру “Казанский научный центр Российской академии наук” за поддержку.

Организаторы убеждены, что проведённые научные мероприятия в рамках международной конференции “Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives” способствовали постановке и решению актуальных современных научных проблем в области магнитного резонанса и физики магнитных явлений.

Т. П. Гаврилова

Международная премия им. Е. К. Завойского 2024



Лауреаты Международной премии имени Е. К. Завойского 2024 г. Анатолий Ф. Ванин (Россия) (слева) и Роберт Г. Гриффин (США) (справа).

Международная премия им. Е. К. Завойского учреждена в 1991 году. Эта премия получила поддержку Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского, Казанского (Приволжского) федерального университета, Правительства Республики Татарстан и издательства Шпрингер (Вена Нью-Йорк), которое сотрудничает с Казанским физико-техническим институтом в издании международного журнала “Applied Magnetic Resonance”. Премия получила признание Амперовского общества,

Международного общества ЭПР (ЭСР) и Президиума РАН. Она получила высокую международную оценку как значительная премия за научные достижения.

Премия им. Е. К. Завойского присуждается за выдающийся вклад в применения или развитие электронного парамагнитного резонанса в любой области науки. Лауреат получает диплом, медаль и денежный чек на 5000 евро (1500 евро от издательства Шпрингер Вена Нью Йорк и 3500 евро от Правительства Республики Татарстан). Лекция лауреата о своей работе публикуется в журнале “Applied Magnetic Resonance”. Церемония вручения премии проходит в Казани, где лауреат и его(её) супруга(супруг) являются почётными гостями Правительства Республики Татарстан.

В 2024 году Международный комитет по присуждению премии работал в следующем составе: Кев Минуллинович Салихов (Казань, Россия), председатель, и члены: Данте Гаттески (Флоренция, Италия), Даниэлла Гольдфарб (Реховот, Израиль), Клаус Мёбиус (Берлин, Германия), Такеджи Такуи (Осака, Япония), Джек Х. Фрид (Итака, США), и Брайан М. Хоффман (Эванстон, США). В начале этого года комитет обратился примерно к 50 самым авторитетным специалистам в области ЭПР с письменной просьбой назвать кандидата. Были рассмотрены все кандидатуры, названные до 1 апреля 2024 года.

В результате широкого обсуждения всех кандидатур решение комитета было единодушным – лауреатами премии 2024 были выбраны профессор Анатолий Фёдорович Ванин (Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН, Москва, Россия) и Роберт Гай Гриффин (Массачусетский технологический институт, Кембридж, США). Они отмечены этой премией в знак признания их выдающегося вклада в развитие методологии электронного парамагнитного резонанса и её применений в биохимии и исследованиях живых организмов.

С момента присуждения этой премии высокого звания лауреата были удостоены 43 выдающихся учёных из разных стран мира (в 1994 году, в ознаменование 50-летней годовщины открытия ЭПР, было названо три лауреата, в 2004 году, в ознаменование 60-летней годовщины открытия ЭПР, было названо два лауреата, в 2014 году, в ознаменование 70-летней годовщины открытия ЭПР, было названо два лауреата, в 2024 году, в ознаменование 80-летней годовщины открытия ЭПР, было названо два лауреата, в 2000, 2015, 2016, и 2021 году тоже два лауреата), среди них восемь представителей России – проф. Я. С. Лебедев, проф. Ю. Д. Цветков, проф. В. А. Ацаркин, проф. С. В. Демишев, проф. Е. Г. Багрянская, проф. А. Ф. Ванин, и наши земляки, акад. К. А. Валиев и акад. К. М. Салихов, а также фирма Брукер БиоСпин.

К церемонии вручения была приурочена международная конференция “Magnetic Resonance – Current State and



К. М. Салихов объявляет решение Международного комитета по вручению премии им. Е. К. Завойского.

А. И. Поминов вручил диплом Международной премии им. Е. К. Завойского А. Ф. Ванину. Слева направо: А. И. Поминов, А. Ф. Ванин, К. М. Салихов, Р. Н. Минниханов.

Фотограф Салават Камалетдинов. Фото с сайта <https://www.tatar-inform.ru/photo/vrucenie-mezhdunarodnoi-premii-im-e-k-zavoiskogo-5823732>.



Future Perspectives (EPR-80)”, которая проходила в период с 23 по 27 сентября 2024 года в смешанном формате, подразумевающим как физическое, так и онлайн участие в её работе. Церемония вручения премии проходила 24 сентября в здании Академии наук Республики Татарстан. Председатель Международного комитета по вручению премии им. Завойского академик РАН Кев Минуллин Салихов объявил решение комитета.

Первый заместитель министра образования и науки Республики Татарстан Андрей Иванович Поминов вручил диплом Международной премии им. Завойского и медаль Анатолию Фёдоровичу Ванину (Роберт Гай Гриффин участвовал онлайн) и сердечно поздравил лауреатов. Лауреатов также тепло поздравили директор ФИЦ “Казанский научный центр” член-корреспондент РАН Алексей Алексеевич Калачёв, президент Академии наук Республики Татарстан академик РТ Рифкат Нургалеевич Минниханов, и первый проректор – проректор

по научной деятельности Казанского федерального университета профессор Дмитрий Альбертович Таюрский. Руководитель Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН Сергей Мансурович Хантимеров вручил подарок Анатолию Фёдоровичу Ванину от института и поздравил его.

На специальной сессии конференции профессор Анатолий Фёдорович Ванин сделал научный доклад “Фундаментальная роль метода ЭПР в обнаружении, идентификации и изучении динитрозильных комплексов железа в живых организмах” а Роберт Гай Гриффин сделал научный доклад “ЭПР и ДПЯ в миллиметровом диапазоне длин волн” (в формате онлайн).

*Л. В. Мосина,
учёный секретарь комитета
по присуждению премии им. Е. К. Завойского*

“EPR newsletter”: Как мы отметили 80-летие открытия ЭПР

“EPR newsletter”, официальный орган международного общества ЭПР (ЭСР) (www.ieprs.org) (МОЭ), объединяющего более тысячи учёных, применяющих метод ЭПР в своих исследованиях, представляет своим читателям актуальную информацию о жизни МОЭ, различных премиях и юбилеях, новых книгах и журналах, компьютерных программах и методах, экспериментальных ноу-хау, объявления и отчёты о локальных и международных

конференциях, объявления о вакансиях и желающих найти работу, информацию о продаже и обмене оборудования, а также рекламу спонсоров [1].

Электронная версия вестника размещается на вебсайте МОЭ <https://ieprs.org/newsletterpage/>, причём один выпуск в году (первый) находится в свободном доступе. Журнал печатается в полном цвете в типографии Westport (Сент-Эндрюс, Великобритания).



В 2024 году редакция подготовила один двойной выпуск и два одиночных выпуска нашего издания [2–4]. Как вы знаете, каждая обложка *EPR newsletter* призвана проиллюстрировать исследования выдающегося учёного, удостоенного отличия сообщества магнитного резонанса. Однажды преданный читатель *EPR newsletter*, которому наше издание нравилось почти так же, как и мне, рассказал мне, что первое, что он делает, когда получает копию нового выпуска, он пытается угадать, чьё исследование проиллюстрировано на его обложке. Я не помню, рассказывал ли он мне когда-либо, как часто ему удавалось угадать, но мне интересно, повезло ли ему с обложкой двойного выпуска. На ней проиллюстрированы исследования Сонги Хан, бывшего президента МОЭ, лауреата премии Брукера 2024 года за вклад в разработку и применение методов магнитного резонанса.

Этот двойной выпуск посвящён 80-летию открытия ЭПР Евгением Константиновичем Завойским. Также представлена читателям команда руководителей МОЭ на 2024–2026 годы ([2], стр. 3–6). В своём Письме президента Марина Беннати поздравляет сообщество ЭПР с 35-летием МОЭ, главной целью которого является продвижение знаний, а также стимулирование разработок и приложений спектроскопии ЭПР, формулирует задачи текущей деятельности МОЭ и пути их реализации. В конце 2023 года были объявлены лауреаты МОЭ 2024 года: Медаль МОЭ по химии Кристиане Тиммель за её основополагающий вклад в развитие применений ЭПР в химии; Медаль МОЭ за разработку приборов и методов Хироши Хирата за его основополагающий вклад в развитие методов спектроскопического картирования ЭПР и низкочастотных спектрометров ЭПР для биомедицинских приложений, а также Премия для молодых исследователей Алексею Богданову за значительный вклад в спектроскопию

ЭПР. Особые сердечные поздравления Джиму Норрису, президенту МОЭ (1996–1999), в связи с премией за его новаторскую работу в области время-разрешенного ЭПР, оптической спектроскопии и эффектов магнитного поля для выяснения молекулярной структуры и динамики парамагнитных частиц.

Я бы сказала, что в более широком смысле прекрасная птица в свободном полёте на обложке [3] может также рассматриваться как символ ЭПР в расцвете восьмидесяти лет достижений и открытий. Нет никаких препятствий полёту мысли бывших и нынешних исследователей, посвятивших свою жизнь работе в различных областях науки с использованием передовых методов ЭПР.

Этот безграничный полёт мысли продемонстрирован в обзоре достижений исследований в области ЭПР и его славного будущего, представленным в Письме президента МОЭ Марины Беннати и интервью бывших президентов МОЭ: Гарольда Шварца, Киса МакЛохлана, Джеймса Норриса, Джона Пилброу, Вольфганга Любича, Джека Фрида, Хитоши Охты, Клауса Мёбиуса, Томаса Приснера, и Сонги Хан, дополненных интервью Гуннара Йешке, президента Европейской федерации групп ЭПР, Цзянфэна Ду, президента Азиатско-Тихоокеанского общества ЭПР, и Фредерика Жаспара и Сильвии Каспшак, представителей фирмы Брукер БиоСпин, спонсора МОЭ на протяжении 35 лет ([2], стр. 3, 4, 7–13). Чтобы сохранить баланс, мы также представили слово молодому поколению исследователей ЭПР, а именно бывшим лауреатам премии МОЭ для молодых исследователей: Илье Каминкеру, Клаудии Тейт, Сергею Веберу, Фажану Ши, Шунсукэ Фуруйе, Томасу Шмидту, и Асифу Экибалу ([3], стр. 3–6).

Чтобы показать молодость ЭПР и указать на ещё более захватывающие будущие разработки, Гарет Итон, Сандра Итон и Кев Салихов объявили о специальном выпуске

Applied Magnetic Resonance (Springer). Специальный выпуск: “Празднование 80-летия ЭПР. Часть I” уже опубликован как том 55, выпуск 9. Части II и III опубликованы как том 56, двойной выпуск 1-2 и выпуск 5, соответственно. Учитывая крайний срок подачи заявок 30 ноября 2024 года, многие использовали шанс добавить свою каплю мёда в общий улей и поделиться с сообществом магнитного резонанса результатами своих последних исследований, отправив свою рукопись в этот журнал.

Оглядываясь назад, приятно осознавать, что наши планы отпраздновать 80-ю годовщину открытия ЭПР во всех выпусках нашего издания в 2024 году осуществились. Был соблюден хороший баланс между зрелостью и молодостью, опытом и страстью, чтобы отразить членство ЭПР-исследователей в сообществе ЭПР. Кульминацией нашего празднования стало ежегодное общее собрание МОЭ 2024 года ([4], стр. 3–6), которое состоялось на 63-й ЭПР-конференции в Скалистых горах, штат Колорадо, США ([4], стр. 12, 13).

Удивительно, насколько плодотворным был 2024 год для нашего сообщества ЭПР. Развитие всех инициатив, задуманных и реализованных руководителями МОЭ, чья неиссякаемая креативность замечательна, сопровождалось мощной поддержкой со стороны членов МОЭ. Будучи уроженкой Казани, я взволнована и вдохновлена тем, что ЭПР впервые наблюдался в экспериментах, проведенных 36-летним доцентом Казанского государственного университета Евгением Константиновичем Завойским. Интересно, что в 2024 году празднуется 220-летие Казанского университета, который также известен как родина неевклидовой геометрии и место, где был открыт элемент рутений.

Журнал “Applied Magnetic Resonance”

Международный журнал “Applied Magnetic Resonance” – один из первых научных журналов в нашей стране, печатающийся на английском языке и посвященный приложениям магнитного резонанса в физике, химии, биологии, медицине, геохимии, экологии и т.д.

Журнал создан по инициативе акад. К. М. Салихова при поддержке РАН. Издаётся с 1990 года.

Редакция журнала расположена в КФТИ КазНЦ РАН. Издателем журнала является издательство Шпрингер (Вена Нью Йорк), расположенное в Вене, Австрия.

В 1990 году выпущен один том (три выпуска), в 1991 году выпущен один том (четыре выпуска), в 1992 году выпущен один том (шесть выпусков), с 1993 по 2012 год выпускалось два тома (четыре выпуска каждый), а с 2013 года ежегодно, регулярно и с высоким качеством, удовлетворяющим требованиям международной научной

Конеч года был тяжёлым для нашего сообщества магнитного резонанса. До нас дошли печальные новости о том, что мы потеряли Клауса Мёбиуса, Алекса Пайнса, Нобору Хироту и Ральфа Вебера, выдающихся представителей сообщества ЭПР. Эта утрата очень болезненна для всех нас, и мы отдадим им должное в колонке In Memoriam в следующем выпуске *EPR newsletter*. Наша благодарная память сохранит их живыми на долгие годы.

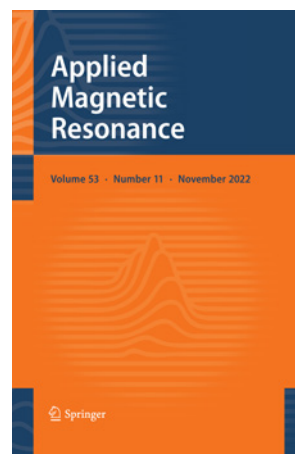
Мне приятно поблагодарить всех авторов *EPR newsletter*, руководителей МОЭ и нашу замечательную команду помощников-редакторов: Кэндис Клуг, Хитоши Охта и Сабину Ван Дорслаер, а также нашего гениального технического редактора Сергея Ахмина. Особая благодарность редакторам долгоживущих колонок: Джону Пилброу (EPR Newsletter Anecdotes), Кэндис Клуг (New EPR Faculty), Вольфгангу Любицу (Guest of the Issue), и Стефану Штоллю (Software).

И не забывайте девиз *EPR newsletter*: “Вы являетесь источником новостей в мире ЭПР, а мы представляем их в нашем издании”. Добро пожаловать в *EPR newsletter*!

Литература

1. Мосина Л.В.: Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2023. Ежегодник (Салихов К.М., Хантимеров С.М., ред.), с. 151, 152. Казань: ФИЦ КазНЦ РАН, 2023.
2. EPR Newsletter 34, no. 1-2 (2024)
3. EPR Newsletter 34, no. 3 (2024)
4. EPR Newsletter 34, no. 4 (2024)

Л. В. Мосина,
главный редактор



общественности и издательства Шпрингер, выпускается один том (двенадцать выпусков).

Impact factor журнала: 2022 – 1.1.

Журнал индексируется в BFI List, Baidu, CLOCKSS, CNKI, CNPIEC, Chemical Abstracts Service (CAS), Current Contents/Physical, Chemical and Earth Sciences, Dimensions,

EBSCO, EI Compendex, Google Scholar, INIS Atomindex, INSPEC, Japanese Science and Technology Agency (JST), Naver, OCLC WorldCat Discovery Service, Portico, ProQuest, SCImago, SCOPUS, Science Citation Index Expanded (SCIE), TD Net Discovery Service, Wanfang.

“Applied Magnetic Resonance” публикует оригинальные статьи, предпочтительно по новым приложениям техники магнитного резонанса и по новым экспериментальным методам. Рутинные приложения в структурной химии находятся вне тематики журнала. Журнал печатает приглашённые обзорные статьи по методам и приложениям ЯМР, ЯКР, ЭПР, мёсбауэровской спектроскопии и т.д. Публикуются специальные выпуски под редакцией известных учёных, посвящённые актуальным проблемам магнитного резонанса.

“Applied Magnetic Resonance” опубликовал специальные выпуски оригинальных статей, подготовленных в рамках Амперовских конгрессов, а также ряда специализированных Амперовских симпозиумов и международных конференций.

В 2024 году редакцией подготовлен 55-й том журнала, состоящий из двенадцати выпусков. Среди них – тройной номер специального выпуска, посвящённого 80-летию известного учёного, лауреата международной премии им. Е.К. Завойского 2003 года профессора Уэйна Л. Хаббела, отмеченного за развитие и применение метода адресных спиновых меток. Темы спецвыпуска включают, но не ограничиваются следующими: передовые экспериментальные/теоретические методы в ЭПР спектроскопии; применение ЭПР спектроскопии в биофизике и науке о белках; спиновая химия и методы спиновой маркировки; метод ЭПР высокого давления и его применение в биофизике; структура и динамика исследований трансмембранных белков. Этот выпуск подготовили гостевые редакторы профессора Жонг-ю Янг (Университет Северной Дакоты, США), Кэндис Клуг (Медицинский колледж штата Висконсин, США), и Миён Ким (Университет штата Мичиган, США).

Некоторые интересные аспекты современных тенденций в магнитном резонансе, которые могут привести к появлению новых методологий и важных практических приложений, рассмотрены в специальном выпуске, подготовленном гостевыми редакторами профессорами Владимиром И. Чижиком (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия) и Муратом С. Тагировым (Казанский федеральный университет, Казань, Россия).

Восьмидесятилетие открытия ЭПР Е. К. Завойским в Казани отмечено специальным выпуском (в 2024 году вышла часть I), в котором содержатся статьи, подтверждающие молодость и потенциал ЭПР и указывающие на ещё более захватывающие перспективы. Этот спецвыпуск подготовили гостевые редакторы профессора Гарет и Сандра Итоны (Университет Денвера, США), и Кев М. Салихов (Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского, ФИЦ Казанский научный центр РАН, Россия).

Спектроскопия ЯМР и ЭПР является хорошо рекомендовавшим себя инструментом для исследования структуры и работы катализаторов. Она эффективна как для гомогенного, так и для гетерогенного катализа и предоставляет гибкий набор экспериментальных методов для изучения организации каталитических центров, молекулярных механизмов каталитических реакций, анализа промежуточных продуктов и динамики реагентов. За последнее десятилетие эти экспериментальные методологии были расширены дополнительными методами теоретической химии, включая, помимо прочего, методы молекулярной динамики и квантовой химии. Эти недавние достижения имеют большое значение, поскольку они в сочетании с методами магнитного резонанса обеспечивают детальное понимание электронного состояния активных центров катализатора. Некоторые недавние и интересные достижения в области применения магнитного резонанса в катализе отражены в специальном выпуске, подготовленном профессорами Даниилом И. Колоколовым и Олегом Н. Мартьяновым (Институт катализа им. Г. К. Борескова, Россия).

Специальный выпуск, посвящённый известному учёному, профессору Карло Корвайя по случаю его 85-летия, направлен на признание огромного вклада Карло Корвайя в развитие спектроскопии ЭПР. Охваченные темы включают, но не ограничиваются следующими: передовые экспериментальные или теоретические методы в ЭПР спектроскопии; применение стабильных радикалов в материаловедении; спиновая химия и соответствующие приложения, например, в молекулярном магнетизме, химии высокоспиновых органических или стабильных радикалов. Спецвыпуск подготовили профессора Марко Руцци и Лоренцо Франко (Университет Падуи, Италия).

*Л. В. Мосина,
заместитель главного редактора*

Премия имени М. Л. Блатта

Премия им. М. Л. Блатта для работников вспомогательных подразделений КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН за доброжелательное отношение к научным работникам и добросовестный многолетний труд была присуждена Учёным советом КФТИ Махову Дмитрию Александровичу.

Д. А. Махов уже много лет добросовестно трудится в нашем институте. Как водитель многократно обеспечивал проведение многочисленных мероприятий, организуемых институтом, что часто требовало работы в неурочное время, ответственного и неформального подхода к делу. Дмитрий Александрович не ограничивает круг своих обязанностей чисто водительской сферой. Он является активным участником ремонтных работ, без него не обходятся и многочисленные такелажные работы с экспериментальными установками. С любовью занимается облагораживанием институтской территории. И за каждое дело он берётся с энтузиазмом и огоньком.



Дмитрий Александрович Махов

Поздравляем Дмитрия Александровича, благодарим за доброжелательность и отзывчивость, ответственное и обязательное отношение к своей работе, желаем крепкого здоровья и благополучия.

*С. Г. Львов,
председатель комиссии по присуждению премии*

Репортаж с торжественного заседания, посвящённого проводам старого и встрече Нового 2025 года

27 декабря 2024 года сотрудники физтеха встретились в актовом зале на ежегодном торжественном заседании. По доброй традиции перед собранием была проведена фотосессия сотрудников с Дедом Морозом.

Заседание открыл руководитель КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН Сергей Мансурович Хантимеров. Заседание началось с минуты молчания в память о покинувших нас сотрудниках. Это Овчинников Игорь Васильевич, Мигачёв Станислав Александрович, Спиваковская Ада Наумовна, Хисамова Эльмира Рашидовна, Голенищев-Кутузов Вадим Алексеевич, Камалов Рустем Фаритович. Вечная память!

Далее Сергей Мансурович перешёл к подведению итогов уходящего года. В торжественной обстановке были вручены юбилейные медали “300 лет Российской академии наук” сотрудникам Института. В список награждённых вошли А. А. Бухараев (стаж 53 года), И. А. Гарифуллин (стаж 53 года), В. Ф. Тарасов (стаж 53 года), И. В. Овчинников (стаж 51 год), Н. М. Сулейманов (стаж 50 лет), Р. Н. Шахмуратов (стаж 49 лет), Ю. И. Таланов (стаж 48 лет), В. К. Воронкова (стаж 48 лет), К. М. Салихов (академик РАН), А. А. Калачёв (чл.-корр. РАН) и С. М. Хантимеров (руководитель КФТИ).

Сергей Мансурович поздравил Бухараева Анастаса Ахметовича с присвоением звания “Почётный работник науки и высоких технологий Российской Федерации” в 2023 году. Он также поздравил Арсланова Ильгиза Альбертовича и Шегеду Анатолия Михайловича с получением почётной грамоты Министерства образования и науки РТ за многолетнюю и плодотворную работу. Кроме этого, поздравил Руслана Булатовича Зарипова с получением медали “Памяти академика Н. М. Эмануэля” за большие достижения в области химической и биохимической физики. После этого Сергей Мансурович вручил удостоверения о повышении квалификации участникам республиканской школы заведующих кафедрами и лабораториями: А. А. Камашеву, И. З. Латыпову, Н. И. Нургазизову, Ю. В. Садчикову, В. В. Семашко, А. В. Шкаликову. Также он рассказал о научных достижениях за 2024 год, в частности, были отмечены новые проекты РНФ, победители конкурса на предоставление грантов молодым кандидатам наук АН РТ в уходящем году. Особое внимание было уделено сотрудникам, защитившим докторскую (Е. Л. Вавилова) и кандидатские (И. И. Гимазов, Р. Ф. Ликеров, Р. Р. Гарипов) диссертации в уходящем году. Для создания небольшой паузы в офи-



Дед Мороз действующий – Евгений Митюшкин, и
Дед Мороз в отставке – Артемий Шмелёв

Прекрасная женская половина руководства института с Дедом Морозом: заместитель руководителя КФТИ Т. П. Гаврилова, главный учёный секретарь КазНЦ РАН С. А. Зиганшина и учёный секретарь КФТИ Л. И. Савостина.



циальной части вечера руководитель КФТИ передал слово Кудрявцевой Елене для проведения конкурса “Глазомер”, где нужно было максимально точно отмерить заданный вес различных сыпучих и не только материалов, например, ватных дисков, круп или металлических деталей. Активное участие в конкурсе приняли научные сотрудники Артемий Шмелёв, Юрий Садчиков, Вадим Семашко и Андрей Суханов. Задание оказалось непростым, но сотрудники прекрасно справились, результатом соревнований стала дружественная ничья.

Сергей Мансурович продолжил своё выступление и перешёл к результатам проведённой научной конференции “Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives” (EPR-80), в рамках которой проходила церемония вручения Международной премии им. Завойского 2024. Сергей Мансурович выразил благодарность всем организаторам конференции. Кроме этого, было отмечено

проведение в стенах КФТИ семинара памяти Григория Бенционовича Тейтельбаума.

Руководитель КФТИ рассказал о вкладе сотрудников физтеха в популяризацию науки и о проведённых с этой целью мероприятиях. Отметил кадровые изменения, произошедшие в 2024 году, далее перешёл к поздравлению юбиляров. Свою речь руководитель физтеха завершил поздравлениями с наступающим Новым годом и тёплыми пожеланиями.

Подхватив эстафету от руководителя института, торжественное заседание продолжили ведущие Василий Сахин и Рамиля Гатауллина, используя для работы с залом прекрасную презентацию, подготовленную Дианой Железняковой. Желающие из зала приняли участие в конкурсе “Поздравление”: было необходимо достать из шляпы слово с новогодней тематикой и использовать это слово в своей поздравительной речи. Конкурс получился очень душевным и искренним. Сотрудники смогли услышать слова поздравления от директора ФИЦ КазНЦ РАН А. А. Калачёва, научного руководителя института К. М. Салихова, председателя профкома Р. М. Ерёминой и от многих других.

Для традиционного поздравления сотрудников и ветеранов КФТИ на сцену были приглашены председатель профкома Р. М. Ерёмин и член профкома С. Г. Львов. Почётные грамоты и бессрочные удостоверения сотрудника



Директор ФИЦ КазНЦ РАН, член-корр.РАН А. А. Калачёв и академик РАН К. М. Салихов в ожидании начала новогоднего вечера.



Ведущие торжественного заседания Василий Сахин и Рамиля Гатауллина

КФТИ были вручены Д. В. Ильматовой, А. Н. Туранову, Б. З. Рамееву и В. Е. Катаеву. Поздравили также и Махова Дмитрия Александровича, получившего в этом году премию им. М. Л. Блатта.

Далее ведущие перешли к конкурсу “Формула всего”. В формате викторины гостям нужно было угадать, какие известные фразы зашифрованы на картинках. Самые сообразительные были награждены новогодними сувенирами с символикой КФТИ.

От старших сотрудников перешли к молодёжи. Ведущими были отмечены молодые сотрудники, которые

выиграли различные конкурсы и гранты. Камашев Андрей стал лучшим молодым учёным РТ в 2023 году. Гимазов Ильнур стал лауреатом Казанской премии им. Е. К. Завойского 2024 года среди молодых учёных. В конкурсе “Лучший молодой учёный (аспирант) ФИЦ КазНЦ РАН” второе место среди молодых учёных заняла Морозова Анна. Среди аспирантов в этом конкурсе второе место занял Бегишев Евгений, а третье – Попов Даниил. Премию им. Б. М. Козырева получил Гимазов Ильнур, а премию им. Н. С. Гарифьянова – Бегишев Евгений.

Без сомнения, наши молодые учёные добились бы таких результатов даже с завязанными руками. Проверить это удалось в конкурсе “Сиа́мские близнецы”. Участники образовали команды по два человека, левая рука одного участника и правая рука второго гостя были жёстко зафиксированы, свободными руками же они должны были выполнить нехитрые действия, например, завязать бант или сложить из салфетки самолёт. Участники со всеми заданиями успешно справились!

После этого ведущие вернулись к теме успехов молодых учёных. Пост председателя Совета молодых учёных занял Ранис Гарипов, он вошёл в состав Учёного совета КФТИ. Силами совета молодых учёных и с поддержкой руководства физтеха было создано молодёжное объединение “Творечник”. В рамках еженедельных встреч молодые учёные делились опытом, делали доклады о своей деятельности, общались в неформальной обстановке с коллегами из различных исследовательских центров Казани. Для психологической разгрузки и сплочения молодых сотрудников были проведены творческие мастер-классы и вечера настольных игр.

Для раскрытия творческого потенциала гостей новогоднего вечера был проведён конкурс “Сделай сам!”. Весь зал дружно поделил запасы воздушного пластилина



Слева направо: участники республиканской школы заведующих кафедрами и лабораториями Н. И. Нургазизов, А. А. Камашев, В. В. Семашко, Ю. В. Садчиков, а также руководитель КФТИ С. М. Хантимиров.



Участники конкурса “Глазомер” В. В. Семашко, А. А. Суханов, Т. П. Гаврилова.



Новогодние сувениры с символикой КФТИ.

и каждый смастерил символ нового года – змею – в память о проведённом мероприятии. У каждого получились уникальные произведения искусства.

От достижений молодых учёных ведущие перешли к спортивным победам. В рамках Академиады ФИЦ КазНЦ РАН второе место заняла волейбольная команда физтеха, наши футболисты заняли первое место. В лыжном спорте второе место взял Ахметов Мансур. В настольном теннисе среди мужчин первое место занял Лапаев Дмитрий, второе – Петров Сергей. Петров Да-

нил принял участие в шахматном бою, победы ждут его впереди! В VI Всероссийской Академиаде по волейболу приняли участие 110 спортсменов из 14 городов России, в том числе сотрудники КФТИ. В рамках Академиады наша волейбольная сборная заняла второе место в Играх за кубок Дружбы и Единства.

По завершении торжественного заседания все сотрудники спели гимн физтеха и перешли к неформальному празднованию наступающего Нового 2025 года, угощаясь шампанским и мандаринами.

*Д. Е. Железнякова,
фотографы А. М. Шегада и Ю. В. Садчиков*

СМИ о сотрудниках института

Будущее науки за молодыми¹

В передаче “Точка опоры” на телеканале ТНВ выступил руководитель лаборатории проблем спинпроводимости и спинтроники КФТИ А. А. Камашев



Реально ли сегодня молодым заработать денег и сделать карьеру в науке? Каким должен быть процент молодых учёных для развития науки? Как происходит взаимодействие науки и бизнеса? Как поддерживает Республика Татарстан молодых учёных и науку в целом? Какие разработки молодых учёных сейчас воплощаются в жизнь? Эти и другие вопросы обсуждали гости программы:

- Рифкат Нургалиевич Минниханов, президент АН РТ, профессор, д.т.н.;
- Рашит Курбангалиевич Низамов, ректор КГАСУ, академик АН РТ, профессор, д.т.н.;
- Ирек Изайлович Мухаматдинов, старший научный сотрудник Института геологии и нефтегазовых тех-

нологий КФУ, к.т.н., член движения молодых учёных и специалистов Республики Татарстан;

- Михаил Алексеевич Варфоломеев, зав. кафедрой разработки и эксплуатации месторождений трудно-извлекаемых углеводородов Института геологии и нефтегазовых технологий КФУ, к.х.н.;
- **Андрей Андреевич Камашев**, руководитель лаборатории проблем спинпроводимости и спинтроники КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, председатель Совета молодых учёных и специалистов ФИЦ КазНЦ РАН, член движения молодых учёных и специалистов Республики Татарстан;
- Сергей Александрович Никифоров, старший преподаватель кафедры лазерных и аддитивных технологий КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева.

¹ Телеканал ТНВ, передача “Точка опоры”. 1 февраля 2024 г. Ведущая Светлана Кадырова. https://vk.com/video-25135129_456256675

Алексей Калачёв, директор ФИЦ КазНЦ РАН: “Санкции – это независимая оценка значимости проводимых нами исследований”²

Лекарство от рака и квантовые технологии – какие ещё открытия казанских учёных потрясут мир?

Сегодня страна отмечает 300-летие российской науки: 28 января (8 февраля) 1724 года указом императора Петра I была создана первая в России Петербургская академия наук. О том, чем живёт академическая наука в Казани, с какими сложностями сталкивается, какие прорывные исследования проводят учёные, – в интервью директора Федерального исследовательского центра “Казанский научный центр Российской академии наук”, профессора и члена-корреспондента РАН Алексея Калачёва. А также в нашем обзоре – современные научные открытия учёных КазНЦ РАН.

Фундаментальные исследования становятся базой для развития прикладных работ

– Алексей Алексеевич, у Казанского научного центра РАН большая история – в этом году вам исполняется 79 лет. Какие задачи сегодня стоят перед учёными центра?

– Казанский научный центр был организован в 1945 году как Казанский филиал Академии наук СССР. Основная наша задача – выполнение фундаментальных исследований в различных областях науки: физика, химия, биология, энергетика, механика, сельское хозяйство. Сегодня мы являемся Федеральным исследовательским центром, где наряду с фундаментальными активно ведутся и прикладные исследования. В состав центра входят шесть институтов: Институт органической и физической химии им. Арбузова, Казанский физико-технический институт им. Завойского, Татарский НИИ сельского хозяйства, Казанский институт биохимии и биофизики, Институт энергетики и перспективных технологий, Институт механики и машиностроения. В штате более тысячи сотрудников, из которых 800 – это научные сотрудники. Исследования ведутся в рамках государственного задания и, кроме того, поддерживаются различными грантами. Так, ежегодно мы выполняем около 100 грантов Российского научного фонда. Широкие фундаментальные исследования становятся базой для развития прикладных работ, которые уже выполняются по заказу промышленных партнёров.



Директор Федерального исследовательского центра “Казанский научный центр Российской академии наук”, профессор, член-корреспондент РАН Алексей Калачёв.

– Какими проектами, которые были реализованы или находятся в стадии реализации, вы можете поделиться?

– Среди крупных в 2023 году могу отметить проект, который ведётся в рамках Федеральной научно-технической программы развития генетических технологий. Его задача – разработка биопрепаратов на основе консорциумов микроорганизмов. Если говорить о конкретном прикладном результате проекта – на основе проведённых исследований создано пять биопрепаратов, которые прошли успешную апробацию у промышленных партнёров проекта.

– Что за биопрепараты? Какова сфера их применения?

– Одни могут быть использованы в сельском хозяйстве, например для стимуляции роста растений, другие – направлены на решение экологических проблем, таких как утилизация твёрдых бытовых отходов или переработка илов в очистных сооружениях, переработка нефтепродуктов. В целом собрана коллекция из 16 тысяч микроорганизмов, что является очень важным результатом для развития биотехнологий и может стать основой для создания региональной ресурсной коллекции.

– Какие ещё проекты велись вашим центром в 2023 году?

– Ещё один масштабный проект выполняется совместно с Институтом прикладной физики РАН в Нижнем Новгороде

² “Бизнес-онлайн”. 8 февраля 2024 г. Корреспондент – Елена Фадеева. Статья печатается с сокращениями.
<https://www.business-gazeta.ru/article/622410>

в области квантовых технологий, квантовых коммуникаций. Он ведётся по заказу Российских железных дорог, отвечающих за реализацию дорожной карты по развитию квантовых коммуникаций в РФ, что неудивительно, поскольку РЖД владеют большой сетью оптоволоконных линий связи, которые требуют максимальной защиты. В рамках этого проекта мы разрабатываем так называемый квантовый повторитель – устройство, которое позволит распространять квантовую информацию на большие расстояния и создать квантовый интернет. В настоящее время в России прокладывается большая магистральная квантовая линия связи, которая соединяет Санкт-Петербург, Москву, Нижний Новгород, и эта линия уже приходит в Казань. В перспективе как раз на участке Казань – Нижний Новгород и могут быть внедрены результаты нашего проекта.

Кроме того, в центре выполняются исследования при поддержке мегагрантов.

– Мегагранты – это какие-то особенные, более масштабные проекты?

– Это проекты, направленные на создание новых лабораторий под руководством ведущих мировых учёных. За последние годы в КазНЦ РАН создано три лаборатории мирового уровня при поддержке таких грантов. Первый был посвящён разработке квантовых сенсоров на основе алмазов, второй – изучению снежной плесени, а последний проект, который выполняется в настоящее время, посвящён поиску новых эффективных средств для лечения онкологических заболеваний. Исследования ведутся под руководством ведущего учёного из США, который, несмотря на очевидные сложности, приезжает в Россию. К концу 2023 года в рамках проекта синтезированы десятки химических соединений, из которых выбраны соединения-лидеры, которые разрушают опухолевые клетки, но сохраняют здоровые клетки.

Это примеры крупных проектов, которые выполнялись в прошлом году.

Санкции – это независимая оценка наших исследований

– 2023 год для вашего центра был достаточно сложным: в июле центр попал в блокирующий санкционный список США. А ведь центр вёл активную международную деятельность. Например, выполнялись международные проекты и проекты под руководством иностранных ведущих учёных. Вообще, как повлияли санкции на деятельность центра?

– Мы попали под санкции, потому что у центра есть серьёзные результаты по квантовым технологиям, нанотехнологиям и радиоспектроскопии. По сути, получилась некая независимая оценка значимости и качества проводимых нами исследований. Конечно, то, что прекратились

некоторые совместные проекты либо поставлены на паузу, печально. Но сказать, что кардинально эта ситуация повлияла на нашу работу, нельзя. Все совместные разработки либо уже завершены, либо мы завершаем их самостоятельно. И все обязательства в рамках мегагрантов нами выполнены.

Знаете, рано или поздно “война” санкций закончится, и наука, особенно фундаментальная, – это та область человеческой деятельности, которая будет этому только способствовать. А пока налаживаем научные контакты с другими странами. В ближайшее время планируем подписать договор о сотрудничестве с Национальным институтом биотехнологий Малайзии – есть взаимный интерес по целому ряду направлений. Но проблемы, безусловно, появились. Основная – невозможность закупать научное оборудование у целого ряда ведущих производителей. А для научных исследований необходим широкий спектр оборудования, которого, к сожалению, в России не делают.

– Как выходите из положения?

– Ищем замену у тех же китайских производителей. Правда, пока приходится покупать как коша в мешке: в процессе эксплуатации оборудования часто обнаруживаются нюансы, о которых никто не предупреждал. Ну и, кроме того, работает параллельный импорт.

– В 2019 году ФИЦ КазНЦ РАН по результатам оценки эффективности деятельности был отнесён к научным учреждениям первой категории и вошёл в число ведущих научных организаций России. Что это дало центру?

– Во-первых, появился доступ к целому ряду программ, в которых могут участвовать только организации первой категории. Например, мы ежегодно получаем гранты на обновление приборной базы: с 2019 года закупили оборудования почти на миллиард рублей. Получили возможность создавать молодёжные лаборатории в рамках национального проекта “Наука и университеты”. За эти годы в центре открыто 10 молодёжных лабораторий, это очень хороший инструмент поддержки молодых учёных. У нас создан “Селекционно-семеноводческий центр”. Это только часть тех возможностей, которые даёт статус научного учреждения первой категории.

– Как вы считаете, наука сегодня интересна современным молодым людям?

– 50 процентов наших сотрудников – молодые учёные. Это неплохой показатель. В некоторых научных группах их большинство, в том же проекте РЖД по квантовым технологиям вообще практически одна молодёжь. Молодым наука интересна, хотя, наверное, и не так, как в 60–70-е годы прошлого столетия. Тем не менее я думаю, что в основе этого интереса остаются всё те же особенности

научной работы – радость научных открытий, удовлетворение от более глубокого понимания сути вещей и возможность реализовать свои амбиции. При этом важно создавать условия, когда молодые ребята могут попасть в проекты со студенческой скамьи, решая при этом не учебные задачи, а работая в команде на практически важный результат. Именно это мы и стараемся делать.

– *Какие планы на наступивший год? Какие проекты намерены реализовать?*

– В 2022 году мы утвердили программу развития центра на ближайшие годы. В ней сделан акцент на четырёх приоритетных направлениях: разработка новых лекарственных препаратов, квантовые технологии, агробиотехнологии, физико-химические основы решения экологических проблем. Это если совсем коротко. Все направления актуальны, важны с точки зрения обеспечения технологической независимости и предполагают реализацию работ полного цикла: от фундаментальных исследований до создания образцов и внедрённых технологий. Планируется, что для выполнения прикладных разработок в дальнейшем будет

создан единый Инжиниринговый центр. Так что одна из задач этого года – успешное выполнение намеченного плана. Кроме того, поскольку этот год особенный – год 300-летия РАН и Год научно-технологического развития РФ, много внимания планируем уделять популяризации науки.

Уникальные композиты и гидродинамическое моделирование пластовых систем

Учёные и разработчики Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского создали электропроводящий композиционный материал на основе полимеров и углеродных наноструктур.

Разработанный композиционный материал может быть использован для изготовления электропроводящих, антистатических и экранирующих материалов и покрытий с заданной величиной электропроводности. Этот уникальный материал может быть использован в области электроэнергетики, химической промышленности, авиа-, судостроения, электроники.

Репортаж о работе КФТИ³

Корреспондент телеканала ТНВ Татьяна Тимошенко побывала в лаборатории Казанского физико-технического института имени Завойского, где завершились эксперименты, результаты которых способны произвести резкий технологический рывок сразу в нескольких сферах – от электроники до медицины.

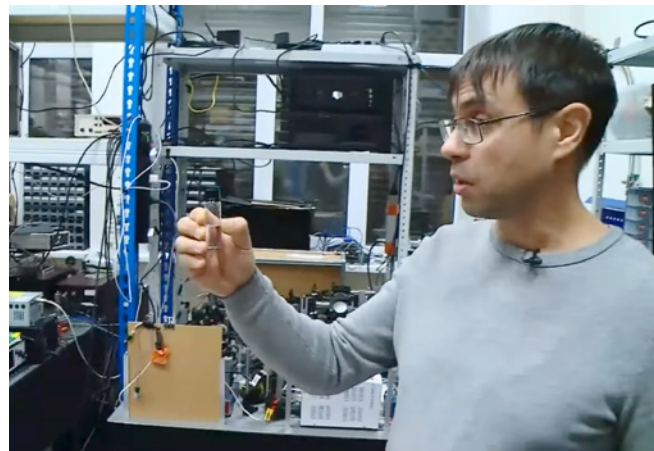
Виктор Никифоров: “Эта лаборатория называется “Квантовая оптика в алмазах”, мы занимаемся синтезом, созданием люминесцентных наносенсоров. В этой лаборатории буквально вчера ещё проводились эксперименты поэтому здесь такой рабочий беспорядок”.

Разработка научной гипотезы продолжалась несколько лет и привела учёных института имени Завойского к новому способу синтеза наночастиц.

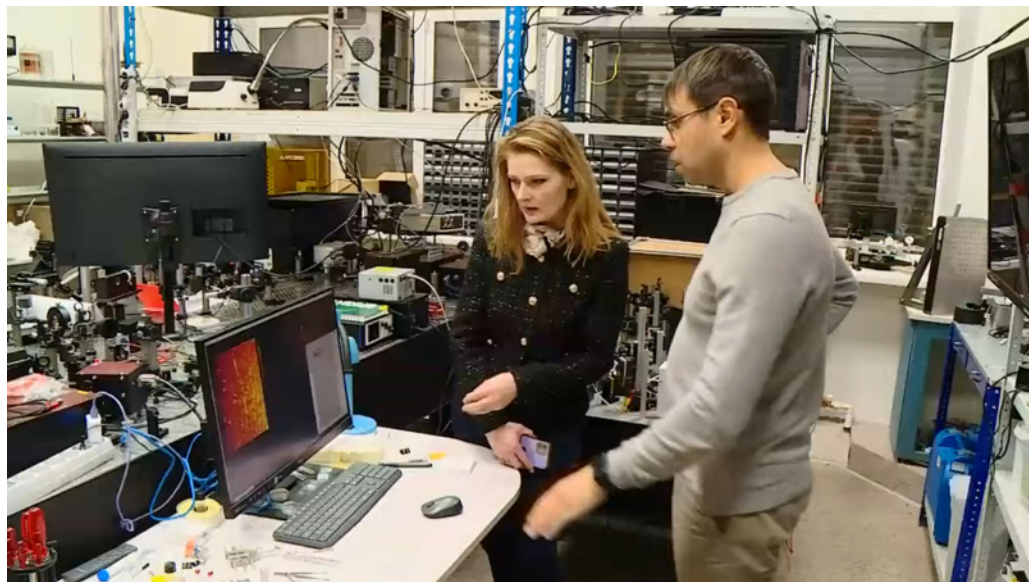
Виктор Никифоров: “Жидкость, которую вы видите – это полимер, который в процессе высыхания образует тонкую поверхность. Если мы этот полимер нанесём на какую-нибудь микросхему, то в результате получим очень тонкий поверхностный слой, содержащий люминесцентные наносенсоры. Эти наносенсоры позволят

нам измерить локальную температуру с разрешением до одного микрона. С точки зрения новизны – безусловно, мы сделали то, что до нас никто не делал, и это можно публиковать”.

Люминесцентные наносенсоры – это будущее, они будут применяться в разных областях – от сложной электроники, бытовой техники до диагностики и доставки лекарств в конкретную клетку. Гонка за этими технологиями идёт во всём мире. Первейшие конкуренты – лаборатории Китая и США.



³ Телеканал ТНВ, передача “7 дней”. 11 февраля 2024 года. Приводится с сокращениями. https://youtu.be/LeG98XjRU4k?si=iNI_PiGxVyW5NFnn.



Сергей Хантимеров, руководитель КФТИ: “Всё больше внимания уделяется именно реализации как фундаментальных, так и прикладных разработок. Если говорить о поддержке государства, то можно озвучить, например, возможность создания некоторых лабораторий или каких-то направлений, в котором одним из основных аспектов является обязательная практическая реализация полученных результатов.

Начиная уже с прошлого года при подаче заявки необходимо указывать индустриального партнёра, готового реализовывать у себя на производстве те результаты которые ты обязуешься получить”.

У Андрея Камашева, руководителя лаборатории проблем спинпроводимости и спинтроники в послужном списке с десяток публикаций в мировых журналах. В научном мире





статьи отбирают по степени новизны, то есть фактически каждая из них – это открытие. Руководитель лаборатории готовится к защите докторской диссертации.

В лаборатории изучают свойства магнитных, сверхпроводящих и топологических материалов в различных сочетаниях. В 2010 году сотрудниками лаборатории впервые в мире был экспериментально реализован сверхпроводящий спиновый клапан, в 2024 году им удалось увеличить его функциональные параметры в 60 раз и сейчас они – мировые лидеры в создании таких систем.

Андрей Камашев: “Если мы говорим про одержимость – то по большому счёту люди, особенно современная

молодёжь, которая идёт в науку – это та часть населения, которая одержима конкретно какими-то определёнными научными идеями или научными открытиями и благо что у нас богатые казанские научные школы – и в Казанском федеральном университете, и у нас в Федеральном исследовательском центре. Люди идут в науку, естественно, не за деньгами, а чтобы заниматься тем, что им нравится. Поэтому я думаю, что некая одержимость в этом присутствует, конечно”.

Год научно-технологического развития в Татарстане официально стартовал, а значит впереди – новые открытия.

Лучший молодой учёный Татарстана 2023 года – Андрей Камашев⁴

Съёмочная группа телеканала ТНВ побывала в лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники КФТИ в момент проведения эксперимента. В своём эксперименте, над которым работали больше года, учёные наблюдали эффект уединённой сверхпроводимости.

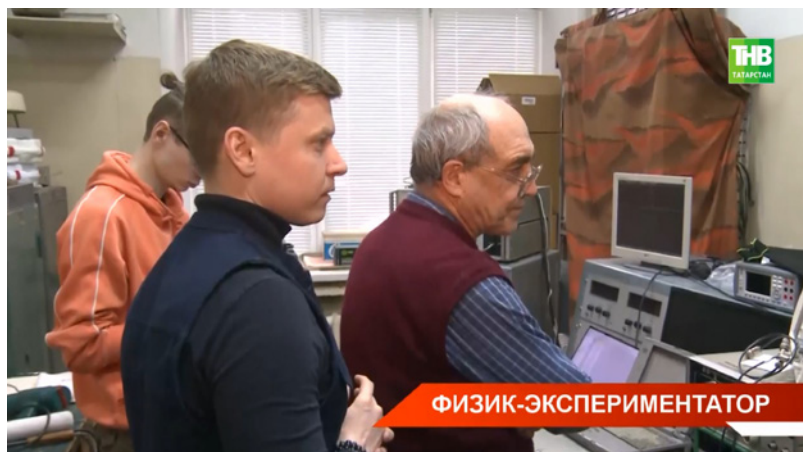
Лабораторией руководит молодой татарстанский учёный Андрей Камашев.

“Мой старший брат, Камашев Мстислав Андреевич, закончил Казанский университет в 18 лет, а школу закончил в 13 лет. Заниматься наукой – семейная традиция,



Андрей Андреевич Камашев

⁴ Телеканал ТНВ. 2 апреля 2024 года. Корреспонденты Вероника Гайнутдинова, Алмаз Зиятдинов.
https://youtu.be/bAu_VzajRM?si=5DB4mwQIgWmarrgQ



родители всегда поддерживали мои начинания”, – рассказывает Андрей Камашев.

Андрей Камашев окончил 131-й физико-математический лицей, поступил в Институт физики КФУ, на третьем курсе выбрал направление квантовой и микроэлектроники.

Андрей Камашев: “Конечно, большая удача, что удалось попасть к такому научному руководителю – Гарифуллину Ильгизу Абдулсаматовичу. Он умеет зажигать, умеет дать интересное направление. То, чем мы занимаемся – это и интересно, и перспективно. Немаловажно и то, что есть богатая научная школа. Когда ты видишь, что направление действительно перспективно – это конечно тебя и заряжает, и зажигает, и хочется продолжать этим заниматься”.

Андрей Камашев проходил обучение в Германии, поступил в аспирантуру Института имени Завойского, остался здесь работать и сегодня заведует лабораторией проблем сверхпроводимости и спинтроники.

“Физики делятся на теоретиков и экспериментаторов”, – говорит Андрей. Он относится ко вторым. У оборудования – напылительной установки – проводит по 10–12 часов. Так, в 2010 году ему и коллегам первыми в мире удалось создать спиновый клапан. Это наноструктуры из нескольких слоёв для микроэлектроники. Сейчас наши телефоны, ноутбуки и другая подобная техника работает на полупроводниковой электронике, а сверхпроводящая спинтроника, которой занимается Андрей, позволит работать быстрее и энергоэффективнее.

Андрей Камашев: “На базе таких систем можно строить новые сверхпроводящие элементы памяти, логические элементы,

сверхпроводящий ключ, сверхпроводящий транзистор в будущем, что может послужить основными частями для квантового компьютера, который разрабатывается уже сейчас”.

Сегодня Андрей занимается научной и общественной деятельностью. В феврале выиграл Республиканский конкурс “Лучший молодой учёный ФИЦ КазНЦ РАН”, помогает тем, кто только делает первые шаги в науке. Есть и свои ученики.

Данила Арбузов, студент КФУ: “Благодаря ему я попал в КФТИ после защиты диплома. Он говорил, что есть лаборатория, можно приходить, работать, он отвечает на все вопросы, мы всё с ним обсуждаем, с ним даже можно спокойно поспорить!”

Физико-технический институт имени Завойского – подразделение Федерального исследовательского центра Казанский научный центр РАН. Половина коллектива – молодые учёные.



Алексей Калачёв, директор ФИЦ КазНЦ РАН: “Главное, что нам удаётся на сегодняшний день – это открывать молодёжные лаборатории. У нас в Казанском научном центре их десять, по самым разным направлениям науки, и это, конечно, очень хороший способ закрепить молодёжь, научить каким-то навыкам, организации научной деятельности”.

Для молодых учёных есть конкурсы и грантовая поддержка.

Андрей Камашев: “Наука требует терпения, выдержки и стремления. Нельзя сдаваться, нельзя унывать, бросать,

потому что как раз в тот момент, когда ты бросил – на следующий день может всё получиться, и вот этот момент ты можешь упустить. Поэтому ты должен верить в себя и делать свою работу. Как говорится – делай что должен и будь что будет”.

Андрей ещё в 25 лет стал кандидатом физико-математических наук, в апреле ему исполнится 33 года. Следующая ступень – защита докторской диссертации и, конечно, продолжение экспериментов и новые открытия!

Женский взгляд на фундаментальную науку. Интервью с Анной Морозовой⁵

Легко ли быть и жить молодой женщине, да и просто женщине, в науке? Какая химия руководит выбором жизни в фундаментальной науке, за закрытыми дверями лаборатории?

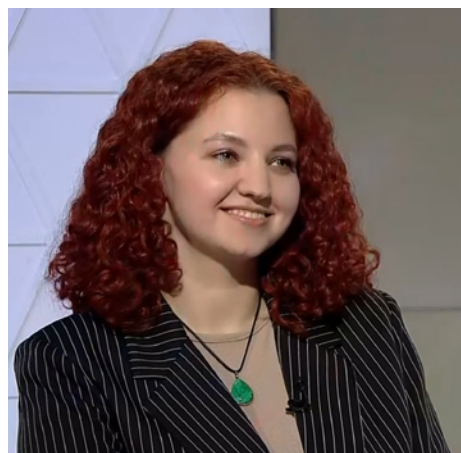
Эти вопросы обсуждались в студии программы “7 дней плюс” с Анной Морозовой, обладательницей звания лучшей молодой учёной в области физико-математических наук 2024 года, кандидатом химических наук.

Татьяна Тимошенко (ведущий программы):

– При подготовке интервью мы всегда стараемся использовать открытые источники. Но, как правило, если предстоит встреча с людьми науки, найти ничего невозможно. Это коротенькая справочка, карточка, так скажем, – где человек учился, где работает. Как Вы думаете, мир науки такой закрытый или он, может быть, скучный для широкой публики?

– Нет, мир науки конечно же не скучный. Зачем долго о себе рассказывать? Мы любим вкратце – ключевые слова. Что-то большее мы любим писать в публикациях, в своих работах – там уже можно развернуться от души, написать о своих исследованиях и обо всём новом, что мы делаем.

– Титул “Лучший молодой учёный” вы получили за работу “Вода как главный фактор образования микро и наноструктур в тонких органических плёнках”. Это звучит для меня как заклинание. В чём значение работы, сколько Вы в этой теме и где это можно применить?



Анна Сергеевна Морозова

– Как заклинание – это для меня как комплимент! Я люблю заклинания. Как говорил Артур Кларк – “любая достаточно развитая технология неотличима от магии”. Есть такая шутка – не учи физику в школе и тогда твой мир будет наполнен магией и волшебством. Но мы учили, и поэтому все эти исследования для нас – это не только какая-то тайна. Исследование, которые Вы назвали – я им занималась всю свою аспирантуру. Это четыре года. Это исследование началось ещё в моём бакалавриате, то есть с третьего курса учёбы. Потом, в магистратуре и аспирантуре я его продолжала, и это исследование – часть моей диссертационной работы. Не удивляйтесь, почему так долго, ведь это экспериментальная работа. Сначала нужно сделать образец, потом провести исследования используя различные методы. Естественно, эксперимент проводится не один раз.

Благодаря этому исследованию мы теперь знаем механизм кристаллизации структур, и этот механизм можно

⁵ Телеканал ТНВ, программа “Семь дней плюс”. 20 мая 2024 года. Ведущий программы – Татьяна Тимошенко. Печатается в сокращённом варианте.



использовать на более сложных структурах. После конкурса я разговаривала с коллегой-химиком как раз на эту тему и его очень заинтересовал механизм, который описан в нашей работе и мы планируем и дальше работать с его уже более сложными объектами.

– То есть Вы используете воду для образования наноструктур на тонких органических плёнках. Это, наверное, можно применить в медицине?

– Да, конечно. Мы работаем с биосовместимыми объектами, которые могут применяться в медицине. Некоторые кристаллические структуры обладают различными свойствами, например, пьезоэлектрическими, то есть при подаче напряжения они меняют геометрические параметры. Или наоборот, при изменении геометрических параметров на его поверхностях появляются электрические заряды. Такие структуры можно применять в различных наносенсорах, в нанокардиостимуляторах.

– Говорят, что учёные не всегда могут увидеть практический результат использования своих открытий. Это обидно или нет?

– Нет, это не обидно. Благодаря учёным, которые 100 лет назад проводили свои исследования, мы сейчас с удовольствием применяем их результаты. И если завтра мои исследования не будут где-то использованы, не факт, что и через 100 лет они не будут необходимы человечеству.

– Вы изучали и физику, и химию. Когда Вы всё успели? Ведь каждой из наук люди посвящают всю свою жизнь.

– Я училась в Казанском федеральном университете, в институте физики на направлении Общая физика. В бакалавриате я попала в Казанский физико-технический институт в лабораторию физики и химии поверхности, и там всё вместе – физика с химией и химия с физикой, потому что сейчас именно объединение наук даёт наилучший результат. Я закончила магистратуру по физике, но кандидатская у меня была уже по химическим наукам.

– Сейчас наука молодеет?

– Да. Сейчас самое время для молодёжи в науке, потому что есть огромная поддержка от государства, от Республики Татарстан, большое количество грантов и стипендий именно для молодых учёных – для студентов, для аспирантов, для молодых кандидатов наук. Когда я училась в аспирантуре, у меня был Грант Российского фонда фундаментальных исследований, который стимулировал меня на написание кандидатской диссертации. Сейчас у нас в лаборатории девушка пишет магистерскую диссертацию, и у неё есть грант от Президента Российской Федерации, то есть, на протяжении всей учёбы она получает стипендию и может не задумываться о том, что ей нужно где-то искать подработку. Она может спокойно заниматься своими исследованиями.

– Мне кажется, сейчас сократилось время исследований? Есть вычислительная техника, какие-то процессы можно ускорить?

– К сожалению, это не относится к экспериментальным работам. Мои эксперименты могут длиться годами. Ин-

тересно узнать, получится ли то, что мы запланировали, или получится совсем другое, то, что мы не ожидали. Экспериментальная работа долгая и кропотливая.

– Я общалась с Вашими коллегами – физиками, химиками, они все подтверждают, что настоящий учёный – это человек, одержимый какой-то идеей, что невозможно с 9 до 18 думать о науке, а после 18 – о чём-то другом. У Вас это по-другому происходит или нет? Вы такая же одержимая только одной идеей?

– Я точно такая же. В какой-то выходной, или после работы, в любой момент может прийти в голову идея, которую нужно проверить. Тогда нужно обязательно написать коллегам, чтобы не забыть, и запланировать эксперимент на рабочее время.

– Много ли женщин в науке? Мне кажется, у науки всё-таки мужское лицо. Хотя химия, математика, физика, биология, сама наука – слова женского рода, тем не менее, мне кажется, мужчин там больше. Или я не права?

– Вы правы, конечно. До сих пор процент женщин в науке очень мал. Среди старших коллег женщин совсем немного, среди молодых их уже больше. Я могу сказать про своих однокурсниц – примерно половина из тех, с кем мы учились вместе в магистратуре, пошла дальше – в аспирантуру, уже имеют кандидатские степени и работают в научных лабораториях как в России, так и за рубежом. Наука молодеет, всё больше девушек занимается фундаментальными исследованиями, и у нас в лаборатории работает всё больше студенток, а не студентов. У нас проводятся экспериментальные исследования, где всё делать нужно тщательно, а студентки делают свою работу более аккуратно.

– Во многих творческих профессиях (а наука – тоже творческая профессия), существует гендерное неравенство, мужчины смотрят на женщин немножко свысока. Есть ли это в научной среде?

– Нет. Наука – это не спорт, мы не боремся за первое место, за золотую медаль. Мы работаем над каким-то большим общим исследованием, и коллеги-мужчины, наоборот, поддерживают. Взаимопомощь, советы – это фундаментальные вещи, которые нужны обязательно. Эта взаимосвязь необходима, и я не вижу конкуренции со стороны мужчин, если мы работаем над одним проектом.

– Провокационный вопрос – где женщины-учёные чаще всего находят себе мужей?

– Мои друзья устали ждать, когда я найду себе мужа в институте, решили, что хватит это терпеть и познакомили меня с моим будущим мужем. Конечно, есть случаи, когда и на работе знакомятся. Мои старшие коллеги как раз познакомились в университете, потом вместе

писали кандидатские и докторские диссертации. Очень интересно наблюдать за семейными парами, которые вместе работают – это совсем другие взаимоотношения.

– Ваш будущий супруг не учёный?

– Он закончил аспирантуру юридического факультета КФУ, он гуманитарий, и мы решили, что учёный у нас в семье должен быть только один.

– Как уживаются физик и лирик, как вы друг друга понимаете?

– Прекрасно! Я не понимаю, что он мне говорит, а он не понимает меня. Но это, конечно, шутка! Всё замечательно! Когда я готовилась к защите диссертации, поддержка с его стороны была максимальная.

– Хватает ли Вам времени?

– Да, конечно. Научные сотрудники – это творческие люди. Ты идёшь домой, занимаешься своими делами и то, что ты не додумал на работе, приходит тебе в голову дома, в отвлечённой среде. Ты спокойно это всё совмещаешь. То есть времени хватает и на работу, и на какие-то свои увлечения.

– Чем Вы ещё увлекаетесь?

– Во время учёбы в школе я закончила музыкальную школу по классу вокала. Когда у нас в ФИЦе проходят какие-то мероприятия, я могу там выступить. Люблю читать книги, играть в квизы. Обожаю комедийный сериал “Теория большого взрыва”. Многие думают, что в этом сериале учёные показаны такими, какие они есть на самом деле – немного странными и самобытными. Но это комедия, не нужно всё это воспринимать всерьёз. А шутки там, конечно, очень смешные.

– Какое для Вас самое значимое имя в науке?

– Приходят на ум, конечно, женские имена – например, Мария Кюри. Вот мы с вами разговаривали про конкуренцию, а у неё с мужем был такой великолепный тандем, что они добились высочайших результатов.

– Насколько я знаю, семье Кюри очень помог свёкр, который занимался воспитанием их дочери Ирэн, и Ирэн потом тоже стала учёным и тоже получила Нобелевскую премию. Это удивительно – три нобелевских лауреата в одной семье. Как Вы считаете, каковы должны быть условия взращивания ребёнка, чтобы найти в нём искру, и есть ли такие условия у нас сейчас в республике?

– Для молодёжи у нас сейчас дорога в науку открыта. У нас есть различные базовые школы РАН, школы при университете, множество программ и конкурсов, которые

привлекают школьников к научной деятельности. К нам в Казанский физико-технический институт часто приходят на экскурсию школьники. Приезжали школьники и из Москвы. Мы провели для них экскурсию по лабораториям, рассказали про оборудование и эксперименты, и они с большим интересом слушали и расспрашивали.

– *Расскажите, а как Вы пришли в науку?*

– Мой дедушка, Константин Николаевич Максимов, нам, своим внукам, говорил: “Первично – учёба, вторично – учёба и третично – тоже учёба. Всё остальное – потом”. Видимо, он настолько заложил мне это в голову, что после бакалавриата я пошла в магистратуру, загорелась и пошла в аспирантуру, и никак не могу закончить учиться! Всё учусь и учусь! Благодаря дедушке я и занимаюсь наукой.

– *А в школе – уже было понимание, чем Вы будете заниматься?*

– В школе мне нравились физика и химия. В девятом классе я сдавала экзамен по химии, а в одиннадцатом – по физике.

– *А кем изначально Вы хотели быть?*

Хотела заниматься нанотехнологиями. В седьмом классе у нас был замечательный преподаватель по физике, а в восьмом – по химии, и они настолько влюбили меня в свои предметы, что даже не было мысли о том, чем же мне заниматься и какие экзамены сдавать. Я поступила на физфак на общую физику, а потом попала в лабораторию КФТИ, и мне безгранично повезло с научными руководителями. В итоге – я занимаюсь нанотехнологиями, то есть тем, чем хотела.

– *Я хотела бы задать небольшой блиц. Какой праздник Вы больше любите – 8 марта или День науки?*

– Люблю День девушек в науке. Это официальный праздник, он отмечается 11 февраля. А 8 февраля мы всем ФИЦем отмечаем День науки. Это всегда большой праздник, но этом году было что-то невероятное – много мероприятий и лекций, ведь отмечалось 300-летие Российской академии наук!

– *Ваш любимый вид отдыха?*

– Я люблю читать книги. Особенно я люблю фантастику. Джоан Роулинг, Джон Толкиен – это всё моё любимое.

– *Какую премию Вы хотели бы получить?*

– Какой учёный не мечтает о нобелевке! А если серьёзно, есть премия для женщин от Л’Ореаль. Было бы интересно получить её. Эта премия даётся за вклад в области естественных наук, математики и информатики. Я согласна на премию в области физики или химии, так как я занимаюсь и тем и другим!

– *Какая самая главная черта в Вашем характере?*

– Я думаю, кропотливость. Я люблю что-то долго и тщательно делать, например, вышивать. В школе научилась вышивать крестиком, сейчас вышиваю гладью. Мне это очень нравится. Здесь важен не результат, а сам процесс, он приносит успокоение и вдохновение. А результат уже приносит просто радость и удовольствие от проделанной работы.

– *Давайте вернёмся к Вашей диссертации. Та работа, о которой мы говорили – это всего лишь часть Вашей большой диссертации, которая называется “Самосборка короткоцепных олигопептидов”. Что это? Расшифруйте пожалуйста.*

– Есть большие молекулы – белки, состоящие из маленьких частиц, которые называются аминокислотные остатки. Если взять два или три аминокислотных остатка – это и будет короткоцепной олигопептид.

– *Где это применяется?*

– Они обладают волшебными свойствами самосборки: могут сами, без всяких воздействий, превращаться в кристаллы или в различные наноструктуры – нанотрубки, нановолокна – что угодно. Недавно в нашей группе был получен гидрогель, который может применяться в медицине.

– *Я очень хочу, чтобы результаты Вашей работы поскорее воплотились в жизнь. Спасибо Вам большое!*

Каждый учёный – немного герой⁶

Что волнует современного учёного-руководителя? С какими проблемами он сталкивается? Об этом мы побеседовали с директором Федерального исследовательского центра “Казанский научный центр Российской академии наук”, профессором и членом-корреспондентом РАН Алексеем Калачёвым, который побывал в редакции “Казанских ведомостей”.

Главный редактор “КВ” Венера Якупова:

– Алексей Алексеевич, как Вы пришли в науку?

– Можно сказать, волею судеб. Хотя вся моя взрослая жизнь связана с физикой, в юности я и представить себе не мог, что стану учёным-физиком. Ключевую роль сыграло окружение. Я учился на Малом физфаке, ездил в летнюю физико-математическую школу “Квант”. Там я и познакомился с людьми, общение с которыми привело меня на физический факультет Казанского университета. И только на старших курсах появился настоящий интерес к физике и математике. До сих пор, будучи уже администратором, я стараюсь заниматься научной работой, исследованиями в области квантовой физики и оптики.

В.Я.: Какие значимые научные открытия совершили казанские учёные за последние десятилетия?

– Примеров можно привести много. В Казани сильные академические научные школы в области химии, физики, биологии, энергетики. Так, в начале 60-х годов прошлого века Вилен Нагибаров совместно со своим учителем Уно Копвиллемом, работая в Казанском физико-техническом институте, предсказали явление светового (или, как сейчас говорят, фотонного) эха, которое чуть позже независимо от них наблюдали американские учёные. Продолжением уже в 70-х годах стало развитие принципов динамической эхо-голографии Евгением Штырковым и Виталием Самарцевым. С тех пор фотонное эхо стало мощным и широко используемым в мире инструментом оптической спектроскопии и оптической обработки информации. Одним из актуальных направлений исследований является использование фотонного эха для квантовой памяти, что было предложено в 2000 году Сергеем Моисеевым, который тогда работал опять же в Казанском физтехе, а теперь развивает это направление в КНИТУ-КАИ.

Корреспондент “КВ” Дмитрий Смирнов:

– Приведите, пожалуйста, примеры успешного внедрения разработок казанских учёных в производство.

– Чтобы научная разработка дошла до стадии серийного производства, как правило, нужно приложить большие



усилия и должно пройти много времени. Учёные обычно сосредоточены на фундаментальных или поисковых научных исследованиях и довольно редко переключаются на прикладные работы. Тем не менее в ФИЦ КазНЦ РАН есть целый ряд примеров, когда результаты фундаментальных исследований довели до производства. Один из самых удачных – разработка лекарственных препаратов в Институте органической и физической химии им. А. Е. Арбузова, которая ведётся уже много лет. В настоящее время в институте производятся лекарственные субстанции для четырёх препаратов, разработанных в стенах института, и налаживается опытное производство новых. Идёт успешная разработка лекарственных препаратов для терапии болезни Альцгеймера и андрогенной алопеции (облысения), клинические испытания которых запланированы в 2025–2026 годах. Как я уже говорил, это процесс совсем не быстрый.

Д.С.: Как сказывается на Вашей деятельности прекращение сотрудничества с западными вузами и научными институтами?

– Что-то, безусловно, мы теряем, когда некоторые западные институты отказываются с нами сотрудничать. Наука построена на взаимообогащении, кооперация критично важна в долгосрочной перспективе. Научные знания и открытия, в отличие от технологической или

⁶ Казанские ведомости. № 74. 30 мая 2024 года. Записал Дмитрий Смирнов.

коммерческой информации, невозможно и нет смысла скрывать. На самом деле все учёные из одной сферы работают над одними и теми же проблемами и часто совершают открытия практически одновременно. Поэтому общемировое научное пространство – это, с одной стороны, большая конкуренция, а с другой – условие для более быстрого развития научного знания. Думаю, именно поэтому наука может способствовать реальному объединению людей. Ну а в текущих условиях больше внимания уделяется развитию научных связей с восточными странами, такими как Китай или Малайзия.

В.Я.: В блокадном Ленинграде один из учёных, который отвечал за уникальную вавилонскую коллекцию семян, умирая от голода, её всё же сохранил. А сегодня науке присуща такая же самоотверженность тех, кто ею занимается?

– Каждый учёный – в некотором смысле герой, если продолжает свои научные исследования, несмотря на плохую финансовую ситуацию, непонимание коллег или другие неблагоприятные условия. Наука во время Великой Отечественной войны – это, конечно, время исключительной самоотверженности советских учёных. Тогда Казань стала крупнейшим научным центром, что и послужило основой для создания Казанского филиала Академии наук СССР в 1945 году. К сожалению, очень тяжёлый период для отечественной науки наступил в 90-е годы прошлого века. Это был настоящий провал, когда многим пришлось уйти из науки или отказаться от желания стать учёным. Поэтому сегодня у нас много учёных, которым 60–70 лет, много молодых, а вот 50–55-летних мало. Абсолютно всех, кто не бросил науку в 90-е годы, не ушёл в другие сферы, можно назвать истинными подвижниками своего дела, которые фактически сохранили отечественную науку для будущих поколений.

В.Я.: О чём Вы мечтаете как учёный?

– Для меня как руководителя ФИЦ КазНЦ РАН очень важным является реализация проекта по строительству Центра академической науки, куда смогут переехать все наши институты. Нам крайне необходима новая современная инфраструктура для развития научных направлений, а размещение институтов на одной площадке, безусловно, придаст эффект синергии всем нашим исследованиям. Когда в конце 60-х – начале 70-х годов прошлого века в новые здания переезжали ИОФХ и КФТИ, это придало могучий импульс их развитию.

Да, наше основное здание на улице Лобачевского расположено в историческом центре города и является объектом культурного наследия. Однако размещать там новые научные лаборатории практически невозможно. Есть проблемы и с другими зданиями, разбросанными по всему городу. Поэтому строительство нового комплекса зданий для Казанского научного центра – это условие его мощного развития.

Внушает оптимизм поддержка со стороны руководства республики по этому вопросу. Надеюсь, в ближайшее время будут сделаны заметные шаги в реализации данного проекта. Но пока про это рано говорить.

Д.С.: Как Вы считаете, куда движется современная наука?

– Моё мнение – будут активно разрабатываться наукоёмкие технологии, непосредственно влияющие на качество и уровень жизни человека: новые источники энергии, переработка отходов, генетические технологии, искусственный интеллект и т. п. Здесь важным оказывается число потребителей или объём рынка, чтобы создаваемые продукты стали окупаться. Поначалу всё дорого, любая технология так развивается. Важно некий порог перейти. Вы помните, как компьютеры первые выглядели? Целую комнату занимали. Но затем разработка быстро начинает оптимизироваться, а когда она начинает производиться в массовом масштабе, то цена резко и значительно снижается. Это важно с точки зрения заинтересованности индустриальных партнёров, за счёт финансирования которых фундаментальные исследования могут быть доведены до промышленных образцов.

Мне лично ближе квантовые технологии, потому что я ими непосредственно занимаюсь. Это квантовые вычисления и квантовая связь. Например, квантовая связь – это когда мы используем для передачи информации отдельные фотоны: элементарные частицы или порции энергии электромагнитного поля. При этом мы получаем возможность, например, абсолютной защиты информации, когда даже обладатели квантовых компьютеров не смогут взломать системы шифрования, основанные на квантовых принципах. Интересным представляется развитие искусственного интеллекта. А это даже уже не наше будущее, а наше настоящее. Здесь есть и свои сложности, которые сейчас активно обсуждаются. Эти системы самообучающиеся. Мы в какой-то момент можем перестать их контролировать. Как всегда, есть определённый риск: ведь любое открытие можно применить не только на благо человечества, но и во зло. Это уже от общества зависит, как и для чего оно применяет научные открытия.

Что касается институтов Казанского научного центра, то мы ведём фундаментальные исследования по широкому спектру направлений. При этом сформировалось четыре приоритетных, где наши исследования переходят в прикладные за счёт участия индустриальных партнёров: создание лекарств нового поколения и средств их доставки, агробиотехнологии, квантовые технологии, физико-химические основы решения экологических проблем (переработка отходов, например). Все они чрезвычайно актуальны как для развития науки, так и для решения практических проблем.

“Наука интернациональна”: в Академии наук наградили профессоров из России и США⁷

В Академии наук РТ прошла церемония награждения лауреатов Международной премии им. Е. К. Завойского за достижения в развитии методологии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и её применений в биохимии и исследованиях живых организмов.

“Вручение заслуженных премий нашим учёным является событием мирового масштаба”, – отметил президент АН РТ Рифкат Минниханов.

Лауреатами премии в этом году стали заведующий Лабораторией физической химии биополимеров Федерального исследовательского центра химической физики им. Н. Семенова РАН Анатолий Ванин (Москва, Россия) и профессор химии, директор Лаборатории магнитов Фрэнсиса Биттера Массачусетского технологического института Роберт Гриффин (Кембридж, штат Массачусетс, США).

“Несмотря на все политические ситуации, наука всегда интернациональна. Хорошо, когда мы имеем такую возможность, и понимаем, что знания человечества – это тот бесценный дар, который не подлежит политическим разделам, никаким границам”, – заявил проректор по научной деятельности КФУ Дмитрий Таюрский.

Почти 60 лет своей научной карьеры Анатолий Ванин посвятил изучению оксида азота. Данное соединение участвует во многих биологических процессах всех живых организмов, в том числе человека. Мышление, пищеварение и даже рождение человека – все эти процессы связаны с оксидом азота.

“Имея лекарства, которые высвобождают оксид азота, мы можем лечить множество проблем. Это лекарство природного происхождения, оно возникает в организме”, – подчеркнул основную идею своих исследований Ванин.

За достижения в этой области российский профессор и получил премию им. Е. К. Завойского.

“Сейчас мы можем очень легко снимать гипертонический криз, залечивать раны, бороться с эндометриозом. На животных эндометриоз получается лечить, на людях надеемся, что может получиться”, – заявил Ванин.

На церемонии вручения премии американский профессор присутствовать не смог и наблюдал за награждением по видеосвязи. Однако среди гостей присутствовал сотрудник мексиканского Национального политеха Даниэль Ромирес-Розалес. Он применяет ЭПР в атомной и молекулярной физике.

“Я всегда мечтал оказаться здесь, где был открыт ЭПР. Это открытие позволило мне исследовать мир и обмени-



ваться знаниями с моими коллегами. Моё исследование с применением ЭПР позволяет увидеть биологические структуры изнутри. Оно применимо в фармакологии и медицине”, – поделился с корреспондентом “Татар-информ” господин Ромирес-Розалес.

Электронный парамагнитный резонанс впервые был экспериментально обнаружен в Казани в 1944 году доцентом КГУ (ныне КФУ) Евгением Завойским. Это был также первый успешный эксперимент по магнитному резонансу в конденсированной фазе.

С самого начала ЭПР получил широкое практическое применение, но современные успехи технологии делают его ещё более значимым, открывая применения в физике, химии, биологии, медицине, геохимии, экологии, и других отраслях науки.



⁷ ИА “Татар-информ”, 24 сентября 2024 г.
<https://www.tatar-inform.ru/news/nauka-internacionalna-v-akademii-nauk-nagradili-professorov-iz-rossii-i-ssa-5959392>

И германий может быть пористым⁸

Перечень областей, где используют пористые полупроводники, и сам по себе довольно велик, и постоянно расширяется. Для любого применения важны параметры применяемого материала. Какими параметрами характеризовать сам полупроводник, мы знаем, а какими параметрами характеризовать пористость? Очевидный параметр – доля пор. Но поры могут быть разного размера, открытые и закрытые, вытянутые, по-разному ориентированные и т.д. Эффективность любого применения пористого материала зависит от параметров пористости, значит, надо уметь получать пористость с разными характеристиками.

Исследователи из Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского подвергли монокристаллический германий ионной имплантации, то есть такому облучению его ионами, при котором они проникают внутрь материала. Для этого взяли ионы трёх металлов (меди, серебра и висмута) существенно разной массы – ^{63}Cu , ^{108}Ag и ^{209}Bi . Энергия ионов была от 10 до 40 кэВ, плотность тока в пучке 5 мкА/см², дозы от $5 \cdot 10^{16}$ до 10^{17} ионов/см². Германий получился аморфный и пористый, а что касается геометрии, то при малых энергиях облучения от 10 до 15 кэВ, и относительно лёгких ионах меди и серебра на поверхности германия формируются



разнообразно ориентированные тонкие игольчатые нанообразования, а в случае применения более тяжёлых ионов висмута образуется пористый слой, состоящий из плотно упакованных переплетающихся нанонитей. При высоких энергиях от 30 до 40 кэВ ситуация иная. Морфология нанопористого германия с увеличением массы внедряемого иона меняет свою форму последовательно от трёхмерной сетчатой структуры до губчатой, состоящей из отдельных пространственно-разнесённых утончённых переплетающихся нанонитей. Авторы подробно анализируют процессы, которые могли происходить при ионной имплантации.

Гаврилова Т.П. и др. Морфология слоёв нанопористого германия, сформированных при имплантации ионами Cu^+ , Ag^+ и Bi^+ различных энергий. ЖТФ, 2024, вып. 4, с. 613.

⁸ Заметка в журнале “Наука и жизнь”, № 11, 2024, в рубрике “Коротко о науке и технике”.



2024 год в цифрах

Кадры (на 31 декабря 2024 г.)

Уволены

1. Ваитова А.З., начальник отдела кадров
2. Голодницкий С.Н., водитель
3. Катаев В.Е., в.н.с.
4. Мигачёв С.А., с.н.с.
5. Мухтасарова Х.Л., вед. специалист отдела кадров
6. Овчинников И.В., в.н.с.
7. Парамонова Е.С., вед. бухгалтер
8. Рамеев Б.З., с.н.с.
9. Салихов Р.И., н.с.
10. Хабилов Р.Ш., н.с.
11. Хисамова Э.Р., специалист по ОТ и ТБ
12. Ягфарова А., м.н.с.

Приняты

1. Гайнуллина Л.З., вед. специалист отдела кадров
2. Железнякова Д.Е., м.н.с.
3. Ивашкевич Т.А., ведущий бухгалтер
4. Посокова И.В., начальник отдела кадров
5. Седелникова М.В., бухгалтер
6. Степаненко К.А., м.н.с.
7. Шафеев Н.М., инженер-исследователь
8. Эндерова Т.Н., м.н.с.

Численность сотрудников

- Общая численность – 154
- Молодых сотрудников до 35 лет (включительно) – 35
- Научных сотрудников – 98
- Действительных членов РАН – 1
- Член-корреспондентов РАН – 1
- Действительных членов АН РТ – 2
- Член-корреспондентов АН РТ – 1
- Докторов наук – 17
- Кандидатов наук – 51

Средний возраст сотрудников

- Докторов наук – 67.35
- Кандидатов наук – 49.27
- Без степени – 43.9
- Общий – 51.53

Публикации

- Статьи в журналах – 148

Финансирование (в тыс. руб.)

Общий объём – 182058.77

- Субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания из федерального бюджета – 109337.41, в т.ч.:
 - на выполнение гос. задания – 108772.58, в т.ч.: финансирование молодёжной лаборатории – 9000.00
 - услуги по аспирантуре – 564.83
- Субсидии на иные цели – 560.00, в т.ч.:
 - выплаты стипендий аспирантам – 560.00
- Российский научный фонд (РНФ) – 60346.64
- Договор пожертвования (для проведения конференции и вручения премии им. Е. К. Завойского) – 912.60
- Договора НИР – 4906.60
- Договор № 814/ОКЭДКСС (РЖД) на выплату з/п исполнителям – 4135.15
- Прочие поступления – 1860.37

Темы государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН, выполняемые КФТИ им. Е. К. Завойского

- “Развитие физических принципов квантовых оптических и спиновых технологий, спинтроники сверхпроводящих и магнитных топологических систем”. Руководитель темы – Калачёв А.А., д.ф.-м.н.
- “Фундаментальные основы молекулярного конструирования, физико-химического анализа строения и функциональных свойств новых интеллектуальных систем и материалов для современных наукоёмких технологий в области биомедицины, катализа, энергетики, нано- и оптоэлектроники” (совместно с ИОФХ). Руководитель темы: Карасик А.А., д.х.н., соруководитель от КФТИ: Хантимеров С.М., к.ф.-м.н.

Проекты, финансируемые на конкурсной основе

Конкурсы Российского научного фонда (РНФ)

“Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами”

- Хайбуллин Р.И., к.ф.-м.н.: Разработка магнитных мемристоров на основе оксидных полупроводников с имплантированной примесью 3d-элементов (№ 22-19-00712)

“Проведение исследований на базе существующей научной инфраструктуры мирового уровня”

- Таланов Ю.И., д.ф.-м.н.: Исследование особенностей сверхпроводимости, магнетизма и топологических эффектов в квантовых материалах (№ 21-72-20153)

“Проведение исследований научными группами под руководством молодых учёных”

- Гаврилова Т.П., к.ф.-м.н.: Исследование и разработка гибридных электродных материалов литий-ионного аккумулятора с высокой энергетической плотностью (№ 19-79-10216-П)
- Камашев А.А., к.ф.-м.н.: Исследование возможности управления сверхпроводящим током в конструкции спинового клапана на базе сегнетоэлектрической подложки (№ 21-72-10178)
- Хайрутдинов И.Т., к.ф.-м.н.: Минимизация процессов декогеренции спинов в твёрдых телах с помощью оригинальных импульсных последовательностей с произвольной формой импульсов (№ 22-72-10063)

“Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований международными научными коллективами” (совместно с Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований – БРФФИ)

- Гайнутдинов Х.Л., д.ф.-м.н.: Экспериментальный анализ механизмов и терапевтических перспектив имплантации мезенхимальных стволовых клеток при ишемическом инсульте мозга и повреждениях спинного мозга для коррекции баланса системы монооксида азота и активации репаративных процессов (№ 23-45-10004)
- Никифоров В.Г., к.ф.-м.н.: Апконверсионные температурные наносенсоры для биологических приложений (№ 23-42-10012)

“Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований международными научными коллективами” (DFG)

- Зарипов Р.Б., к.ф.-м.н.: Молекулярная и спиновая динамика в диметаллофуллеренах с одноэлектронной связью между металлами (№ 22-43-04424)

“Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований международными научными коллективами” (совместно с научным коллективом Республики Индия – DST)

- Ерёмин Р.М., д.ф.-м.н.: Двойные оксиды типа перовскита для производства термоэлектрической энергии (№ 22-42-02014)

“Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами”

- Бухараев А.А., д.ф.-м.н.: Использование термоиндуцированного магнитоупругого эффекта для переключения намагниченности микрочастиц (№ 23-29-00085)
- Зарипов Р.Б., к.ф.-м.н.: Магнитные свойства парамагнитных примесей в кристаллах фторида бария (№ 23-22-00402)
- Чукланов А.П., к.ф.-м.н.: Прецизионные манипуляции апконверсионными наночастицами при помощи сканирующей зондовой микроскопии (№ 23-29-00516)
- Базаров В.В., к.ф.-м.н.: Разработка фоточувствительных материалов для инфракрасного диапазона на основе кремния с наночастицами узкозонных полупроводников (№ 24-29-00069)
- Сулейманов Н.М., д.ф.-м.н.: Синтез новых композитных материалов на основе пористого германия, и наночастиц никеля, платины для электродов электрохимических источников тока (№ 24-23-00544)
- Хадиев К.Р., к.ф.-м.н.: Эффективная реализация квантовых алгоритмов (№ 24-21-00406)

“Проведение исследований на базе существующей научной инфраструктуры мирового уровня Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учёными, в том числе молодыми учёными”

- Ерёмин Р.М., д.ф.-м.н.: Магнитные структуры лютециевых соединений (№ 23-72-00047)

Договоры

1. “Исследование магнитных свойств слоистых перовскитоподобных оксидов, принадлежащих к гомологическому ряду Раддлеса-Поппера (РП) общей формулы $(La, Sr)_{n+1}(Ti, Mn)_nO_{3n+1}$ ($M' = Mn, Cu, Fe$)”. Договор № 189-2024-НИР с ИХТТ УрО РАН (Яцык И.В., Ликеров Р.Ф.).
2. “Исследование магнитных свойств слоистых перовскитоподобных оксидов, принадлежащих к гомологическому ряду Раддлеса-Поппера (РП)”. Договор № 609-2024-НИР с ИХТТ УрО РАН (Яцык И.В., Ликеров Р.Ф.).
3. “Измерение кинетики восстановления фотоокисленного R^{700+} и исчезновения анион-радикала филохинона А1- методом ЭПР спектроскопии в Q-диапазоне”. Договор № 1376-223-2024 НИР с НИИ ФХБ имени А. Н. Белозерского МГУ (Суханов А.А., Салихов К.М.).
4. “Мониторинг коррозии трубопроводов и промышленного оборудования”. Договор с ООО “Мастер кемикалз” (Львов С.Г.).

Публикации

Монография

- Kiiamov A.G., Kuznetsov M.D., Tsurkan V., Croitori D., Krug von Nidda H.-A., Seidov Z., Mayr F., Hemmida M., Widmann S., Günther A., Loidl A., Tayurskii D.A., Tagirov L.R.: Ab-initio modelling of phonons in the family of quasi-one-dimensional antiferromagnets $AFeX_2$ // in: Phonons – Recent Advances, New Perspectives and Applications, edited by Dr. Jie Deng (Northwestern Polytechnical University, China), IntechOpen Publishing House, 2024. – 32 p.

Статьи в журналах

1. Akhmetshin Sh.R., Arslanov D.R., Larionov R.A., Ziganshina S.A., Gorbachuk V.V., Ziganshin M.A.: Smart behavior of leucyl-leucine dipeptide: Recognition of organic guests and tunable thermal stability // Russ. J. Gen. Chem. **94**, no. 8, 2142–2151 (2024)

2. Andrianov V.V., Schepetkin I.A., Bazan L.V., Gainutdinov Kh.L., Kovrizhina A.R., Atochin D.N., Khlebnikov A.I.: Evaluation of nitric oxide-donating properties of ^{11}H -indeno[1,2-b]quinoxalin-11-one oxime (IQ-1) by electron paramagnetic resonance spectroscopy // Molecules **29**, 3820 (2024)
3. Anikeenok O.A.: Calculation of the matrix elements of the long-range coulomb interaction comparison of the GTO and STO approaches // Appl. Magn. Reson. **55**, 615–627 (2024)
4. Bales B.L., Peric M., Schwartz R.N., Bakirov M.M., Khairutdinov I.T.: A comparison of pulse and CW EPR T2-relaxation measurements of an inhomogeneously broadened nitroxide spin probe undergoing Heisenberg spin exchange 2. The intercept discrepancy // J. Magn. Res. 107771 (2024)
5. Batueva E.E., Sharipova A.R., Frolova E.N., Savostina L.I., Bazan L.V., Cherosov M.A., Batulin R.G., Turanova O.A., Turanov A.N.: Effect of a substitute in a ligand and a counterion on the properties of a heptanuclear mixed-valence iron complex // Bull. Russ. Acad. Sci. Physics **88**, no. 7, 1153–1157 (2024)

6. Begishev E.M., Shmelev A.G., Zharkov D.K., Bazarov V.V., Lyadov N.M., Valeev V.F., Nuzhdin V.I., Khaibullin R.I.: Optical spectroscopy of oxygen vacancies in rutile (TiO_2) irradiated with argon ions // *Bull. Russ. Acad. Sci: Physics* **88**, iss. 12 (2024)
7. Biktimirova R.F., Zubaidullina L.S., Ziganshin M.A., Mukhametzyanov T.A., Lyadov N.M., Gerasimov A.V.: The effect of molecular weight of polyvinylpyrrolidone on the release of p-aminosalicylic acid from microspherical solid dispersion particles // *Rus. Chem. Bull.* **73**, iss. 3, 681–687 (2024)
8. Borisova Y.Y., Minzagirova A.M., Galikhanov M.F., Zaripov R.B., Spiridonova R.R., Yakubov M.R., Borisov D.N.: Potential of industrial symbiosis of petroleum residues and recycled polyethylene // *Petroleum Science and Technology* 1–18 (2024)
9. Chibirev A.O., Leontyev A.V., Salikhov T.M., Bannikov M.I., Mamin R.F.: Investigations of high-conductivity interfaces of ferroelectric/dielectric heterostructures // *Ferroelectrics* **618**, iss. 6, 1347–1353 (2024)
10. Chuklanov A.P., Morozova A.S., Nurgazizov N.I., Mityushkin E.O., Zharkov D.K., Leontyev A.V., Nikiforov V.G.: The precision movement of upconversion nanoparticles on a surface by using scanning probe microscopy // *Technical Physics* **69**, iss. 5, 1164–1169 (2024)
11. Chupakhina T.I., Eremina R.M., Gyrdasova O.I., Yanchenko M.Y., Buldakova L.Y., Yatsyk I.V., Gavrilova T.P., Deeva Yu.A., Sukhanov A.A., Baklanova I.V., Uporova A.M.: Perovskite-like $\text{La}_x\text{Sr}_{2-x}\text{Ti}_{1-x}/2\text{Cu}_x/2\text{O}_4$ ($x = 0.2, 0.3, 0.5$) oxides with the K_2NiF_4 -type structure active in visible light range: new members of the photocatalyst family // *Journal of the Korean Ceramic Society* **61**, 623–635 (2024)
12. Chupakhina T.I., Gyrdasova O.I., Uporova A.M., Buldakova L.Yu., Yanchenko M.Yu., Mamedov D.V., Deeva Y.A., Baklanova I.V.: Study of photocatalytic activity in two light ranges of $\text{Sr}_2\text{Mn}_{0.4}\text{Ti}_{0.6}\text{O}_4$ oxide with the K_2NiF_4 -type structure // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics* **15**, iss. 4, 540–547 (2024)
13. Demishev S.V., Shestakov A., Yatsyk I.V., Semeno A.V., Grigoriev S.V., Eremina R.M.: Electron paramagnetic resonance probing of the spin fluctuation transition in the conical spiral phase of MnSi // *Sol. St. Comm.* **385**, 115501 (2024)
14. Eremina R.M., Moshkina E.M., Yatsyk I.V., Shustov V.A.: Crystal structure and EPR spectra of $\text{Mn}_{2.25}\text{Co}_{0.75}\text{BO}_5$ // *Bull. Russ. Acad. Sci: Physics* **88**, iss. 7, 1126–1130 (2024)
15. Falin M.L., Latypov V.A., Khaidukov N.M.: Synthesis of Yb^{3+} -doped $\text{Cs}_2\text{NaScF}_6$ single crystals and EPR spectroscopy of the dopant Yb^{3+} ion // *Appl. Magn. Reson.* **55**, 1129–1135
16. Falin M.L., Latypov V.A., Korableva S.L.: Synthesis and magnetic properties of the Nd^{3+} ion in the CsCaF_3 single crystal // *Appl. Magn. Reson.* **55**, 443–449 (2024)
17. Farrakhov B.F., Fattakhov Ya.V., Stepanov A.L.: Modification of the implanted silicon surface by a powerful light pulse // *Bull. Russ. Acad. Sci: Physics* **88**, iss. 7, 1122–1125 (2024)
18. Fattakhov Ya.V., Odivanov V.L., Bayazitov A.A., Fakhrutdinov A.R., Shagalov V.A.: Development of MRI equipment and techniques for studies of biological and agricultural objects // *Bull. Russ. Acad. Sci: Physics* **88**, iss. 7, 1089–1093 (2024)
19. Fazlizhanova D.I., Sinitsyn P.A., Fazlizhanov I.I., Levchenko S.V.: Antiferromagnetism, superparamagnetism, and effects of A-cation distribution on magnetic properties of LaSrFeO_4 Ruddlesden–Popper oxides: A combined experimental and theoretical study // *Physica B: Condens. Matt.* **695**, 416550 (2024)
20. Frolova E.N., Turanova O.A., Bazan L.V., Ovchinnikov I.V., Turanov A.N.: EPR in research of the magnetic properties of spin-crossover Fe(III) complexes with polydentate Schiff bases // *Appl. Magn. Reson.* **55**, 987–1010 (2024)
21. Gaifullina E.T., Shmelev A.G., Gataullina R.M., Zarafutdinova Z.R., Kornev T.A., Nizameeva G.R., Zairov R.R., Ziyatdinova A.B., Amirov R.R.: Sulfur quantum dots stabilized by myristyl trimethylammonium bromide // *Optical Materials* **157**, 116269 (2024)
22. Gainutdinov Kh.L., Andrianov V.V., Yafarova G.G., Bazan L.V., Bogodvid T.K., Iyudin V.S., Filipovich T.A., Shanko Yu.G., Tokalchik Yu.P., Kulchitsky V.A.: Content of nitrogen monoxide and cooper in the hippocampus of a rat model of short-term cerebral ischemia followed by reperfusion // *Biophysics* **69**, no. 1, 129–136 (2024)
23. Gainutdinov Kh.L., Kulchitsky V.A., Yafarova G.G., Andrianov V.V., Bazan L.V., Bogodvid T.K., Silantyeva D.I., Nagibov A.V.: Analysis of the intensity of nitric oxide production in different parts of the spinal cord after modeling combined cerebral and spinal injury // *Bull. Exp. Biol. Med.* **177**, 293–296 (2024)
24. Gataullina R.M., Leontyev A.V., Nurtdinova L.A., Shmelev A.G., Zharkov D.K., Solodov A.N., Gubaidullin A.T., Saifina A.F., Khannanov A.A., Nikiforov V.G.: Mechanism of silanization and its influence on temperature sensitivity of up-conversion luminescence of $\text{NaYF}_4\text{:Yb/Ho}$ nanoparticles // *Bull. Russ. Acad. Sci: Physics* **88**, suppl. 1, S127–S134 (2024)
25. Gavrilova T.P., Deeva Yu., Uporova A., Chupakhina T., Yatsyk I.V., Rogov A.M., Cherosov M., Batulin R., Khrizanforov M., Khantimerov S.M.: $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ cathode material: Synthesis method, high lithium diffusion coefficient and magnetic inhomogeneity // *Int. J. Mol. Sci.* **25**, 2884, 1–20 (2024)
26. Gavrilova T.P., Valeev V.F., Nuzhdin V.I., Rogov A.M., Konovalov D.A., Khantimerov S.M., Stepanov A.L.: Morphology of nanoporous germanium layers formed by implantation of Cu^+ , Ag^+ and Bi^+ ions of various energies // *Technical Physics* **69**, no. 4, 578–585 (2024)
27. Gerasimov K.I., Baibekov E.I., Minnegaliev M.M., Shakurov G.S., Zaripov R.B., Moiseev S.A., Lebedev A.V., Malkin B.Z.: Magneto-optical and high-frequency

- electron paramagnetic resonance spectroscopy of Er^{3+} ions in CaMoO_4 single crystal // *J. Luminescence* **270**, 120564 (2024)
28. Gimatdin R., Kupriyanov P., Mozzhukhin G., Chizhik V., Rameev B.Z.: Modelling J-coupling in NMR spectra at low and ultra-low magnetic fields // *Proceedings of 2024 Photonics and Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Chengdu, China 2024, pp. 1–4 (2024)
 29. Gumarova I.I. (Piyanzina I.I.), Mamin R.F., Nedopekin O.V., Tayurskii D.A.: DFT investigation of magneto-electric coupling at the antiferromagnetic/ferroelectric interfaces O_3/XTiO_3 ($X = \text{Ba}, \text{Pb}$) heterostructure // *Magnetic Resonance in Solids*, iss. 1, 24106 (9 pp.) (2024)
 30. Ibragimova M.I., Chushnikov A.I., Yatsyk I.V., Khaibullina D.Kh., Gumarov G.G.: Identification of the signals with $g \approx 6$ in the X-band EPR spectra of human blood serum at 5–40 K // *Magn. Reson. Solids. Electronic Journal* **26**, iss. 2, 24302 (2024)
 31. Kadikova A.Kh., Gabbasov B.F., Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Zverev D.G., Kiiamov A.G., Tagirov L.R., Yusupov R.V.: Ferromagnetic resonance and the spin Hall effect in an $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Pt}$ bilayer // *Bull. Russ. Acad. Sci: Physics* **88**, iss. 7, 1094–1098 (2024)
 32. Kagilev A.A., Gafurov Z.N., Sakhapov I.F., Morozov V.I., Kantyukova A.O., Zaripov R.B., Zueva E.M., Mikhailov I.K., Dobrynin A.B., Kulikova V.A., Kirkina V.A., Gutsul E.I., Shubina E.S., Belkova N.V., Sinyashin O.G., Yakhvarov D.G.: Electrochemical generation and in situ EPR- and UV-vis- observation of aminyl-radical diarylamido/bis(phosphine) pincer complexes of Ni, Pd and Pt // *J. Electroanal. Chem.* **956**, 118084 (2024)
 33. Kaiyue Ye, Sukhanov A.A., Jiayu Li, Lishan Liu, Xi Chen, Jianzhang Zhao, Voronkova V.K., MingDe Li: Intersystem crossing, photo-induced charge separation and regioisomer-specific excited state dynamics in fully rigidspiro rhodamine-naphthalene/anthraquinone electron donor-acceptor dyads // *Chem. Eur. J.* e202403758 (2024)
 34. Kalinin A.A., Shustikov A.A., Islamova L.N., Levitskaya A.I., Petrov D.N., Fazleeva G.M., Valieva A.A., Sharipova A.V., Simanchuk A.E., Dobrynin A.B., Shmelev A.G., Babaeva O.B., Vakhonina T.A., Khamatgalimov A.R., Mikerin S.L., Balakina M.Yu.: D- π -A chromophores based on novel macroacceptors – fused (azinylmethylene) malononitriles: Linear and nonlinear optical properties in solution and in poled polymer films // *Dyes and Pigments* **227**, 112184 (2024)
 35. Kamashev A.A., Validov A.A., Garif'yanov N.N., Bolshakov S.A., Mamin R.F., Garifullin I.A.: Features of the behavior of an $\text{Fe1}/\text{Cu}/\text{Fe2}/\text{Cu}/\text{Pb}$ superconducting spin valve on a piezoelectric substrate // *Bull. Russ. Acad. Sci: Physics* **88**, iss. 7, 1166–1171 (2024)
 36. Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A., Kataev V., Osin A.S., Fominov Ya.V., Garifullin I.A.: Expanding the operational temperature window of a superconducting spin valve // *Phys. Rev. B* **109**, 144517 (2024)
 37. Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A., Kataev V., Osin A.S., Fominov Ya.V., Garifullin I.A.: Superconducting spin valve effect in $\text{Co}/\text{Pb}/\text{Co}$ heterostructures with insulating interlayers // *Beilstein J. Nanotechnol.* **15**, 457–464 (2024)
 38. Kamashev A.A., Validov A.A., Arbuzov D.A., Garif'yanov N.N., Garifullin I.A.: Experimental study of the proximity effect in thin-film heterostructures with the superconducting lead layer of variable thickness // *Bull. Russ. Acad. Sci: Physics* **88**, 1062–1066 (2024)
 39. Kamashev A.A., Validov A.A., Bolshakov S.A., Garif'yanov N.N., Garifullin I.A.: Superconducting Properties of a $\text{Co1}/\text{Cu}/\text{Co2}/\text{Cu}/\text{Pb}$ Heterostructure on a PMN–PT Piezoelectric Substrate // *Bull. Russ. Acad. Sci: Physics* **88**, 1131–1134 (2024)
 40. Kamashev A.A., Validov A.A., Garif'yanov N.N., Bolshakov S.A., Garifullin I.A., Mamin R.F.: Superconducting properties of a thin-film heterostructure $\text{Fe1}/\text{Fe2}/\text{Pb}$ on a piezoelectric substrate // *Ferroelectrics* **618**, 1383–1391 (2024)
 41. Kamashev A.A., Validov A.A., Garif'yanov N.N., Garifullin I.A.: Model of a superconducting spin valve with insulating layers // *Physica C: Superconductivity and its Applications* **618**, 1354461 (2024)
 42. Kandrashkin Yu.E.: Adiabatic control of the phase memory relaxation in the anticrossing region // *Appl. Magn. Reson.* **56**, 1613–1707 (2024)
 43. Kandrashkin Yu.E.: Impact of Zeeman and hyperfine interactions of the magnetic properties of the ion: II. Super-hyperfine interactions with surrounding nuclei // *J. Magn. Res.* **365**, 107732 (2024)
 44. Kandrashkin Yu.E.: Estimation of Heisenberg exchange interaction in rigid photoexcited chromophore–radical compound by transient EPR // *The Journal of Chemical Physics* **160**, iss. 4, 044306 (2024)
 45. Kandrashkin Yu.E.: Impact of Zeeman and hyperfine interactions of the magnetic properties of the ion: I. Local interactions of the electron spin // *J. Magn. Res.* **365** (107728), 1090–17807 (2024)
 46. Kandrashkin Yu.E.: Impact of Zeeman and hyperfine interactions of the magnetic properties of the ion: III. Impact of the local interactions of the doped Yb ion in Y_5SiO_5 crystal // *J. Magn. Res.* **365** (107731) (2024)
 47. Khaibullin R.I., Gumarov A.I., Vakhitov I.R., Sukhanov A.A., Lyadov N.M., Kiiamov A.G., Kuzina D.M., Bazarov V.V., Zinnatullin A.L.: Microstructure and unusual ferromagnetism of epitaxial SnO_2 films heavily implanted with Co ions // *Condens. Matter* **9**, iss. 2, 27 (2024)
 48. Kupriyanova G., Smirnov M., Mershev I., Marasli A., Okay C., Mozzhukhin G., Rameev B.Z.: Comparative analysis of vegetable oils by ^1H NMR in low and high magnetic fields // *Journal of Food Composition and Analysis* **126**, Art. no. 105877 (2024)
 49. Latypov I.Z., Chistyakov V.V., Fadeev M.A., Sulimov D.V., Khalturinsky A.K., Kynev S.M., Egorov V.I.: Hybrid quantum communication protocol for fiber and

- atmosphere channel // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics* **15**, iss. 5, 654–657 (2024)
50. Leontyev A.V., Nurtidinova L.A., Mityushkin E.O., Shmelev A.G., Zharkov D.K., Andrianov V.V., Muranova L.N., Gainutdinov Kh.L., Nikiforov V.G.: Testing nanosensors based on $\text{NaYF}_4:\text{Yb,Er}$ for measuring temperature in biological media // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **88**, no. 6, 853–858 (2024)
 51. Leontyev A.V., Nurtidinova L.A., Mityushkin E.O., Shmelev A.G., Zharkov D.K., Chuklanov A.P., Nurgazizov N.I., Nikiforov V.G.: Polarized luminescence in single upconversion $\text{NaYbF}_4:\text{Er}$ rods // *New J. Chem.* **48**, no. 31, 14029–14038 (2024)
 52. Malikov I.F., Lyadov N.M., Salakhov M.K., Tagirov L.R.: Anion doping of tungsten oxide with nitrogen: reactive magnetron synthesis, crystal structure, valence composition, and optical properties // *Crystals* **14**, 109 (2024)
 53. Mambetov A.E., Sukhanov A.A., Zhang X., Zhao J., Voronkova V.K.: Electron spin dynamics of the photoexcited triplet states of bromoperylenebisimide compounds: computation and analysis of the electron spin polarization evolution in TREPR spectra // *Appl. Magn. Reson.* **55**, 1553–1567 (2024)
 54. Minnebaev T.M., Shavelev A.A., Shakirov A.A., Astrakhantseva A.V., Pudovkin M.S., Nizamutdinov A.S., Semashko V.V.: Optical spectroscopy and energy transfer in $\text{Tm}^{3+}\text{-Ho}^{3+}$ ions system in $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4$ mixed crystals // *Optical Materials* **156**, 116025 (2024)
 55. Mozzhukhin G., Kupriyanov P., Dogan E., Marasli A., Colak B., Okay C., Maksutoglu M., Kazan S., Rameev B.Z.: NQR detection of ammonium nitrate in partially shielded volumes // *Proceedings of 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Chengdu, China, 2024, pp. 1–4 (2024)
 56. Naumov A.K., Aglyamov R.D., Semashko V.V.: Evaluating $\text{Nd}^{3+}:\text{Na}_4\text{Y}_6\text{F}_{22}$ single crystals as a promising active medium for diode-pumped lasers // *J. Luminescence* **277**, 120961 (2024)
 57. Nizamutdinov A.S., Shavelev A.A., Astrakhantseva A.V., Boldyrev K.N., Nikolaev A.G., Dunina E.B., Kornienko A.A., Pynenkov A.A., Lyapin A.A., Kuznetsov S.V., Semashko V.V.: Optical spectroscopy of the Er^{3+} ions in heavily doped $\text{BaY}_{1.8}\text{Lu}_{0.2}\text{F}_8:\text{Er}$ mixed crystals // *Optical Materials* **147**, Art. no. 114585 (2024)
 58. Nurgazizov N.I., Bizyaev D.A., Chuklanov A.P., Bukharaev A.A., Bazan L.V., Shur V.Ya., Akhmatkhanov A.R.: The ferromagnetic resonance and probe microscopy studies of temperature-induced uniaxial deformations in planar ferromagnetic microparticles // *Bull. Russ. Acad. Sci. Physics* **88**, iss. 7, 1067–1072 (2024)
 59. Ofitserova N.Y., Sarychev M.N., Zhevstovskikh I.V., Ulanov V.A., Surikov V.T., Averkiev N.S., Gudkov V.V.: Ultrasonic investigation of the Jahn-Teller effect in $\text{BaF}_2:\text{Cu}$ crystal // *Journal of Physics: Conf. Series. IOP Publishing* **2769**, no. 1, 012009 (2024)
 60. Okumuş E., Öztürk S.T., Gören S., Erdem M., Şale Y., Cengiz A., Odrinsky A.P., Najafov A., Mammadov T., Khaibullin R.I., Sukhanov A.A., Berber S., Mikailzade F., Seyidov M.: Manganese diluted TlInS_2 layered semiconductor: optical, electronic and magnetic properties // *J. Alloys and Compounds* **1009**, Art. no. 176898 (1–20) (2024)
 61. Panariti D., Bayard B.J., Barbon A., Kandrashkin Yu.E., Poddutoori P.K., Van Der Est A., Valentin M.D.: Electron spin polarization in the triplet state of methoxy-substituted phosphorus(V) tetraphenyl porphyrins // *J. Magn. Res. Open* 100169 (2024)
 62. Pasyukov M.V., Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Petrov A.V., Tagirov L.R., Yusupov R.V.: Synthesis, magnetic properties, and modeling of magnetization reversal of an artificial antiferromagnet based on L10-PdFe // *Bull. Russ. Acad. Sci. Physics* **88**, iss. 7, 1073–1076 (2024)
 63. Podyachev S.N., Sudakova S.N., Shvedova A.E., Deltsov I.D., Masliy A.N., Mambetova G.Sh., Syakaev V.V., Vatsouro I.M., Gorbunov A.N., Bezzubov S.I., Lapaev D.V., Kuznetsov A.M., Kovalev V.V., Mustafina A.R.: Conjugated 1,3-diketone calix[4]arenes: synthesis, complexation and structure-dependent sensitizing of Eu^{3+} -luminescence // *Polyhedron* **264**, 117271 (2024)
 64. Popov D.V., Batulin R.G., Cherosov M.A., Yatsyk I.V., Chupakhina T.I., Deeva Y.A., Makarchenko A.S., Fazlizhanova D.I., Shustov V.A., Eremina R.M., Maiti T.: Intermediate-spin state of Co ions in magnetic and thermoelectric properties of double perovskite $\text{Ba}_2\text{CoNbO}_6$ // *J. Alloys and Compounds* **1009**, 176900 (2024)
 65. Popov D.V., Batulin R.G., Cherosov M.A., Yatsyk I.V., Chupakhina T.I., Deeva Yu.A., Eremina R.M., Maiti T.: ESR and magnetization studies of double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeNbO}_6$ // *J. Magn. Magn. Mat.* **595**, 171611 (2024)
 66. Popov D.V., Gavriloa T.P., Cherosov M.A., Shustov V.A., Moshkina E.M., Fazlizhanov I.I., Eremina R.M.: Magnetism and specific heat of ludwigites $\text{Mn}_{1.17}\text{Co}_{1.83}\text{BO}_5$ and $\text{Mn}_{1.39}\text{Co}_{1.61}\text{BO}_5$ // *J. Alloys and Compounds* **976**, 173143 (2024)
 67. Popov D.V., Likerov R.F., Shafikova A.E., Eremin M.V., Eremina R.M.: New analytical expressions to account for the spatial distribution of ligand electron density in crystal field theory on rare-earth ions // *J. Phys. Chem. C* **128**, 22, 9294–9299 (2024)
 68. Pudovkin M.S., Morozov O.A., Korableva S.L., Rakhmatullin R.M., Semashko V.V., Ginkel A.K., Rodionov A.A., Kiiamov A.G.: EPR and optical study of erbium-doped CeO_2 and $\text{CeO}_2/\text{CeF}_3$ nanoparticles // *Ceramics International* **50**, no. 6, 9263–9269 (2024)
 69. Pudovkin M.S., Morozov O.A., Korableva S.L., Rakhmatullin R.M., Semashko V.V., Ginkel A.K., Rodionov A.A., Kiiamov A.G.: The optical and magnetic properties of CeO_2 nanoparticles doped with Er^{3+} ions // *Magn. Reson. Solids. Electronic Journal* **26**, iss. 2, 24211 (9 pp.) (2024)
 70. Sakhapov I.F., Zagidullin A.A., Gafurov Z.N., Khismatova D.K., Zaripov R.B., Kagilev A.A., Kantuykov A.O.,

- Zueva E.M., Miluykov V.A., Shmelev A.G., Sinyashin O.G., Yakhvarov D.G.: Aryl group transfer and C-P bond formation in the reaction of organonickel sigma-complexes with sodium 3,4,5-triphenyl-1,2-diphospholide // *New J. Chem.* **48**, 1559 (2024)
71. Salikhov K.M., Bakirov M.M., Khairutdinov I.T., Zaripov R.B.: Experimental confirmation of the formation of collective modes of the magnetization motion of paramagnetic particles in dilute solutions due to spin exchange // *J. Magn. Res.* **363**, 107703 (2024)
 72. Salikhov K.M., Eaton S.S., Eaton G.R.: Celebration of 80 Years of EPR // *Appl. Magn. Reson.* **55**, 869–888 (2024)
 73. Salikhov K.M., Sukhanov A.A., Khairutdinov I.T.: Features of the primary electron spin echo signal for spin-correlated radical pairs // *Appl. Magn. Reson.* **55**, 463–475 (2024)
 74. Salikhov K.M.: New approach to the formation of a Bose-Einstein condensate // *Appl. Magn. Reson.* (in press) (2024)
 75. Salikhov K.M.: Similarities and differences in the effect of dipole-dipole and exchange interactions on the shape of the EPR spectrum of dilute solutions of paramagnetic particles // *Appl. Magn. Reson.* (in press) (2024)
 76. Sarychev M.N., Zhevstovskikh I.V., Ofitserova N.Yu., Korostelin Yu.V., Ulanov V.A., Egranov A.V., Surikov V.T., Averkiev N.S., Gudkov V.V.: Quantum acoustics of the Jahn-Teller complexes in doped crystals: Configurational relaxation time as indicator of the complex // *Physical Review B* **109**, no. 21, 214104 (9 pp.) (2024)
 77. Shakhmuratov R.N., Zinnatullin A., Vagizov F.: Cryptography with stochastic photons // *Europhys. Lett.* **147**, 38001 (2024)
 78. Shakhmuratov R.N.: Generation of pulses and multiplying their repetition rate using the temporal fractional Talbot effect // *Laser Physics* **24**, 105103 (2024)
 79. Shakurov G.S.: High-frequency EPR of Fe^{2+} ion in the CsCdBr_3 crystal // *Magn. Reson. Solids. Electronic Journal* **26**, iss. 2, 24213 (2024)
 80. Shaposhnikova T.S., Mamin R.F.: Effect of magnetic field on electric polarization in small magnetic particles // *Bull. Russ. Acad. Sci: Physics* **88**, iss. 5, 783–787 (2024)
 81. Shmelev A.G., Leontyev A.V., Petrov D.N., Nurtdinova L.A., Mityushkin E.O., Zharkov D.K., Zairov R.R., Mustafina A.R., Khasanov O.Kh., Nikiforov V.G.: $[\text{Ru}(\text{dipy})_3]^{2+}@\text{SiO}_2$ nanophosphor as temperature sensor: photobleaching cheating // *Bull. Russ. Acad. Sci: Physics* **88**, suppl. 1, S122–S126 (2024)
 82. Shustikov A.A., Kalinin A.A., Shmelev A.G., Gaysin A.I., Vakhonina T.A., Khamatgalimov A.R., Balakina M.Yu.: Nonlinear optical activity of polymer materials doped with quinoxaline-based chromophores containing TBDPSO groups // *Materials Letters.* **358**, 135809 (2024)
 83. Slesareva Yu.V., Vavilova E.L., Kandrashkin Yu.E., Zaripov R.B.: Comparison of the nuclear spin relaxation in magnetic Cu (II) and nonmagnetic Ni (II)-(bis) oxamato complexes // *Bull. Russ. Acad. Sci: Physics* **88**, iss. 7, 1082–1088 (2024)
 84. Soleimani Z., Absalan Y., Gholizadeh M., Asadinamin, Utenishev A., Galeev R.T., Soury K.: Unveiling the mechanisms of enhanced photocatalysis: A comprehensive study on metal-organic framework encapsulation strategies and the synthesis of Pt@MOF for efficient C–N coupling reactions // *ACS Applied Energy Materials* **7**, no. 9, 3787–3805 (2024)
 85. Starichenko D.V., Vorob'eva V.E., Gruzdev M.S., Chervonova U.V., Bichan N.G., Korolev A.V., Yatsyk I.V.: New branched iron(III) complexes in fluorescent environment created by carbazole moieties: Synthesis and structure, static magnetic and resonance properties // *Magnetochemistry* **10**, iss. 38, 1–20 (2024)
 86. Stepanov A.L., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Konovalov D.A., Rogov A.M.: Modification of the surface of germanium and the formation of a porous layer during implantation with indium ions // *Nanobiotechnology Reports* **18**, suppl. 1, S144–S150 (2024)
 87. Stepanov A.L., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Rogov A.M., Konovalov D.A.: Ion implantation: nanoporous germanium // *J. Sur. Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques* **18**, no. 4, 834–840 (2024)
 88. Strelnik A.D., Belova M.A., Vasilieva O.S., Fafanova E.M., Gnezdilov O.I., Ivanov S.A., Nikishova T.V., Badeev Y.V., Ocherednyuk E.A., Burilov V.A., Grishaev D.Y., Agafonova M.N., Shtyrilin Y.G.: Synthesis and antiglycation activity of pyridoxine azo derivatives // *Rus. J. Gen. Chem.* **94**, no. 11, 2868–2882 (2024)
 89. Sukhanov A.A., Valeev V.F., Nuzhdin V.I., Khaibullin R.I.: Photo-stimulated EPR spectroscopy of oxygen defects in a rutile (TiO_2) crystal irradiated with Ar ions // *Bull. Russ. Acad. Sci: Physics* **88**, iss. 7, 1077–1081 (2024)
 90. Syakaev V.V., Masliy A.N., Podyachev S.N., Sudakova S.N., Shvedova A.E., Lentin I.I., Gorbunov A.N., Vatsouro I.M., Lapaev D.V., Mambetova G.Sh., Kovalev V.V., Kuznetsov A.M., Mustafina A.R.: NMR and DFT-study of new luminescent Eu^{3+} complexes based on calix[4]-arenes with 1,2,3-triazole and 1,3-diketone groups // *Inorganica Chimica Acta* **561**, 121848 (2024)
 91. Talanov Yu.I., Gimazov I.I., Zheleznyakova D.E.: Impact of spin correlations on resistivity and microwave absorption of $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ // *Magn. Reson. Solids. Electronic Journal* **26**, iss. 2, 24110 (2024)
 92. Tarasov V.F., Zaripov R.B.: EPR Spectroscopy of the ground electron state of the Fe^{2+} impurity ion in amethyst // *Appl. Magn. Reson.* **55**, 961–967 (2024)
 93. Tarasov V.F.: Dimer self-organization of impurity rare earth ions in forsterite (Mg_2SiO_4) single crystals as revealed by EPR spectroscopy // *Magn. Reson. Solids. Electronic journal* **26**, iss. 2, 24215 (2024)
 94. Tokac M., Piskin H., Ozkal B., Aktas K.Y., Kocaman B., Arslan L.C., Rameev B.Z., Kazan S.: Influence of Ge concentration on magnetic properties of $\text{Co}_{(1-x)}\text{Ge}_x$ thin films // *Appl. Magn. Reson.* **55**, 1421–1435 (2024)

95. Tyschenko I., Batalov R.I., Shmelev A.G., Si Zh., Volodin V., Popov V.: Visible room-temperature emission and excitation photoluminescence in In⁺- and As⁺-co-implanted SiO₂ films // *J. Lumin.* **269**, Art. no. 120534 (6 pp) (2024)
96. Ulanov V.A., Zainullin R.R., Yatsyk I.V., Shestakov A., Sinitsyn A.M.: Electron paramagnetic resonance of Gd³⁺ ions in the Pb_{1-x-y}Gd_xCu_yS narrow-gap semiconductor: Effects of resonance transitions on conductivity // *Bull. Russ. Acad. Sci: Physics* **88**, iss. 12, 1938–1943 (2024)
97. Useinov N.Kh., Zaitsev N.S., Tagirov L.R.: Spin-polarized currents in point contact magnetic tunnel junctions taking into account gradients of electrochemical potential // *Magn. Reson. Solids. Electronic journal* **26**, iss. 1, Art. no. 24112 (2024)
98. Validov A.A., Nasyrova M.I., Khabibullin R.R., Garifulin I.A.: Insulating layers in multilayer systems based on F/S // *Ferroelectrics* **618**, 1461–1467 (2024)
99. Vasil'ev A.V.: Constant-depth algorithm for quantum hashing // *Russian Microelectronics* **52**, suppl. 1, S399–S402 (2024)
100. Volkov M.Yu., Sharipova A.R., Turanova O.A.: Synthesis and structure identification of 1-[4-(4-pentylcyclohexyl)-phenyl]-3-(quinolin-8-ylamino)prop-2-en-1-one molecules in solvents of different polarities // *Appl. Magn. Reson.* **56**, 297–312 (2024)
101. Volkov M.Yu., Sharipova A.R., Turanova O.A.: Photoisomerization of two 2-hydroxy-5-arylazobenzaldehydes in solvents of different polarities // *Photochemical & Photobiological Sciences* **23**, 1971–1981 (2024)
102. Volkov M.Yu., Sharipova A.R., Turanova O.A., Gubaidullin A.T., Shaidullina A.F., Savostina L.I., Turanov A.N.: Synthesis of 1-phenyl-3-(quinolin-8-ylamino)prop-2-en-1-one and analysis of its structure by X-ray crystallography, NMR, UV-Vis spectroscopy and DFT calculations // *ChemistrySelect*. **9**, no. 8, e202304190 (2024)
103. Vorkunov O.V., Shkalikov A.V., Apasov K.A.: Optical fiber application for temperature monitoring of cable line state of power transmission lines // 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, pp. 460–465 (2024)
104. Wang Ruilei, Sukhanov A.A., He Yue, Mambetov A.E., Zhao Jianzhang, Escudero Daniel, Voronkova V.K., Di Donato M.: Electron spin dynamics of the intersystem crossing in aminoanthraquinone derivatives: the spectral telltale of short triplet excited states // *J. Phys. Chem. B* **128**, 10189–10199 (2024)
105. Wu Y., Cao H., Bakirov M.M., Sukhanov A.A., Li J., Liao S., Xiao X., Zhao J., Ming-De Li, Kandrashkin Yu.E.: A rational way to control the triplet state wave function confinement of organic chromophores: effect of the connection sites and spin density distribution-guided molecular structure design principles in bodipy dimers // *J. Phys. Chem. Lett.* **15**, no. 4, 959–968 (2024)
106. Xi Chen, Lei Sun, Sukhanov A.A., Doria S., Bussotti L., Zhao J., Xu H., Dick B., Voronkova V.K., Di Donato M.: Photophysics and photochemistry of thermally activated delayed fluorescence emitters based on multiple resonance effect: transient optical and electron paramagnetic resonance studies // *Chem. Sci.* **15**, iss. 28, 10867–10881 (2024)
107. Yagfarova A.R., Yatsyk I.V., Mamedov D.V., Deeva Y.A., Uporova A.M., Chupakhina T.I., Khantimerov S.M., Gavrilova T.P.: Li₃V₂(PO₄)₃-based cathode materials for Li-ion batteries: time evolution of the vanadium valence state // *Bull. Russ. Acad. Sci: Physics* **88**, iss. 7, 1115–1121 (2024)
108. Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Gabbasov B.F., Yusupov R.V., Tagirov L.R.: Features of the temperature dependence of the spectra of spin waves in a thin Pd–Fe film with gradient composition // *Bull. Russ. Acad. Sci: Physics* **88**, iss. 7, 1135–1139 (2024)
109. Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Golovchanskiy I.A., Kiimov A.G., Gabbasov B.F., Yusupov R.V., Tagirov L.R.: Molecular beam epitaxy of Pd-Fe graded magnetic films for standing spin-waves control // *Journal of Vacuum Science and Technology A* **42**, iss. 5, Art. no. 052703 (2024)
110. Yarullin R.R., Yakovlev M.M., Boychenko N.V., Lyadov N.M.: Effect of mixed-mode loading on surface crack propagation in steels // *Engineering Fracture Mechanics* **295**, 109717 (2024)
111. Yatsyk I.V., Eremina R.M., Moshkina E.M., Batulin R.G., Shestakov A.: Synthesis and magnetic properties of Fe_{1.1}Ga_{0.9}O₃, measured according to electron spin resonance // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics* **88**, iss. 77, 1140–1147 (2024)
112. Yatsyk I.V., Mamedov D.V., Shestakov A., Fazlizhanov I.I., Eremina R.M., Andronenko S.I., Pyataev A.V., Vadnala S., Asthana S., Misra S.K.: EPR studies of rare earth manganites La_{0.7-x}Eu_xSr_{0.3}MnO₃ (x = 0.1–0.7) // *Appl. Magn. Reson.* **55**, 1199–1219 (2024)
113. Yorulmaz S.Ç., Avinca E., Zainullin F., Ari O., Maksutoğlu M., Khaibullin R.I., Rameev B.Z.: Photoluminescence of Er-doped YIG crystal // *Proceedings of SPIE* **13028**, Art. no. 1302807 (2024)
114. Zagidullin A.A., Sakhapov I.F., Saitova A.M., Gerasimova T.P., Gafurov Z.N., Kagilev A.A., Morozov V.I., Zueva E.M., Khismatova D.K., Miluykov V.A., Shmelev A.G., Yakhvarov D.G.: Influence of the substituents on physico-chemical properties of 1-R-1,2-diphospholes: Theoretical and experimental study // *J. Organomet. Chem.* **1012**, 123142 (2024)
115. Zaripov R.B., Galeev R.T., Salikhov K.M.: “Nutation” of electron spins in biradicals // *J. Magn. Res.* **368**, 107790 (2024)
116. Zaripov R.B., Liu Fupin, Rosenkranz M., Barbosa M., Kandrashkin Yu.E., Kataev V., Avdoshenko S., Popov A.A.: An interplay between metal-fullerene and metal-metal bonding in molecular magnetism of erbium

- metallofullerenes // *Inorganic Chemistry Frontiers* **11**, 7126–7141 (2024)
117. Zueva O.S., Zvereva E.R., Bakhtiyarova Yu.V., Markarova A.O., Ageeva M.V., Ziganshina S.A., Valeeva F.G., Zakharova L.Ya.: Associative behavior of long-chain n-alkanes in petroleum dispersed systems // *Rus. Chem. Bull.* **73**, iss. 3, 546–554 (2024)
 118. Асатрян Г.Р., Шакуров Г.С., Романов Н.Г., Петросян А.Г.: Парамагнитные центры Tb^{3+} в иттрий-алюминиевом гранате // *ФТТ* **66**, вып. 2, 289–295 (2024)
 119. Базан Л.В., Андрианов В.В., Арсланов А.И., Силантьева Д.И., Богодвид Т.Х., Яфарова Г.Г., Дерябина И.Б., Муранова Л.Н., Нагибов А.В., Рубахова В.М., Фёдорова Е.В., Филипович Т.А., Кульчицкий В.А., Гайнутдинов Х.Л.: Исследование содержания NO и меди в печени крыс после формирования сочетанной травмы головного и спинного мозга методом ЭПР спектроскопии // *ЖТФ* **94**, вып. 10, 1756–1764 (2024)
 120. Баталов Р.И., Базаров В.В., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Новиков Г.А., Шустов В.А., Галкин К.Н., Чистохин И.Б., Комаров Ф.Ф., Мильчанин О.В., Пархоменко И.Н.: Исследование структурных, оптических и фотоэлектрических свойств кремния, имплантированного ионами индия и сурьмы и подвергнутого, импульсному ионному отжигу // *Журнал прикладной спектроскопии* **91**, № 6 (2024)
 121. Бельская Н.А., Храпова Е.К., Иванова А.А., Ермина Р.М., Батулин Р.Г., Чикуров Д.С., Дегтяренко П.Н., Цветков А.Ю., Кириленко Д.А., Красилин А.А.: Магнитные свойства наносвистков состава $(Mg_{1-x}Co_x)_3Si_2O_5(OH)_4$ и нанокмпозитов на их основе // *Письма в ЖЭТФ* **120**, вып. 4, 52–259 (2024)
 122. Бизяев Д.А., Загорский Д.Л., Хайретдинова Д.Р.: Зондовая микроскопия в исследовании нанопроволок Ni/Cu и FeNi // *Российские нанотехнологии* **19**, № 1, 65–74 (2024)
 123. Бизяев Д.А., Чукланов А.П., Бухараев А.А., Нургазизов Н.И., Кудрявцева Е.О.: Магнитоупругий эффект в субмикронных частицах Ni, сформированных на поверхности кристалла трибората лития // *ФТТ* **66**, вып. 6, 913–920 (2024)
 124. Воркунов О.А., Шкаликов А.В., Апасов К.А.: Мониторинг температуры кабельных линий электропередачи с помощью суженного кварцевого оптического волокна // *Инженерный вестник Дона* № 8 (2024)
 125. Гафарова А.Р., Гумаров Г.Г., Зарипов Р.Б., Рыбин Д.С., Коньгин Г.Н.: Многочастотное ЭПР исследование радикалов, образующихся под действием γ -облучения и механоактивации в глюконате кальция // *Химическая физика и мезоскопия* **26**, № 3, 299–305 (2024)
 126. Горюнов Ю.В., Натепров А.Н.: Особенности температурного поведения ЭСР-спектров ионов Cr^{3+} в дираковском 3D-полуметалле Cd_3As_2 // *ФТТ* **66**, вып. 11, 1852–1858 (2024)
 127. Данилов Ю.А., Быков В.А., Вихрова О.В., Здоровейщев Д.А., Калентьева И.Л., Крюков Р.Н., Парафин А.Е., Агафонов Ю.А., Зиненко В.И., Баталов Р.И., Валеев В.Ф., Нуждин В.И.: Гальваномагнитные свойства слоёв GaMnAs, полученных ионной имплантацией: роль энергии ионов Mn^{+} // *ФТТ* **66**, вып. 6, 871–876 (2024)
 128. Зарипов Р.Б., Уланов В.А., Зайнуллин Р.Р., Калимуллин Р.И.: Электронный парамагнитный резонанс обменно-связанных пар ионов $[Fe^{+}-Fe^{2+}]$ в кристалле $BaF_2:Fe$ // *Известия РАН: Сер. физ.* **88**, № 12, 1921–1929 (2024)
 129. Зарипова Р.И., Яфарова Г.Г., Андрианов В.В., Сунгатуллина М.И., Зиятдинова Н.И., Гайнутдинов Х.Л., Зефилов Т.Л.: Влияние ограничения двигательной активности на содержание меди в организме крыс // *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины* **178**, № 9, 291–295 (2024)
 130. Камашев А.А., Гарифьянов Н.Н., Валидов А.А., Катаев В., Осин А.С., Фоминов Я.В., Гарифуллин И.А.: Эффект сверхпроводящего спинового клапана в гетероструктуре Co/Pb/Co с изолирующими прослойками // *Письма в ЖЭТФ* **119**, вып. 4, 296–301 (2024)
 131. Ковалев М.С., Подлесных И.М., Баталов Р.И., Сцепуро Н.Г., Кудряшов С.И.: Импульсный лазерный отжиг кремния, имплантированного ионами марганца // *Оптика и спектроскопия* **132**, № 1, 42–46 (2024)
 132. Лапаев Д.В., Никифоров В.Г., Жарков Д.К., Князев А.А., Галяметдинов Ю.Г.: Структурные особенности и эффект температурной памяти в застеклованной плёнке бета-дикетонатного комплекса европия(III) // *Известия РАН: Сер. физ. (в печати)* (2024)
 133. Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Митюшкин Е.О., Шмелёв А.Г., Жарков Д.К., Андрианов В.В., Муранова Л.Н., Гайнутдинов Х.Л., Заиров Р.Р., А.Р. Хазиева, А.Р. Мустафина, В.Г. Никифоров: Наночастицы $[Ru(dipy)_3]^{2+}@SiO_2$ как термосенсоры и зонды для люминесцентной томографии биопрепаратов // *ЖТФ* **94**, вып. 9, 1576–1582 (2024)
 134. Лядов Н.М., Вахитов И.Р., И. Гумаров А.И., Файзрахманов И.А., Хайбуллин Р.И.: Микроструктура тонких плёнок железа с перпендикулярной магнитной анизотропией // *ФТТ* **66**, вып. 8, 1372–1377 (2024)
 135. Митюшкин Е.О., Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Жарков Д.К., Никифоров В.Г.: Мультимодальные люминесцентные апконверсионные сенсоры температуры $NaYF_4:Yb,Er,Tm$ для биологических приложений // *Известия РАН: Сер. физ. (в печати)* (2024)
 136. Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Баязитов А.А.: Аппаратно-программный комплекс мониторинга температуры магнита магнитно-резонансного томографа // *Приборы и техника эксперимента* № 3 (2024)
 137. Перминов Н.С., Моисеев С.А.: Многорезонаторная квантовая память с многоцикловым хранением информации // *Изв. вузов. Радиофизика* **67**, № 1, (2024)

138. Сагдеев Д.О., Шмелёв А.Г., Никифоров В.Г., Суханов А.А., Галяметдинов Ю.Г.: Люминесценция мезогенного комплекса гадолиния в композите с парамагнитными квантовыми точками // Жидкие кристаллы и их практическое использование **24**, № 2, 21–31 (2024)
139. Степанов А.Л., Рогов А.М., Коновалов Д.А.: Формирование слоёв GaAs с наночастицами Ag методом ионной имплантации // Письма в ЖТФ **50**, вып. 12, 12–15 (2024)
140. Тарасов В.Ф., Соловаров Н.К., Суханов А.А., Заварцев Ю.Д.: Магнитоэлектрическое возбуждение резонансных переходов в электронной спиновой системе примесных ионов ^{167}Er в ортосиликате иттрия (Y_2SiO_5) // ЖЭТФ **165**, вып. 2, 250–257 (2024)
141. Уланов В.А., Зайнуллин Р.Р., Яцык И.В., Шестаков А.В., Синицин А.М.: Электронный парамагнитный резонанс ионов Gd^{3+} в узкозонном полупроводнике $\text{Pb}_{(1-x-y)}\text{Gd}_x\text{Cu}_y\text{S}$: эффекты влияния резонансных переходов на проводимость // Известия РАН: Сер. физ. **88**, № 12, 1938–1943 (2024)
142. Уланов В.А., Яцык И.В., Зарипов Р.Б., Зайнуллин Р.Р., Голенищев-Кутузов В.А.: Структура и магнитные свойства примесных комплексов $[\text{NiF}_4\text{F}_{\text{in}}]6-(\text{C}4\text{v})$ в кристалле BaF_2 : данные изучения методом ЭПР // Изв. РАН: Сер. физ. **88**, № 12, 1930–1937 (2024)
143. Ундалов Р.В., Ежкова А.М., Ахметов М.М., Лядов Н.М., Ларина Ю.В., Ежков В.О.: Электронномикроскопическая оценка механизма проникновения веществ в эмбрион через поры скорлупы // Учёные записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н. Э. Баумана **257**, 256–260 (2024)
144. Фатыхов Р.Р., Гаврилова Т.П., Ягфарова А.Р., Лядов Н.М., Хантимеров С.М., Сулейманов Н.М.: Электронный парамагнитный резонанс в нестехиометрическом кобальтите Na_xCoO_2 и исследование влияния деградационных процессов на свойства системы Na_xCoO_2 // ФТТ **66**, вып. 6, 925–932 (2024)
145. Чукланов А.П., Морозова А.С., Митюшкин Е.О., Никифоров В.Г., Нургазизов Н.И.: Прецизионная селекция из ансамбля, перемещение в нанометровых масштабах и угловое ориентирование наночастиц на основе NaYF_4 и YVO_4 , допированных Yb и Er методами сканирующей зондовой микроскопии // Изв. РАН. Сер. физ. (в печати) (2024)
146. Чукланов А.П., Морозова А.С., Митюшкин Е.О., Нуртдинова Л.А., Леонтьев А.В., Никифоров В.Г., Нургазизов Н.И.: Импринтинг апконверсионных наночастиц методами сканирующей зондовой микроскопии // Изв. РАН. Сер. физ. (в печати) (2024)
147. Шагалов В.А., Фахрутдинов А.Р., Фаттахов Я.В., Одиванов В.Л.: Широкополосный приёмник для ЯМР томографа // Приборы и техника эксперимента № 3 (2024)
148. Шегеда А.М., Кораблева С.Л., Морозов О.А.: Не-взаимность оптических свойств кристаллов YLiF_4 и LuLiF_4 с примесями эрбия в постоянных и импульсных магнитных полях // Изв. РАН. Сер. физ. **88**, № 12 (2024)

Защиты, награды

Кандидатскую диссертацию защитили:

- Гарипов Ранис Рамисович (руководитель: Хантимеров С.М., к.ф.-м.н.)
“Исследование структуры и электрофизических свойств композитов на основе полимерных материалов и углеродных наноструктур”
1.3.11 – Физика полупроводников
- Гимазов Ильнур Илхамович (руководитель: Таланов Ю.И., д.ф.-м.н.)
“Исследование короткоживущих возбуждений в купратных и железосодержащих сверхпроводниках”
1.3.12 – Физика магнитных явлений

– Ликеров Родион Фаридович (руководитель: Ерёмин Р.М., д.ф.-м.н.)

“Релаксационные и магнитные свойства 3d- и 4f-ионов в монокристаллах ортосиликатов $\text{Y}^{228}\text{SiO}_5$ и $\text{Sc}^{228}\text{SiO}_5$ по данным ЭПР”

1.3.12 – Физика магнитных явлений

Докторскую диссертацию защитила

– Вавилова Евгения Леонидовна

“Взаимодействие низкоразмерности, магнитной фрустрации и дефектов в квантовых спиновых магнетиках, исследованное методом ядерного магнитного резонанса”

1.3.12 – Физика магнитных явлений

Премия им. М. Л. Блатта (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН) присуждена Махову Дмитрию Александровичу, водителю

Почётное звание “Ветеран КФТИ” присуждено:

- Ильматовой Диляре Вячеславовне, вед. инженеру научно-организационного отдела

- Туранову Александру Николаевичу, руководителю лаборатории молекулярной радиоспектроскопии
- Рамееву Булату Зуфаровичу, с.н.с. лаборатории радиационной физики
- Катаеву Владиславу Евгеньевичу, в.н.с. лаборатории спиновой физики и спиновой химии

Участие сотрудников института в преподавательской деятельности

В 2024 году сотрудники КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, помимо основной научно-исследовательской работы, занимались преподавательской деятельностью в различных вузах г. Казани, где читали следующие учебные курсы:

Васильев А.В., преподаватель КФУ

- Теория квантовых вычислений и алгоритмов
- Теория сложности
- Алгоритмы и анализ сложности
- Технологии и методы программирования

Вавилова Е.Л., доцент аспирантуры ФИЦ КазНЦ РАН

- Междисциплинарный семинар аспирантов и молодых учёных ФИЦ КазНЦ РАН

Гайнутдинов Х.Л., профессор каф. физиологии человека и животных Института фундаментальной медицины и биологии КФУ

- Медицинская биофизика
- Нейробиология

Гумарова И.И., доцент каф. общей физики Института физики КФУ

- Материаловедение
- Компьютерный дизайн материалов

Ерёмина Р.М., профессор каф. общей физики Института физики КФУ

- Оптика
- Электричество и магнетизм
- История и методология физики
- Новые источники энергии

Никифоров В.Г., ст. преподаватель Университета Иннополис

- Механика
- Электротехника

доцент каф. квантовых оптических технологий КФУ

- Фемтосекундная оптика

Савостина Л.И., доцент каф. физики молекулярных систем Института физики КФУ

- Квантовая механика молекулярных систем
- Физика жидкости
- Введение в профессиональную деятельность
- Компьютерное моделирование межмолекулярных взаимодействий

Суханов А.А., ст. преподаватель каф. медицинской и биологической физики с информатикой и медицинской аппаратурой КГМУ

- Медицинская электроника

Туранов А.Н., профессор каф. медицинской физика Института физики КФУ

- Медицинская физика
- Медицинская электроника

Туранова О.А., ассистент каф. медицинской физика Института физики КФУ

- Химические основы биофизики

Уланов В.А., профессор КГЭУ

- Физико-математические модели электронных узлов
- Электронные преобразователи информационных сигналов

Фазлижанов И.И., доцент каф. общей физики Института физики КФУ

- Общая физика

Яцык И.В., доцент каф. общей физики Института физики КФУ

- Физика

Патенты

В 2024 года у ФИЦ появились исключительные права на три объекта интеллектуальной собственности, созданные в КФТИ:

1. Изобретение “Способ генерации и управления высокочастотными импульсами для регистрации спектров двойного электронно-ядерного резонанса”
Патент Российской Федерации № 2810965, приоритет 07.08.2023, опубликовано 09.01.2024
Авторы: Зарипов Р.Б., Гайнетдинов А.Ф.
2. Изобретение “Антиотражающее оптическое покрытие на основе пористого германия”
Патент Российской Федерации № 2817009, приоритет 07.07.2023, опубликовано 09.04.2024
Авторы: Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А.
3. Полезная модель “Модуль формирования высокочастотных импульсов для спектроскопии двойного электронно-ядерного резонанса”
Патент Российской Федерации № 224506, приоритет 07.08.2023, опубликовано 28.03.2024
Авторы: Зарипов Р.Б., Гайнетдинов А.Ф.

Сотрудники КФТИ являются авторами изобретений, права на которые принадлежат Открытому акционерному обществу “Российские железные дороги”:

1. Изобретение “Способ стабилизации узкополосных источников неклассических состояний света, получаемых внутрирезонаторной генерацией спонтанного параметрического рассеяния света, и устройство для его осуществления”
Патент Российской Федерации № 2811388, приоритет 20.04.2023, опубликовано 11.01.2024
Авторы: Акатьев Д.О., Латыпов И.З.
2. Изобретение “Способ генерации и управления высокочастотными импульсами для регистрации спектров двойного электронно-ядерного резонанса”
Патент Российской Федерации № 2820883, приоритет 20.04.2023, опубликовано 11.06.2024
Авторы: Калачёв А.А., Шкаликов А.В., Акатьев Д.О.



Конференции, организованные КФТИ и при участии КФТИ

1. International Conference “Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives (EPR-80)”, September 23–27, 2024, Kazan. International conference is supported by: Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ministry of Education and Science of the Republic of Tatarstan, Russian Academy of Sciences, Academy of Sciences of Tatarstan, Kazan Federal University, Foundation for Social Program Sup-

port, ELEMENT company, ADVIN company Centre of Technical Support “NAUKA”, CRYOTRADE Engineering company, LLC “ADANI Rus”, Federal Research Center “Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”.

2. Итоговая конференция КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, 7 февраля 2024 года (устная сессия), 14 февраля 2023 года (стендовая сессия).

International Conference “Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives” (EPR-80)

MONDAY, September 23, 2024

Opening ceremony

Plenary lectures

Chair: M. R. Gafurov

Alexander Dooglav: How EPR has been discovered? The analysis of Zavoisky’s logbooks

Evgenii Ivchenko: Electron and hole g-factors in semiconductors and semiconductor nanosystems

Sergey Nazarov: The documentary legacy of academician E. K. Zavoisky in the Archives of RAS (in Russian)

Session: Spin-based information processing and optical quantum technologies

Chair: I. N. Gracheva and A. A. Kalachev

Oral Talks

Alexey Kalachev: Recent progress towards a quantum repeater

Larisa Nurtdinova: Visualisation of the surface of isolated nervous system of a grape snail with fluorescent nanoprobe

Ansar Safin: Electrically tunable sub-terahertz resonance in antiferromagnet-based heterostructure (online)

Andrey Leontyev: Core-shell $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{NaGdF}_4:\text{Ce}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ nanoparticles for dual-mode fluorescence-based temperature sensing and anti-counterfeiting

Irina Gracheva: Electron-nuclear interactions in optically active NV-centers in 6H-SiC – a promising material platform for quantum technologies

Session: Magnetic resonance of the solid state: from crystals to quantum dots

Chair: S. V. Demishev

Invited Talk

Yuri Kusrayev: Multiple-spin Raman paramagnetic resonance induced by the hole exchange field in CdSe/ZnMnSe quantum dots

Oral Talks

Evgeniia Vavilova: Static and resonant properties and magnetic phase diagram of $\text{LiMn}_2\text{TeO}_6$

Faik Mikailzade: Magnetic resonance study of Fe doped TlInTe_2 crystal (online)

Rushana Eremina: Study of peculiarities of Co^{2+} and Co^{3+} EPR spectra in different spin states

Session: Advances in magnetic resonance theory and instrumentation

Chair: Yu. I. Talanov

Oral Talks

Yuri Kandrashkin: On some properties of the ion spin system in pulsed EPR experiments

Artemiy Gol’dberg: Features of modeling the NMR signal shape recorded using the modulation technique from liquid media

Anna Matveeva: Analytical prediction of mean interspin distance and its uncertainties in PDS measurements by EPR

Sofia Klimova: Analysis of the trajectory of a symmetrical spinning top in the Earth’s magnetic field

Roman Mironov: Influence of the “frequency effect” on the Condon form of the electron oscillatory absorption spectrum of the impurity center in the case of a single-oscillator model

Kirill Tsiberkin: Numerical simulation of long-time dynamics of finite dipole ensembles

Session: Magnetic resonance in chemical and biological systems

Chair: A. I. Kokorin

Invited Talk

Matvey Fedin: EPR of radical-functionalized materials

Oral Talks

Natalia Chumakova: Phase state of polar liquids inside graphene oxide materials according to spin probe technique

Akhat Ilyasov: Development of free radical EPR in Kazan

Sofia Trakhina: Study of 3,3-bis-hydroxymethyl sterically shielded nitroxyl radicals of the pyrrolidine series by EPR spectroscopy

Georgii Simenido: PNIPAM chains collapse in aqueous solutions in presence of proteins: spin probe and spin label study

Stephany Natasha Arellano-Ahumada: Paramagnetic markers in polycystic ovarian syndrome as a possible infertility cause: an EPR study

Daniel Ramirez-Rosales: Electrochemical test cell for in situ and in operando EPR characterization of Li-ion insertion battery electrodes

TUESDAY, September 24, 2024

Plenary lectures

Chair: K. S. Usachev

Alexander Kamnev: Microbiological applications of Mössbauer spectroscopy

Sergey Demishev: EPR as a tool for studying magnetic fluctuations in strongly correlated electronic systems

Session: Applications of magnetic resonance in medical physics

Chair: K. S. Usachev

Oral Talks

Nikolay Isaev: Potential pharmaceutical pulse EPR applications for detection protein folding and environment upon lyophilization

Ekaterina Boltchenkova: The different types of treatment effect on the DyF₃ nanoparticles agglomeration

Mariam Fattakhova: Recovery of teacher's voice function after chronic diseases using spectral voice analysis and MRI

Khalil Gainutdinov: Investigation of NO and copper content in injured and non-injured areas of the rats brain by EPR spectroscopy 24 hours and 7 days after combined brain and spinal cord injury

Amina Shaidullina: Structure determination and study of the internal dynamics of a β -enaminone by NMR, UV spectroscopy and DFT

Session: Magnetic resonance of the solid state: from crystals to quantum dots

Chair: Yu. G. Kusraev

Invited Talk

Alexander Smirnov: Pseudospin paramagnet and spin liquid in a chain antiferromagnet Cs₂CoCl₄

Oral Talks

Sofya Andreeva: Pseudospin quantum phase transition probed by ESR

Vasiliy Glazkov: Low-temperature spin dynamics and microwave dielectric response of 2D square kagomé lattice nabokoite family compounds

Egor Alakshin: Magnetic properties of rare-earth trifluoride nanoparticles

Zavoisky Award Ceremony

Lectures of Zavoisky Awardees 2024

Anatoly Vanin: Fundamental role of the EPR method in discovery, identification and study of dinitrosyl iron complexes in living organisms

Robert G. Griffin: EPR and DNP at millimeter wavelengths (online)

WEDNESDAY, September 25, 2024

Plenary lectures

Chair: S. M. Khantimerov

Konstantin Usachev: Magnetic resonance applications in structural studies of large macromolecular complexes

Kev Salikhov: Current state of spin exchange theory. New spin exchange paradigm

Session: Spin physics and spin chemistry

Chair: R. V. Yusupov

Invited Talks

Jianzhang Zhao: Study of the electron spin polarization of the triplet excited states of BODIPY compounds with time-resolved electron paramagnetic resonance spectroscopy (online)

Andrey Sukhanov: Features of photo-excited charge separation states in TADF molecules

Oral Talks

Roman Podarov: Dipolar EPR spectroscopy of fullerene and porphyrin symmetry pairs

Sergey Sviyazov: ¹⁵N hyperpolarization of metronidazole antibiotic in aqueous media using phase-separated signal amplification by reversible exchange with parahydrogen

Kirill Baryshnikov: Restoration of optical orientation of manganese ions spins in cubic ZnSe crystal in magnetic field

Georgii Andreev: Magnetic properties of LiErF₄ dipolar magnet

Session: Mössbauer spectroscopy and its applications

Chair: E. V. Voronina and A. A. Kamnev

Invited Talk

Kirill Frolov: Mössbauer spectroscopy of the rare earth ferrobates RFe₃(BO₃)₄ (R = Pr, Eu, Tb, Dy)

Oral Talks

Maria Gracheva: Iron citrate complexes at biologically relevant conditions (online)

Sergey Dedushenko: The effect of the second coordination sphere of iron on the ⁵⁷Fe-Mössbauer isomer shifts in oxides

Farit Vagizov: Transmission of information using Mössbauer photons

Elena Voronina: On the magnetic structure of ternary ordered Fe-Al-B alloys

Alexander Zalutskii: Separation of contributions from exchangeable and structural forms of iron in natural clays

Kirill Frolov: Mössbauer spectroscopy of the rare earth ferrobates SmFe_{3-x}M_x(BO₃)₄ (M = Al, Sc)

Vadim Musin: High-entropy system $\text{Mg}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.2}\text{Ni}_{0.2}\text{Zn}_{0.2}\text{O}$: synthesis, X-ray diffraction and Mössbauer studies

Session: Spin physics and spin chemistry

Chair: V. N. Glazkov

Invited Talks

Elizaveta Konstantinova: On the question of the role of spin centers in radiative recombination processes in nanomaterials

Michael Bowman: Impact of random processes on coherences (online)

Oral Talks

Arkady Samsonenko: Microgravity-like crystallization of paramagnetic species in strong magnetic fields

Zarina Minnegulova: Ab initio research of impurity ferromagnetism of paramagnetic palladium ions

Session: Magnetic resonance of the solid state: from crystals to quantum dots

Chair: A. I. Smirnov

Invited Talks

Yury Shukrinov: Resonance features of anomalous Josephson junctions

Igor Yanilkin: Graded thin ferromagnetic epitaxial Pd-Fe films: FMR measurements

Oral Talks

Roman Yusupov: Ultrafast light-induced magnetization precession – a complementary tool to FMR for studies of thin ferromagnetic films

Bulat Gabbasov: Surface induced anisotropy in MgO single crystals observed by EPR spectroscopy

Session: Spin physics and spin chemistry

Chair: K. M. Salikhov

Invited Talks

Sandra Eaton: Spin-lattice relaxation of Cr(V) nitrido complexes: experiments and calculations (online)

Gareth Eaton: Electron spin relaxation of manganese in the +2, +3, and +4 oxidation states (online)

Oral Talks

Valery Tarasov: Unusual EPR spectra of Cr^{2+} dimer associates in BaF_2 single crystal

Elmira Abdrakhimova: First-principles investigation of the Rashba–Dresselhaus giant spin splitting in the structure of $\text{OsH}_2(\text{bipyridine_CN})$

Session: Magnetic resonance in chemical and biological systems

Chair: N. A. Chumakova

Invited Talk

Alexander Kokorin: EPR of copper (II) complexes with polymer ligands

Oral Talks

Dmitriy Rybin: Free radical mechanisms of amorphization of bioinorganic compounds

Svetlana Yurtaeva: Variation of the EPR spectra of non-morphogenic buckwheat cell culture during growth and cell division

Nikita Litovskikh: Structure of zinc finger of the E. Coli FPG in the solution

THURSDAY, September 26, 2024

Plenary lectures

Chair: E. L. Vavilova

Mikhail Zhitomirskii: Longitudinal magnons: new collective quantum excitations in large-S magnets (online)

Yury Bunkov: 40 years of magnon Bose Einstein condensation

Session: Magnetic resonance of the solid state: from crystals to quantum dots

Chair: R. M. Eremina

Oral Talks

Vladimir Ulanov: Mutual dependences of dynamical properties of Mn^{2+} and Gd^{3+} impurity centers in $\text{Pb}_{1-x-y-z}\text{Cu}_x\text{Mn}_y\text{Gd}_z\text{S}$ narrow-band semiconductor: results of EPR study

Albert Ziatdinov: New properties of titanium dioxide heat-treated in various environments according to electron magnetic resonance data (online)

Kirill Evseev: DFT investigation of magnetoelectric coupling in Fe/BaTiO_3

Denis Saritsky: Electron paramagnetic resonance in nanocrystalline potassium tetratitanate doped with copper ions

XXIV International Youth Scientific School

“Current Problems of Magnetic Resonance and Its Application”

FRIDAY, September 27, 2024

Session: Spin physics and spin chemistry

Chair: V. F. Tarasov

Invited Talks

Anastas Bukharaev: Influence of the thermally induced magnetoelastic effect on magnetization switching in Ni microparticles with configuration anisotropy

Liudmila Siurakshina: Anisotropic spin Hamiltonians for iridium oxides: justification from the embedded cluster approach

Vasily Shaginyan: Strongly correlated quantum spin liquids versus heavy fermion metals

Oral Talk

Vladimir Zhaketov: Polarized neutron reflectometry for investigation of low-dimensional 2D magnetic & superconducting heterostructures (online)

Session: Magnetic resonance in chemical and biological systems

Chair: S. V. Yurtaeva

Invited Talk

Vitaly Volkov: Copper (II) EPR in amino phosphonic polyampholytes

Oral Talks

Sergei Dementev: Effective spin traps for singlet oxygen detection in physiological conditions

Tamara Khlynova: Investigation of the HTel-22 G-quadruplex complex with cationic porphyrin by EPR and optical spectroscopy methods (online)

Mikhail Matveev: Joint use of spin probe technique and scanning electron microscopy to study the internal structure of graphene oxide membranes

Alexandra Timralieva: Light-induced two-cycle radical formation in supramolecular crystalline matrix

Closing ceremony

Poster sessions

1. Spin physics and spin chemistry

- Bakirov M.M., Khairutdinov I.T., Zaripov R.B., Salikhov K.M.: The dipole-dipole interaction contribution to EPR spectra of nitroxyl free radical solution
- Batueva E.E., Sharipova A.R., Frolova E.N., Turanova O.A., Savostina L.I., Zaripov R.B., Turanov A.N.: New Fe(III) complexes of NNO tridentate β -enaminone in solutions: EPR research and molecular docking
- Batueva E.E., Sharipova A.R., Frolova E.N., Sukhanov A.A., Turanova O.A., Turanov A.N.: Heptanuclear Fe(II)–Fe(III) complex as a multifunctional magnetic material
- Evseev A.A., Gumarova I.I., Nedopekin O.V.: *Ab initio* investigation of Rashba splitting heterostructures
- for spintron applications
- Gimazov I.I., Zhelezniakova D.E., Talanov Yu.I.: Impact of spin correlations on resistivity and microwave absorption of iron pnictides doped with cobalt
- Zyuzin A.M., Igonchenkova K.E., Karpeev A.A., Yantsen N.V., Gostyushov S.S.: EPR in polymer composites with carbon black
- Pulotov Zh.K., Kadikova A.K., Gabbasov B.F., Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Kiiamov A.G., Tagirov L.R., Yusupov R.V.: Magnetoresonant properties and spin-Hall effects in epitaxial $\text{Pd}_{(1-x)}\text{Fe}_{(x)}$ and $\text{Pd}_{(1-x)}\text{Fe}_{(x)}/\text{Pt}$ structures
- Sakhin V.O., Kukovitsky E.F., Gimazov I.I., Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Talanov Yu.I.: Magnetotransport investigation of $\text{Pb}/\text{Bi}_{1.08}\text{Sn}_{0.02}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$ heterostructures
- Shamsieva A.I., Gumarova I.I.: Computer design of new organic materials for metal-ion batteries
- Shestakov A.V., Seidov Z.Y., Yatsyk I.V., Ovchinnikov A.S., Vagizov F.G., Shustov V.A., Badelin A.G., Karpasyuk V.K., Krug von Nidda H.-A., Eremina R.M.: Observation of a Griffiths phase and analysis of the critical exponents

in the magnetic behavior of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.9}\text{Fe}_{0.1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$ ($x = 0.05, 0.075, 0.1$)

- Shestakov A.V., Fazlizhanov I.I., Eremina R.M., Demishev S.V., Rodionova V.V., Kolesnikova V.G.: High temperature ESR absorption of $\text{Fe}_{45}\text{Co}_{30}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ microwire
- Demishev S.V., Shestakov A.V., Yatsyk I.V., Eremina R.M., Semeno A.V., Grigoriev S.V.: Study of low-temperature spin fluctuation transition in the conical phase of MnSi and anisotropy features
- Starichenko D.V., Vorobeva V.E., Gruzdev M.S., Chervonova U.V., Volegov A.S., Yatsyk I.V.: Comprehensive study of magneto-resonance properties of dendrimer metal complexes of polydentate N,O-ligands using the example of a new Fe^{3+} β -diketonate
- Sukhanov A.A., Bazarov V.V., Valeev V.F., Nuzhdin V.I., Khaibullin R.I.: Ferromagnetic resonance in Co-ions implanted SnO_2 films: Effects of oxygen vacancies
- Useinov N.Kh.: Resonance conductance of electrons on interfaces of magnetic tunnel junction
- Voronkova V.K., Sukhanov A.A., Mambetov A.E., Jianzhang Zhao: Electron spin polarization dynamics of the photoexcited triplet states of the organic chromophores and donor-acceptor dyads: analysis of the TREPR spectra evolution
- Zyuzin A.M., Igonchenkova K.E., Karpeev A.A., Yantsen N.V., Gostyushov S.S.: Effect of carbon black content on the EPR linewidth in a composite based on an ethylene vinyl acetate matrix
- Zaripov R.B., Kandrashkin Yu.E.: ESEEM study of $\text{Y}_3\text{N}@C_{80}$ under photoexcitation
- Zaripov R.B., Ulanov V.A., Zainullin R.R.: EPR study of iron impurities in BaF_2 single crystal under X-ray irradiation

2. Advances in magnetic resonance theory and instrumentation

- Bogaychuk A.V.: Cylindrical and sphere Halbach magnet arrays
- Ivanov D.S., Afanas'eva A.N., Skirda V.D.: Peculiarities of pore space investigation by NMR relaxometry and cryoporometry methods
- Khairutdinov I.T., Zaripov R.B., Bakirov M.M., Volkov M.Yu.: Simulation of CPMG sequence echo signals with Gaussian pulse shape
- Ramírez-Rosales D., Vazquez-Samperio J., Arellano-Ahumada S.N., Martínez-Cruz M.A., González I.: Electrochemical test cell for in situ and in operando EPR characterization of Li-ion insertion battery electrodes
- Sannikov K.O., Klochkov A.V., Zverev D.G., Mampua P.: Low temperature NMR probe with variable frequency
- Tuckachev A.V., Alexandrov A.S., Melnikova D.L., Skirda V.D.: The promises of low-field magnetic resonance imaging
- Valiullin A.L., Skirda V.D., Ivanov D.S., Alexandrov A.S., Gnezdilov O.I., Doroginizky M.M., Kazbaev T.A.: Development of a software product for design gradient systems in nuclear magnetic resonance equipment

3. *Magnetic resonance of the solid state: from crystals to quantum dots*

- Garaeva A.M., Murzakhanov F.F., Boltenkova E.I., Mamin G.V., Alakshin E.M.: Surface and volume centers in LaF_3 particles
- Gavrilova T.P., Yagfarova A.R., Gyrdasova O.I., Yatsyk I.V.: Sorption-oxidation mechanism for the removal of Arsenic (III) using Cu-doped ZnO
- Germov A.Yu., Suvorkov Ye.V. a: NMR and Mössbauer spectroscopy study of the possibility of obtaining homogeneous nanoparticles based on FeCu alloys
- Goryunov Yu.V.: The Mn^{2+} EPR study of Cd_3P_2 for the topological tuning with 3D Dirac semimetal Cd_3As_2
- Gurin A.S., Babunts R.A., Batueva A.V., Kramushchenko D.D., Baranov P.G., Panov D.Yu., Spiridonov V.A., Bauman D.A., Romanov A.E.: Electron paramagnetic resonance investigations of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ single crystals doped with chromium
- Karataş Ö., Okay C., Özkal B., Kazan S., Rameev B.Z., Cherkashin N., Begishev E.M., Khaibullin R.I.: Magnetic anisotropy in rutile (TiO_2) heavily implanted with cobalt ions: FMR, VSM and TEM studies
- Kovycheva E.K., Tsiberkin K.B., Henner V.K.: Modelig the magnetic response of a functionalized carbon structures
- Falin M.L., Latypov V.A., Khaidukov N.M. : ESR of Yb^{3+} ion at cubic sites in $\text{Cs}_2\text{NaScF}_6$ crystals
- Likerv R.F., Yatsyk I.V., Popov D.V., Shustov A.V., Eremina R.M.: ^{59}Co centers in monoclinic $\text{Sc}_{228}\text{SiO}_5$ single crystal: CW EPR study
- Mamin G.V., Murzakhanov F.F., Gracheva I.N., Gafurov M.R., Soltamov V.A.: Electron nuclear double resonance of ^{14}N nuclei coupled to the VB-defect in hBN crystals
- Murzakhanov F.F., Mamin G.V., Shurtakova D.V., Sadovnikova M.A., Mokhov E.N., Kazarova O.P., Gafurov M.R.: Optical spin initialization of nitrogen vacancy centers in a ^{28}Si -enriched 6H-SiC crystal for quantum technologies
- Nikitina A.V., Bogachev Yu.V., Zubkov V.I., Solomnikova A.V., Suharzevskiy S.M.: Studies of stationary saturation of inhomogeneously broadened EPR lines of N-V centers in HPHT diamond
- Patrin G.S., Volchenko E.N., Shiyani Ya.G., Yakovchuk V.Yu., Churkin V.R.: Influence of the interface on magnetic resonance in films of the Fe-Bi system
- Patrin G.S., Shiyani Ya.G., Orlov V.A., Plekhanov V.G.: Long-range interlayer coupling in $[(\text{CoP})\text{hard}/(\text{NiP})\text{am}/(\text{CoP})\text{soft}]_n$ structures
- Patrin G.S., Vakhitova Ya.A., Shiyani Ya.G., Kobayakov A.V., Yushkov V.I.: Magnetic resonance studies of biquadratic interlayer coupling in CoNi/Si/FeNi films
- Podshivalov A.P., Bajtimirov, Konev S.F., Ivanov D.V., Slesarev G.P.: The influence of centrifugation on dosimetric properties of synthesized hydroxyapatite
- Demishev S.V., Popov A.V.: Combined equation of semiclassical spin dynamics and electron paramagnetic resonance

- Popov D.V., Batulin R.G., Yatsyk I.V., Maiti T., Eremina R.M.: Additional EPR line in Mn-containing double perovskites
- Romanova I.V., Stazharova S.V., Batulin R.G., Tagirov M.S., Yusupov R.V.: Synthesis and study of magnetic properties of $[\text{La}_{0.5}\text{Dy}_{0.5}]\text{ES}$ and $[\text{La}_{0.99}\text{Dy}_{0.01}]\text{ES}$ compounds
- Saenko N.S., Steblevskaya N.I., Belobeletskaya M.V., Ziatdinov A.M.: Modeling of magnetic resonance spectra of $\text{La}_{1-x}\text{K}_x\text{MnO}_3$
- Shakurov G.S., Lyadov N.M., Asatryan G.R., Petrosyan A.G., Hovhannesian K.L.: Anti-site defects and trigonal center of holmium in $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ho}^{3+}$ crystal according to the results of wideband EPR spectroscopy
- Shavelev A.A., Nizamutdinov A.S., Shakirov A.A., Korableva S.L., Zverev D.G., Rodionov A.A., Lukinova E.V., Semashko V.V.: Distribution of Ce^{3+} impurity centers in highly doped LiCaAlF_6 crystals
- Zhelezniakova D.E., Gimazov I.I., Pervakov K.S., Vlasenko V.A., Pudalov V.M., Talanov Y.I.: ESR in EuEn_2As_2 crystals close to magnetic ordering temperature

4. *Magnetic resonance in chemical and biological systems*

- Afanaseva A.N., Ivanov D.S., Skirda V.D.: Studying pore space of a core by nuclear magnetic resonance method
- Akhmetov M.M., Gumarov G.G., Zaripov R.B., Konygin G.N., Rybin D.S.: W-band EPR of radicals in calcium gluconate
- Andrianov V.V., Yafarova G.G., Bazan L.V., Bogodvid T.K., Arslanov A.I., Bakirov M.M., Shayakhmetov N.G., Yurtaeva S.V., Pashkevich S.G., Fillipovich T.A., Gainutdinov Kh.L.: Study by EPR spectroscopy of brain tissue samples in models with brain disorders
- Demekhin M.A., Timralieva A.A., Kokorin A.I., Skorb E.V.: DFT calculation as a tool to find c-centered radicals localization in supramolecular assemblies
- Gafarova A.R., Gumarov G.G., Zaripov R.B., Rybin D.S., Konygin G.N.: Calcium free radical formation at irradiation and mechanoactivation of calcium gluconate
- Galeev R.T., Zaripov R.B., Salikhov K.M.: Study of biradicals by the transient nutation method
- Ibragimova M.I., Chushnikov A.I., Yatsyk I.V., Khaibullina D.Kh., Gumarov G.G.: Identification of the signal with $g \sim 6.0$ in the X-band EPR spectra of human blood serum at 5–40 K
- Melnikova D.L., Nesmelova I.V., Skirda V.D.: Translational diffusion features of an intrinsically disordered protein
- Petrova A.A., Mamin G.V., Murzakhanov F.F., Fadeeva I.V., Forsyenkova A.A., Gafurov M.R. : EPR investigations of composite materials based on biocompatible polymers with calcium phosphates
- Sadovnikova M.A., Mamin G.V., Murzakhanov F.F., Goldberg M.A., Petrakova N.V., Komlev V.S., Gafurov M.R.: Study of hydroxyapatite doped with rare earth ions by various EPR spectroscopy techniques

- Shamsiyarova E.I., D.L. Melnikova, D.S. Ivanov, M.M. Doroginizky, Skirda V.D.: Determination of water content in crude oil by nuclear magnetic resonance: problems and possible solutions
- Sharipova A.R., Frolova E.N., Turanova O.A., Bazan L.V., Gubaidullin A.T., Turanov A.N.: Effect of counterion on magnetic properties of the new Fe(III) complexes with a N₂O tridentate ligand
- Sharipova A.R., Volkov M.Yu., Turanova O.A.: Study of trans/cis isomerization of molecules of two 2-hydroxy-5-phenylazobenzaldehyde derivatives by NMR and UV spectroscopy
- Slesareva Yu.V., Volkov M.Yu., Vavilova E.L., Astvatsaturov D.A., Chumakova N.A.: ¹H NMR analysis of acetonitrile intercalated into the interplane space of graphite oxide
- Tarasov A.S., Efimov S.V., Klochkov V.V.: Studying of paramagnetic affect of Dy³⁺ ion on the complex of cyclosporin C (CsC) and DPC micelle in aqueous solution determined by NMR spectroscopy
- Troshkina A.A., Blokhin D.S., Klochkov V.V.: Structure of the amyloidogenic peptide SEM2(49-107) by NMR spectroscopy
- Tsukhlova D.A., Melnikova D.L., Skirda V.D.: Features of nuclear magnetic relaxation in aqueous solutions of saccharides
- Uporova A.M., Deeva U.A., Chupakhina T.I., Eremina R.M., Yatsyk I.V.: Investigation of Mn valence state in Sr₂Ti_{1-x}Mn_xO₄ composition compounds by EPR method
- Vorobeva V.E., Starichenko D.V., Gruzdev M.S., Chervonova U.V., Yatsyk I.V.: Magnetic and EPR properties of the second generation dendrimeric Fe³⁺ complexes with fluorescent environment
- Reyes J.D., Yatsyk I.V., Eremina R.M., Batulin R.G., Maiti T.: Magnetic properties of perovskite type high entropy oxides
- Zaripova R.I., Yafarova G.G., Andrianov V.V., Sungatullina M.I., Ziyatdinova N.I., Gainutdinov Kh.L., Zefirov T.L.: Effect of motor activity restriction on copper content in rat liver

5. Spin-based information processing and optical quantum technologies

- Arifullin M.R., Berdinskiy V.L.: Implementation of quantum logic by phase shift pulses and high-spin ions
- Farrakhov B.F., Fattakhov Ya.V., Stepanov A.L., Batalov R.I., Bazarov V.V.: The silicon surface microstructures initiated by a powerful light pulse for increase the effectency of a solar cells

6. Applications of magnetic resonance in medical physics

- Bayazitov A.A., Fattakhov Ya.V., Odivanov V.L.: Development of a phase-adjusted radio-frequency solenoid sensor for medium-field magnetic resonance imaging system
- Islamov T.R., Aganova O.V., Julmetov A.R., Klochkov V.V.: Study of the interaction of lovastatin with a transition group metal – gadolinium in solution using NMR spectroscopy
- Kuzmin V.V., Dolgorukov G.A., Makarchenko A.S.: Home-built set-up for NMR/DNP in stray field of superconducting magnet
- Odivanov V.L., Fattakhov Ya.V., Fakhrutdinov A.R., Shagalov V.A., Bayazitov A.A.: Targeting interface for MR imaging
- Silantyeva D.I., Andrianov V.V., Yafarova G.G., Bazan L.V., Bogodvid T.K., Arslanov A.I., Deryabina I.B., Muranova L.N., Pashkevich S.G., Filipovich T.A., Kulchitsky V.A., Gainutdinov Kh.L.: Investigation of NO and copper content in different segments of spinal cord 24 hours and 7 days after combined brain and spinal cord injury in rat with using EPR spectroscopy
- Yurtaeva S.V., Yafarova G.G., Yatsyk I.V., Rodionov A.A., Gainutdinov Kh.L.: EMR signals in rat spinal cord 7 days after its traumatic injury

7. Mössbauer spectroscopy and its applications

- Abdullin A.F., Voronina E.V.: First principles calculations of magnetic order of Fe-Al based ternary alloys
- Chistyakova N.I., Pikhtereva V.A., Komleva D.I., Lesnaya M.V., Semeno A.V., Podosokorskaya O.A., Zavarzina D.G., Rusakov V.S.: Mössbauer study of the minerals formed during synthesized ferrihydrite reduction by representatives of the melioribacteraceae family
- Dulov E.N., Zaitov M.T.R.: Mössbauer spectroscopy based on fast streaming analog to digital convertors
- Frolov K.V., Smirnova E.S., Alekseeva O.A., Sidorova E.V., Gudim I.A.: Mössbauer spectroscopy of the rare earth ferrobates SmFe_{3-x}M_x(BO₃)₄ (M = Al, Sc)
- Frolov K.V., Anosova O.A., Kulikova M.V., Ivantsov M.I., Krylova A.Yu., Kuzmin A.E.: Mössbauer spectroscopy of Fe organic-derived composite fischer-tropsch catalysts obtained by the hydrothermal synthesis
- Kuzina D.M., Pyataev A.V., Gattacceca J., Sadaka C.: The weathering rate of Atacama meteorites studied by Mössbauer spectroscopy

Итоговая конференция КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН

Секция физическая

Устная сессия

5 февраля 2025 г.

Заседание 1. Председатель – д.ф.м.н., проф. Л. Р. Тагиров

1. Зарипов Р.Б., Кандрашкин Ю.Е.: Изучение свойств металлофуллерена с эрбием методом ЭПР.
2. Бакиров М.М., Зарипов Р.Б., Хайрутдинов И.Т., Салихов К.М.: Экспериментальное подтверждение новой парадигмы спинового обмена в разбавленных растворах парамагнитных частиц.
3. Ерёмина Р.М., Фазлижанов И.И., Шестаков А.В., Красилин А.А. (Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН), Бельская Н. (Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН), Батулин Р.Г. (КФУ): Особенности магнитного поведения $(\text{NiMg})_3\text{Si}_2\text{O}_5$.
4. Колесникова В.И. (КФУ), Шакуров Г.С. (КФТИ), Морозов О.А. (КФТИ, КФУ), Кораблева С.Л. (КФУ), Шишкин А.Д. (КФТИ, КФУ), Семашко В.В. (КФТИ): О возможности визуализации терагерцового излучения с использованием люминесцентных нанотермометров.

Заседание 2. Председатель – д.ф.м.н. Ю. И. Таланов

1. Салихов К.М.: Новый подход к получению бозе-эйнштейновского конденсата.
2. Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Нургазизов Н.И., Чукланов А.П.: Влияние термоиндуцированного магнитоупругого эффекта на поле переключения микрочастиц с конфигурационной анизотропией.
3. Бегишев Е.М., Базаров В.В., Валеев В.Ф., Жарков Д.К., Лядов Н.М., Нуждин В.И., Шмелёв А.Г., Хайбуллин Р.И.: Оптическая спектроскопия кислородных вакансий в рутиле (TiO_2), облучённом ионами аргона.

Заседание 3. Председатель – д.ф.м.н. Е. Л. Вавилова

1. Суханов А.А., Воронкова В.К., Jianzhang J. (Даляньский технологический университет, Китай): Фотофизические и фотохимические свойства термически активируемой задержанной флуоресценция на основе эффекта множественного резонанса.
2. Гимазов И.И., Железнякова Д.Е., Таланов Ю.И.: Спиновые корреляции и проводимость пниктидов железа легированных кобальтом.
3. Хайбуллин Р.И., Базаров В.В., Бегишев Е.М., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Лядов Н.М., Суханов А.А., Файзрахманов И.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Вахитов И.Р., Гумаров А.И., Зиннатуллин А.Л., Киямов А.Г. (Институт физики КФУ): Микроструктура и необычное

ферромагнитное поведение эпитаксиальных плёнок SnO_2 с имплантированной примесью кобальта.

4. Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Баязитов А.Р.: Многофункциональная импульсная программа для получения изображений на специализированном магнитно-резонансном томографе с индукцией поля 0.4 Тл.

Заседание 4. Председатель – к.ф.м.н. С. М. Хантимеров

1. Зарипов Р.Б., Галеев Р.Т., Салихов К.М.: Некоторые особенности нутации в бирадикалах.
2. Новиков Г.А., Баталов Р.И., Файзрахманов И.А., Шустов В.А. (КФТИ), Симакин С.Г. (ЯФ ФТИ РАН, Ярославль), Галкин К.Н. (ИАПУ ДВО РАН, Владивосток), Байдакова Н.А. (ИФМ РАН, Н. Новгород): Оптоэлектронные свойства сильно легированных слоёв Ge:Sb , полученных ионно-пучковыми методами.
3. Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Одиванов В.Л., Баязитов А.А., Коновалов Д.А.: Разработка и создание оборудования и методик, и проведения экспериментов по магнитно-резонансной томографии лёгких лабораторных животных с применением гиперполяризованного ксенона.

Стендовая сессия

12 февраля 2025 г.

1. Нургазизов Н.И., Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Чукланов А.П.: Изменение доменной структуры планарной Ni микрочастицы в зависимости от действующего на неё одноосного механического напряжения и её размеров.
2. Чукланов А.П., Никулина В.В. (КФУ), Митюшкин Е.О., Никифоров В.Г., Нургазизов Н.И.: Использование методов сканирующей зондовой микроскопии для изолирования и прецизионного перемещения апконверсионных люминесцентных наночастиц на поверхности оптически прозрачных подложек.
3. Кудрявцева Е.О., Морозова А.С., Зиганшина С.А., Зиганшин М.А. (КФУ), Бухараев А.А.: Самосборка дипептида аланил-фенилаланин под действием электрического поля.
4. Воронкова В.К., Мамбетов А., Суханов А., Zhao J. (Даляньский технологический университет, Китай): Особенности динамики электронных спинов фотоиндуцированных триплетных состояний новых хромофоров и донорно-акцепторных диад.
5. Андрианов В.В., Базан Л.В., Гайнутдинов Х.Л.: Оценка способности 11Н-индено[1,2-b]хиноксалин-11-он оксима (IQ-1) отдавать оксид азота методом спектроскопии электронного парамагнитного резонанса.
6. Хайрутдинов И.Т.: Моделирование сигналов от последовательности КППМГ с гауссовскими импульсами с применением фазового циклирования.

7. Яцык И.В., Ерёмина Р.М. (КФТИ), Батулин Р.Г. (КФУ), Маити Т.: (Индийский технологический институт, Канпур) Магнитные свойства перовскита $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ca}_{0.2}\text{La}_{0.2}\text{Na}_{0.2}\text{CoO}_3$.
8. Мамедов Д.В., Деева Ю.А., Бажал В.В., Чупахина Т.И., Черосов М.А., Батулин Р.Г., Гаврилова Т.П.: Влияние термической и термобарической обработки на магнитные свойства слоистого перовскита $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4\pm\delta}$.
9. Фазлижанов И.И.: Особенности фазового перехода в LaSrFeO_4 .
10. Попов Д.В., Ерёмина Р.М., Шустов В.А., Батулин Р.Г., Черосов М.А., Мошкина Е.М.: Магнитные свойства $\text{Mn}_{0.75}\text{Co}_{0.25}\text{VO}_5$.
11. Шакуров Г.С.: ЭПР ионов Fe^{2+} в кристалле CsCdBr_3 .
12. Ликеров Р.Ф., Яцык И.В., Попов Д.В., Ерёмина Р.М., Шустов В.А.: Примесные центры кобальта в монокристалле Sc_2SiO_5 .
13. Юртаева С.В., Яцык И.В., Фахрутдинов А.Р., Валиева А.И., Акулов А.Н., Румянцев Н.И.: Сигналы магнитного резонанса, возникающие при интенсивном делении растительных клеток *Fagopyrum Tataricum* и их ориентационное поведение.
14. Батуева Е.Е., Шарипова А.Р., Фролова Е.Н., Туранова О.А., Савостина Л.И., Зарипов Р.Б., Туранов А.Н.: Новые Fe(III) -комплексы NNO тридентата β -энамина в растворах: ЭПР-исследования и молекулярный докинг.
15. Батуева Е.Е., Шарипова А.Р., Фролова Е.Н., Суханов А.А., Туранова О.А., Туранов А.Н.: Гептаядерный комплекс Fe(II)-Fe(III) как многофункциональный магнитный материал.
16. Ахметов М.М., Зарипов Р.Б., Гумаров Г.Г.: Исследование структуры радикалов в механо-активированном глюконате кальция.
17. Гафарова А.Р., Зарипов Р.Б., Гумаров Г.Г.: ЭПР исследование механоактивированного глюконата кальция облучённого гамма квантами.
18. Чушников А.И., Ибрагимова М.И., Яцык И.В., Хайбуллина Д.Х., Гумаров Г.Г.: Особенности спектров ЭПР от трансферрина у больных с дисплазией соединительной ткани.
19. Куковицкий Е.Ф., Львов С.Г., Шустов В.А., Файзрахманов И.А.: Синтез поверхностных углеродных структур методом CVD.
20. Баталов Р.И., Валеев В.Ф., Нуждин В.И. (КФТИ), Подлесных И.М. (ФИАН, Москва): Гиперлегирование монокристаллов Si и Ge примесью серы методами ионной имплантации и лазерного отжига.
22. Степанов А.Л., Коновалов Д.А., Рогов А.М., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Хантимеров С.М., Гаврилова Т.П.: Лазерный отжиг слоёв нанопористого германия, сформированных имплантацией ионами металлов.
23. Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Одиванов В.Л., Баязитов А.А., Коновалов Д.А.: Разработка и создание оборудования и методик, и проведения экспериментов по магнитно-резонансной томографии лёгких лабораторных животных с применением гиперполяризованного ксенона.
24. Шагалов В.А., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Одиванов В.Л., Баязитов А.А.: Приёмник для ЯМР-томографа.
25. Перминов Н.С., Моисеев С.А.: Методы оптимизации для совмещения систем квантовой памяти на оптических резонаторах.
26. Шкаликов А.В., Шиндяев О.П.: Датчики температуры и вибрации на вытянутых волокнах.
27. Дудалов А.С., Калачёв А.А.: Предвещаемые однофотонные кубиты из фотонных молекул.
28. Шахмуратов Р.Н.: Использование эффекта Тальбота для генерации импульсов лазерного излучения и мультиплексирования их частоты повторения.
29. Янилкин И.В., Гумаров А.И. (КФУ), Головчанский И.А. (МФТИ), Киямов А.Г., Габбасов Б.Ф., Юсупов Р.В. (КФУ), Тагиров Л.Р.: Молекулярно-лучевая эпитаксия градиентных магнитных плёнок Pd-Fe для управления стоячими спиновыми волнами.
30. Шегеда А.М. (КФТИ), Кораблева С.Л. (КФУ), Морозов О.А. (КФТИ): Бабочка и усиление фотонного эха в $\text{Y(Lu)LiF}_4: \text{Er}^{3+}$ в импульсных магнитных полях.
31. Гатауллина Р.М. (КФТИ), Солодов А.Н. (КФУ), Никифоров В.Г. (КФТИ), Амиров Р.Р. (КФУ), Шмелёв А.Г., Жарков Д.К., Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А.: (КФТИ) Влияние оксида графена на механические свойства эпоксидных нанокомпозитов.
32. Митюшкин Е.О., Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Шмелёв А.Г., Жарков Д.К., Нургазизов Н.И., Чукланов А.П., Никифоров В.Г.: Синтез и температурная калибровка одиночных сенсоров $\text{NaYF}_4: \text{Yb}, \text{Er}$.
33. Турайханов Д.А., Латыпов И.З., Шафеев Н.М., Степаненко К.С., Шкаликов А.В., Калачёв А.А.: Высокоэффективная генерация одномодовых узкополосных бифотонных полей.
34. Аглямев Р.Д., Наумов А.К., Семашко В.В.: Оценка перспективности кристалла NYF:Nd^{3+} в качестве активной среды лазера с диодной накачкой.
35. Латыпов И.З. (КФТИ), Чистяков В.В., Фадеев М.А., Сулимов Д.В. (ИТМО), Халтуринский А.К. (СМАРТС-Кванттелеком), Кынев С.М., Егоров В.И. (ИТМО): Гибридный протокол для атмосферной и волоконной системы квантового распределения ключа.
36. Лядов Н.М., Вахитов И.Р., Гумаров А.И., Файзрахманов И.А., Хайбуллин Р.И.: Микроструктура тонких плёнок железа с перпендикулярной магнитной анизотропией.
37. Бегишев Е.М., Базаров В.В., Вахитов И.Р., Лядов Н.М., Нуждин В.И., Суханов А.А., Хайбуллин Р.И. (КФТИ), Самошкина Ю.Э., Петров Д.А. (Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ РАН): Микроструктура, магнитооптика и ферромагнетизм рутила (TiO_2), имплантированного ионами кобальта при повышенной температуре подложки.
38. Базаров В.В., Бегишев Е.М., Валеев В.Ф., Лядов Н.М., Нуждин В.И., Хайбуллин Р.И. (КФТИ), Вахитов И.Р., Гумаров А.И., Зиннатуллин А.Л., Киямов

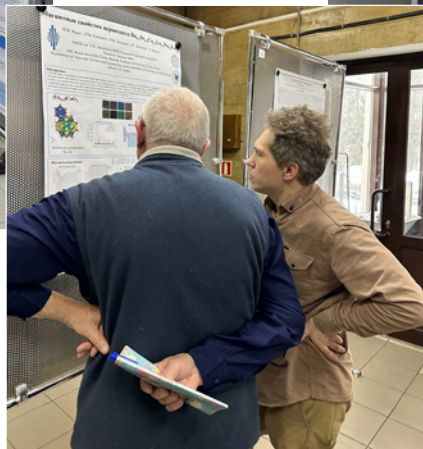
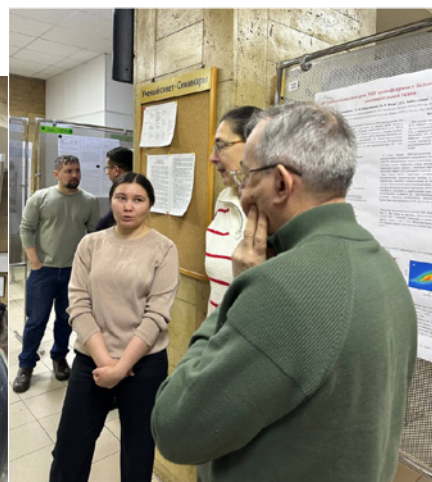
А.Г. (КФУ): Высокотемпературный ферромагнетизм в эпитаксиальной плёнке TiO_2 , имплантированной примесью кобальта при повышенной температуре.

39. Камашев А.А., Гарифьянов Н.Н., Валидов А.А., Катаев В.Е. (КФТИ), Фоминов Я.В., Осин А.С. (Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, Черноголовка), Гарифуллин И.А. (КФТИ): Эффект сверхпроводящего спинового клапана в структурах конструкции Ф1/С/Ф2 с модифицированными интерфейсами Ф1/С и С/Ф2.
40. Горюнов Ю.В.: Исследование ЭСР на Mn^{2+} в Cd_3P_2 для тюнинга топологического состояния 3D диракковского полуметалла Cd_3As_2 .
41. Гимазов И.И., Железнякова Д.Е., Таланов Ю.И.: Спиновые корреляции и проводимость пниктидов железа легированных кобальтом.

42. Сахин В.О., Куковицкий Е.Ф., Камашев А.А., Гарифьянов Н.Н., Таланов Ю.И.: Исследование транспортных свойств тонкой сверхпроводящей плёнки Рб на топологическом изоляторе $\text{Bi}_{1.08}\text{Sn}_{0.02}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$.
43. Эндерова Т.Н., Гимазов И.И., Сахин В.О., Таланов Ю.И., Куковицкий Е.Ф.: Особенности транспортных свойств $\text{Bi}_{1.06}\text{Sn}_{0.04}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$.
44. Гумарова И.И., Мамин Р.Ф.: Изучение магнитоэлектрического эффекта в гетероструктурах сегнетоэлектрик/ферромагнетик.
45. Шапошникова Т.С., Мамин Р.Ф.: Магнитоэлектрические свойства малых ферромагнитных частиц.
46. Ахмеров Р.Ф., Гумарова И.И., Мамин Р.Ф.: Генерация потенциала межатомного взаимодействия для наночастиц методами машинного обучения на примере наночастиц золота.
47. Вавилова Е.Л.: Коррелированные режимы с медленной спиновой динамикой в сложных оксидах: $\text{LiMn}_2\text{TeO}_6$.



Стендовая сессия
Итоговой конференции КФТИ.



Участие сотрудников в конференциях

Международные конференции и конференции с международным участием

IV Международная научно-практическая конференция, посвящённая памяти академика РАН К. А. Валиева, КПФУ, Елабужский институт (филиал), Елабуга, 19–20 января 2024 г.

Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Одиванов В.Л., Баязитов А.А.: Разработка и изготовление медицинских магнитно-резонансных томографов в Казанском научном центре РАН. Идея академика К. А. Валиева (пленарный)

XXVIII Международный симпозиум “Нанозлектроника”, Нижний Новгород, 11–15 марта 2024 г.

Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Морозова А.С., Нургазизов Н.И., Чукланов А.П.: Использование монокристаллических подложек и термоиндуцированного магнитоупругого эффекта для снижения поля переключения Ni-микрочастиц (стенд.)

Бизяев Д.А., Хайретдинова Д.Р., Загорский Д.Л., Долуденко И.М.: Зондовая микроскопия в исследовании магнитных нанопроволок (стенд.)

Бизяев Д.А., Чукланов А.П., Бухараев А.А., Нургазизов Н.И., Кудрявцева Е.О.: Магнитоупругий эффект в субмикронных частицах Ni, сформированных на поверхности кристалла трибората лития (устн.)

Гимазов И.И., Таланов Ю.И.: Влияние магнитных флуктуаций на транспортные свойства пниктидов железа (устн.)

Данилов Ю.А., Быков В.А., Вихрова О.В., Здоровейщев Д.А., Калентьева И.Л., Крюков Р.Н., Парафин А.Е., Агафонов Ю.А., Зиненко В.И., Баталов Р.И., Валеев В.Ф., Нуждин В.И.: Гальваномагнитные свойства слоёв GaMnAs, полученных ионной имплантацией: роль энергии ионов Mn⁺ (устн.)

Железнякова Д.Е., Гимазов И.И., Зарипов Р.Б., Перваков К.С., Пудалов В.М., Таланов Ю.И.: Критическое поведение магнитной системы EuFe₂As₂ вблизи температуры упорядочения (стенд.)

Кудрявцева Е.О., Морозова А.С., Зиганшина С.А., Бухараев А.А., Зиганшин М.А.: Самосборка короткоцепных олигопептидов на основе аланина и фенилаланина по данным СЗМ (стенд.)

Лобаев М.А., Радищев Д.Б., Вихарев А.Л., Горбачёв А.М., Богданов С.А., Исаев В.А., Краёв С.А., Охапкин А.И., Архипова Е.А., Демидов В.Е., Дроздов М.Н., Хайбуллин Р.И.: Электролюминесценция GeV центров в алмазном p-i-n диоде (устн.)

Морозова А.С., Кудрявцева Е.О., Зиганшина С.А., Бухараев А.А., Зиганшин М.А.: Получение аморфных плёнок

дипептидов L-фенилаланил-L-лейцин и L-лейцил-L-фенилаланин и их самосборка по данным сканирующей зондовой микроскопии (стенд.)

Нургазизов Н.И., Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Чукланов А.П.: Зависимость изменения доменной структуры планарной Ni микрочастицы от её латеральных размеров и действия одноосных механических напряжений (стенд.)

Чукланов А.П., Морозова А.С., Нургазизов Н.И., Митюшкин Е.О., Никифоров В.Г.: Изолирование одиночных апконверсионных люминесцентных наночастиц на поверхности путём прецизионного микроманипулирования в сканирующем зондовом микроскопе (устн.)

Эндерова Т.Н., Сахин В.О., Зарипов Р.Б., Куковицкий Е.Ф., Таланов Ю.И.: Исследование магнетосопротивления и микроволнового поглощения трёхмерного топологического изолятора Bi_{1.1-x}Sn_xSb_{0.9}Te₂S (стенд.)

Международная школа-конференция “Магнитный резонанс и его приложения. СПИНУС-24”, Санкт-Петербург, 1–5 апреля 2024 г.

Салихов К.М.: Эффект обменного сужения спектров электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) разбавленных растворов радикалов создаёт условия для формирования Бозе-Эйнштейновского конденсата (БЭК) (устн.)

9th International Conference on Superconductivity and Magnetism, 2nd International Conference on Quantum Materials and Technologies, Fethiye-Oludeniz, Turkey, April 27 – May 4, 2024

Ерёмина Р.М., Попов Д.В., Батулин Р.Г., Черосов М.А., Яцык И.В., Чупахина Т.И., Деева Ю.А.: Магнитные свойства двойного перовскита Ba₂CoNbO₆ (стенд.)

Ерёмина Р.М., Батулин Р.Г., Шустов В.А., Мошкина Е.М., Фазлижанов И.И.: Magnetic ordering in (Ni,Mn,Cu)₃BO₅ (стенд.)

Всероссийская конференция с международным участием “Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах”, Уфа, 21–24 мая 2024 г.

Ерёмина Р.М., Попов Д.В., Яцык И.В., Фазлижанова Д.И., Батулин Р.Г.: Ионы Co³⁺ со спином S = 1 в магнитных и проводящих свойствах Ba₂CoNbO₆ (пленарный)

Рейес Х.Д., Яцык И.В., Ерёмина Р.М., Маити Т.: Исследование высокоэнтропийных оксидов перовскитного типа Ba_{0.2}Sr_{0.2}Ca_{0.2}La_{0.2}Na_{0.2}CoO₃ методом электронного спинового резонанса (стенд.)

Салихов К.М.: Парадигма спиновой химии. Современное состояние теории спиновой химии (устн.)

International Workshop on Mathematical Problems in Quantum Information Technologies, Dubna, Russia, May 27–28, 2024

Аблаев М.Ф., Аблаев Ф.М., Калачёв А.А.: Quantum fingerprinting and hashing for information transfer and database searching

20-й Международный междисциплинарный конгресс “Нейронаука для медицины и психологии”, Судак, 30 мая – 10 июня 2024 г.

Гайнутдинов Х.Л., Кульчицкий В.А., Андрианов В.В., Яфарова Г.Г., Базан Л.В., Богодвид Т.Х., Дерябина И.Б., Муранова Л.Н., Силантьева Д.И., Арсланов А.И., Нагибов А.В., Филипович Т.А., Иванова Е.С., Тарасова Е.В.: Исследование методом ЭПР содержания оксида азота и меди в травмированной и нетравмированной областях мозга крыс после сочетанной травмы головного и спинного мозга (стенд.)

V Казанский международный конгресс евразийской интеграции-2024, Казань, 13–15 июня 2024 г.

Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Одинов В.Л., Баязитов А.А.: Разработка оборудования и методик контроля и неинвазивной визуализации в решении задач ускоренной селекции и органического сельского хозяйства (устн.)

Международная конференция “Наноуглерод и Алмаз”, Санкт-Петербург, 1–5 июля 2024 г.

Гарипов Р.Р., Львов С.Г., Хантимеров С.М., Коновалов Д.А., Сулейманов Н.М.: Влияние внешних электрических полей на процессы формирования перколяционной структуры в композиционных материалах
Хантимеров С.М., Бизяев Д.А., Гарипов Р.Р., Сулейманов Н.М.: Визуализация распределения углеродных нанотрубок в полимерных средах электрическими методами атомно-силовой микроскопии (стенд.)

International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg, Russia, July 1–5, 2024

Ginkel A.K., Rakhmatullin R.M., Morozov O.A., Korableva S.L., Semashko V.V., Pudovkin M.S.: Optical study of Er and Nd/Yb-doped CeO and CeO/CeF nanoparticles
Minnebaev T.M., Nizamutdinov A.S., Shavelev A.A., Semashko V.V.: Spectral-kinetic characteristics and sensitized luminescence of LiYLuF mixed crystals with Tm and Ho ions
Podlesnykh I.M., Kovalev M.S., Batalov R.I.: Pulsed laser annealing of sulfur hyperdoped silicon prepared by ion implantation (poster)
Shavelev A.A., Nizamutdinov A.S., Shakirov A.A., Lukinova E.V., Semashko V.V.: Spectroscopy investigation of highly doped LiCaAlF:Ce³⁺ crystals

XXV Международная конференция “Новое в магнетизме и магнитных материалах” (НМММ), Москва, 1–6 июля 2024 г.

Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Нургазизов Н.И., Чукланов А.П.: Влияние термоиндуцированного магнитоупругого эффекта на поле переключения микрочастиц, имеющих конфигурационную анизотропию (устн.)
Мамедов Д.В., Макаренченко А.С., Ерёмина Р.М., Фазлижанов И.И., Маити Т.: Транспортные и магнитные свойства Ba_xSr_{2-x}FeCoO₆ (устн.)
Муфтахутдинов А.Р., Макаренченко А.С., Ерёмина Р.М., Фазлижанов И.И., Мошкина Е.М.: Транспортные и магнитные свойства Mn_{0.75}Co_{2.25}BO₅ (устн.)
Яцык И.В., Ерёмина Р.М., Мошкина Е.М., Попов Д.В., Шестаков А.В.: Спин-волновой резонанс в монокристалле железо-галлиевого оксида (устн.)

XX Международная научно-практическая конференция “Новые полимерные композиционные материалы”, Микитаевские чтения, Нальчик, Россия, 4–10 июля 2024 г.

Гатауллина Р.М., Солодов А.Н., Амиров Р.Р., Никифоров В.Г., Жарков Д.К., Шмелёв А.Г.: Износостойкие функционально-градиентные эпоксидные нанокompозиты на основе оксида графена, модифицированные люминесцентными и магнитными наночастицами (устн.)

International Conference “Defects in Insulating Materials” (ICDIM-2024), Astana, Kazakhstan, August 19–23, 2024

Begishev E.M., Bazarov V.V., Gumarov A.I., Lyadov N.M., Vakhitov I.R., Sukhanov A.A., Shustov V.A., Faizrahmanov I.A., Zinnatullin A.L., Khaibullin R.I.: Ferromagnetism induced in SnO₂ films by Co ions implantations (oral)
Begishev E.M., Bazarov V.V., Shmelev A.G., Zharkov D.K., Valeev V.F., Khaibullin R.I.: Photoluminescence of oxygen defects in Ar-ions irradiated rutile (TiO₂) (poster)

Second International Conference “Materials Science and Nanotechnology” (MSN-2024), Ekaterinburg, Russia, August 27–30, 2024

Mamin R.F., Shaposhnikova T.S.: Magnetoelectric properties of small particles with inhomogeneous magnetization (invited)

22th International Conference “Foundations & Advances in Nonlinear Science” and 7th International Symposium “Advances in Nonlinear Photonics”, Minsk, Belarus, September 3–27, 2024

Leontyev A.V., Gataullina R.M., Solodov A.N., Nurtdinova L.A., Shmelev A.G., Zharkov D.K., Nikiforov V.G.: Multifunctional up- and downconverting fluorescent NaYF₄:Yb/Tm@NaGdF₄:Ce/Tb nanoparticles (oral)
Mityushkin E.O., Shmelev A.G., Leontyev A.V., Nurtdinova L.A., Zharkov D.K., Nikiforov V.G.: Multimodal temperature sensors based on Er³⁺/Tm³⁺/Yb³⁺ co-doped NaYF₄ microcrystals operating in the first window of biological transparency (oral)

Nikiforov V.G., Leontyev A.V., Nurtdinova L.A., Mityushkin E.O., Shmelev A.G., Zharkov D.K., Chuklanov A.P., Nurgazizov N.I.: Testing single micro-particles as individual luminescent upconversion probes (oral)

Nurtdinova L.A., Leontyev A.V., Shmelev A.G., Zharkov D.K., Gataullina R.M., Mityushkin E.O., Solodov A.N., Zairov R.R., Mustafina A.R., Andrianov V.V., Muranova L.N., Gainutdinov Kh.L., Chuklanov A.P., Nurgazizov N.I., Nikiforov V.G.: Visualization and probing the surface of isolated nervous system of grape snail using luminescent nanoparticles (oral)

Международный форум “Kazan Digital Week-2024”, Казань, 9–11 сентября 2024 г.

Фаттахова М.Я., Хабилов Р.Ш., Баязитов А.А., Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В.: Создание цифрового портрета голоса вокалиста (устн.)

ХОЛОЭКСПО 2024: XXI Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям, Казань, Россия, 9–13 сентября 2024 г.

Павлычева Н.К., Белокопытов А.А., Знаменский М.Ю., Иванов В.П., Лукин А.В., Макаева Р.Х., Мельников А.Н., Муслимов Э.Р., Саттаров Ф.А., Скочилов А.Ф., Файзрахманов И.А., Харинцев С.С.: Казанская школа дифракционной оптики (приглашённый)

XV Международная конференция “Новые информационные технологии в исследовании сложных структур” (ICAM 2024), Томск, Россия, 16–20 сентября 2024 г.

Vasil'ev A.V.: Dense quantum hashing

Степаненко К.А., Шорина О.А.: Система квантового программирования QSimulator

Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием “Учение академика И. П. Павлова в современной системе нейронаук”, Санкт-Петербург, 18–20 сентября 2024 г.

Андрюханов В.В., Яфарова Г.Г., Базан Л.В., Богодвид Т.Х., Июдин В.С., Нагибов А.В., Пашкевич С.Г., Филиппович Т.А., Гайнутдинов Х.Л.: Эффекты мезенхимальных стволовых клеток на содержание оксида азота в гиппокампе и обонятельных луковицах крыс при кратковременной ишемии головного мозга

Гайнутдинов Х.Л., Андрюханов В.В., Яфарова Г.Г., Базан Л.В., Богодвид Т.Х., Арсланов А.И., Дерябина И.Б., Жаркова Т.С., Муранова Л.Н., Силантьева Д.И., Чумарина А.И., Пашкевич С.Г., Фёдорова Е.В., Филиппович Т.А., Кульчицкий В.А.: Исследование методом ЭПР спектроскопии влияния сочетанной травмы головного и спинного мозга и введения мезенхимальных стволовых клеток на содержание оксида азота и меди в травмированной и нетравмированной областях мозга крыс (стенд.)

International Conference “Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives” (EPR-80), Kazan, Russia, September 23–27, 2024

Akhmetov M.M., Gumarov G.G., Zaripov R.B., Konygin G.N., Rybin D.S.: W-band EPR of radicals in calcium gluconate (poster)

Andrianov V.V., Yafarova G.G., Bazan L.V., Bogodvid T.K., Arslanov A.I., Bakirov M.M., Shayakhmetov N.G., Yurtaeva S.V., Pashkevich S.G., Fillipovich T.A., Gainutdinov Kh.L.: Study by EPR spectroscopy of brain tissue samples in models with brain disorders (poster)

Bakirov M.M., Khairutdinov I.T., Zaripov R.B., Salikhov K.M.: The dipole-dipole interaction contribution to EPR spectra of nitroxyl free radical solution (poster)

Batueva E.E., Sharipova A.R., Frolova E.N., Sukhanov A.A., Turanova O.A., Turanov A.N.: Heptanuclear Fe(II)–Fe(III) complex as a multifunctional magnetic material (poster)

Batueva E.E., Sharipova A.R., Frolova E.N., Turanova O.A., Savostina L.I., Zaripov R.B., Turanov A.N.: New Fe(III) complexes of NNO tridentate β -enaminone in solutions: EPR research and molecular docking (poster)

Bayazitov A.A., Fattakhov Ya.V., Odivanov V.L.: Development of a phase-adjusted radio-frequency solenoid sensor for medium-field magnetic resonance imaging system (poster)

Bukharaev A.A.: Influence of the thermally induced magnetoelastic effect on magnetization switching in Ni microparticles with configuration anisotropy (invited)

Demishev S.V., Shestakov A.V., Yatsyk I.V., Eremina R.M., Semeno A.V., Grigoriev S.V.: Study of low-temperature spin fluctuation transition in the conical phase of MnSi and anisotropy features (poster)

Eremina R.M.: Study of peculiarities of Co^{2+} and Co^{3+} EPR spectra in different spin states (oral)

Falin M.L., Latypov V.A., Khaidukov N.M.: ESR of Yb^{3+} ion at cubic sites in $\text{Cs}_2\text{NaScF}_6$ crystals (poster)

Farrakhov B.F., Fattakhov Ya.V., Stepanov A.L., Batalov R.I., Bazarov V.V.: The silicon surface microstructures initiated by a powerful light pulse for increase the effectivity of a solar cells (poster)

Fattakhova M.Ya.: Recovery of teacher's voice function after chronic diseases using spectral voice analysis and MRI (oral)

Gafarova A.R., Gumarov G.G., Zaripov R.B., Rybin D.S., Konygin G.N.: Calcium free radical formation at irradiation and mechanoactivation of calcium gluconate (poster)

Gainutdinov Kh.L.: Investigation of NO and copper content in injured and non-injured areas of the rats brain by EPR spectroscopy 24 hours and 7 days after combined brain and spinal cord injury (oral)

Galeev R.T., Zaripov R.B., Salikhov K.M.: Study of biradicals by the transient nutation method (poster)

Gavrilova T.P., Yagfarova A.R., Gyrdasova O.I., Yatsyk I.V.: Sorption-oxidation mechanism for the removal of Arsenic (III) using Cu-doped ZnO (poster)

- Gimazov I.I., Zhelezniakova D.E., Talanov Yu.I.: Impact of spin correlations on resistivity and microwave absorption of iron pnictides doped with cobalt (poster)
- Goryunov Yu.V.: The Mn^{2+} EPR study of Cd_3P_2 for the topological tuning with 3D Dirac semimetal Cd_3As_2 (poster)
- Ibragimova M.I., Chushnikov A.I., Yatsyk I.V., Khaibullina D.Kh., Gumarov G.G.: Identification of the signal with $g \sim 6.0$ in the X-band EPR spectra of human blood serum at 5–40 K (poster)
- Kalachev A.A.: Recent progress towards a quantum repeater (oral)
- Kandrashkin Yu.E.: On some properties of the ion spin system in pulsed EPR experiments (oral)
- Karataş Ö., Okay C., Özkal B., Kazan S., Rameev B.Z., Cherkashin N., Begishev E.M., Khaibullin R.I.: Magnetic anisotropy in rutile (TiO_2) heavily implanted with cobalt ions: FMR, VSM and TEM studies (poster)
- Khairutdinov I.T., Zaripov R.B., Bakirov M.M., Volkov M.Yu.: Simulation of CPMG sequence echo signals with Gaussian pulse shape (poster)
- Leontyev A.V.: Core-shell $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}@\text{NaGdF}_4:\text{Ce}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ nanoparticles for dual-mode fluorescence-based temperature sensing and anti-counterfeiting (oral)
- Likerov R.F., Yatsyk I.V., Popov D.V., Shustov A.V., Eremina R.M.: ^{59}Co centers in monoclinic $\text{Sc}^{228}\text{SiO}_5$ single crystal: CW EPR study (poster)
- Odivanov V.L., Fattakhov Ya.V., Fakhutdinov A.R., Shagalov V.A., Bayazitov A.A.: Targeting interface for MR imaging (poster)
- Popov D.V., Batulin R.G., Yatsyk I.V., Maiti T., Eremina R.M.: Additional EPR line in Mn-containing double perovskites (poster)
- Pulotov Zh.K., Kadikova A.K., Gabbasov B.F., Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Kiiamov A.G., Tagirov L.R., Yusupov R.V.: Magneto-resonant properties and spin-Hall effects in epitaxial $\text{Pd}(1-x)\text{Fe}(x)$ and $\text{Pd}(1-x)\text{Fe}(x)/\text{Pt}$ structures (poster)
- Reyes J.D., Yatsyk I.V., Eremina R.M., Batulin R.G., Maiti T.: Magnetic properties of perovskite type high entropy oxides (poster)
- Sakhin V.O., Kukovitsky E.F., Gimazov I.I., Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Talanov Yu.I.: Magnetotransport investigation of $\text{Pb}/\text{Bi}_{1.08}\text{Sn}_{0.02}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$ heterostructures (poster)
- Salikhov K.M.: Current state of spin exchange theory. New spin exchange paradigm (plenary)
- Shakurov G.S., Lyadov N.M., Asatryan G.R., Petrosyan A.G., Hovhannesian K.L.: Anti-site defects and trigonal center of holmium in $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ho}^{3+}$ crystal according to the results of wideband EPR spectroscopy (poster)
- Sharipova A.R., Frolova E.N., Turanova O.A., Bazan L.V., Gubaidullin A.T., Turanov A.N.: Effect of counterion on magnetic properties of the new Fe(III) complexes with a N_2O tridentate ligand (poster)
- Sharipova A.R., Volkov M.Yu., Turanova O.A.: Study of trans/cis isomerization of molecules of two 2-hydroxy-5-phenylazobenzaldehyde derivatives by NMR and UV spectroscopy (poster)
- Shestakov A.V., Fazlizhanov I.I., Eremina R.M., Demishev S.V., Rodionova V.V., Kolesnikova V.G.: High temperature ESR absorption of $\text{Fe}_{45}\text{Co}_{30}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ microwire (poster)
- Shestakov A.V., Seidov Z.Y., Yatsyk I.V., Ovchinnikov A.S., Vagizov F.G., Shustov V.A., Badelin A.G., Karpasyuk V.K., Krug von Nidda H.-A., Eremina R.M.: Observation of a Griffiths phase and analysis of the critical exponents in the magnetic behavior of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.9}\text{Fe}_{0.1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$ ($x = 0.05, 0.075, 0.1$) (poster)
- Silantyeva D.I., Andrianov V.V., Yafarova G.G., Bazan L.V., Bogodvid T.K., Arslanov A.I., Deryabina I.B., Muranova L.N., Pashkevich S.G., Filipovich T.A., Kulchitsky V.A., Gainutdinov Kh.L.: Investigation of NO and copper content in different segments of spinal cord 24 hours and 7 days after combined brain and spinal cord injury in rat with using EPR spectroscopy (poster)
- Slesareva Yu.V., Volkov M.Yu., Vavilova E.L., Astvatsaturov D.A., Chumakova N.A.: ^1H NMR analysis of acetonitrile intercalated into the interplane space of graphite oxide (poster)
- Starichenko D.V., Vorobeva V.E., Gruzdev M.S., Chervonova U.V., Volegov A.S., Yatsyk I.V.: Comprehensive study of magneto-resonance properties of dendrimer metal complexes of polydentate N₂O-ligands using the example of a new Fe^{3+} β -diketonate (poster)
- Sukhanov A.A., Bazarov V.V., Valeev V.F., Nuzhdin V.I., Khaibullin R.I.: Ferromagnetic resonance in Co-ions implanted SnO_2 films: Effects of oxygen vacancies (poster)
- Sukhanov A.A.: Features of photo-excited charge separation states in TADF molecules (invited)
- Tarasov V.F.: Unusual EPR spectra of Cr^{2+} dimer associates in BaF_2 single crystal (oral)
- Ulanov V.A.: Mutual dependences of dynamical properties of Mn^{2+} and Gd^{3+} impurity centers in $\text{Pb}_{1-x-y-z}\text{Cu}_x\text{Mn}_y\text{Gd}_z\text{S}$ narrow-band semiconductor: results of EPR study (oral)
- Uporova A.M., Deeva U.A., Chupakhina T.I., Eremina R.M., Yatsyk I.V.: Investigation of Mn valence state in $\text{Sr}_2\text{Ti}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_4$ composition compounds by EPR method (poster)
- Vavilova E.L.: Static and resonant properties and magnetic phase diagram of $\text{LiMn}_2\text{TeO}_6$ (oral)
- Vorobeva V.E., Starichenko D.V., Gruzdev M.S., Chervonova U.V., Yatsyk I.V.: Magnetic and EPR properties of the second generation dendrimeric Fe^{3+} complexes with fluorescent environment (poster)
- Voronkova V.K., Sukhanov A.A., Mambetov A.E., Jianzhang Zhao: Electron spin polarization dynamics of the photoexcited triplet states of the organic chromophores and donor-acceptor dyads: analysis of the TREPR spectra evolution (poster)
- Yurtaeva S.V., Yafarova G.G., Yatsyk I.V., Rodionov A.A., Gainutdinov Kh.L.: EMR signals in rat spinal cord 7 days after its traumatic injury (poster)

- Yurtaeva S.V.: Variation of the EPR spectra of non-morphogenic buckwheat cell culture during growth and cell division (oral)
- Zaripov R.B., Kandrashkin Yu.E.: ESEEM study of $Y_3N@C_{80}$ under photoexcitation (poster)
- Zaripov R.B., Ulanov V.A., Zainullin R.R.: EPR study of iron impurities in BaF_2 single crystal under X-ray irradiation (poster)
- Zaripova R.I., Yafarova G.G., Andrianov V.V., Sungatullina M.I., Ziyatdinova N.I., Gainutdinov Kh.L., Zefirov T.L.: Effect of motor activity restriction on copper content in rat liver (poster)
- Zhelezniakova D.E., Gimazov I.I., Pervakov K.S., Vlasenko V.A., Pudalov V.M., Talanov Y.I.: ESR in $EuEn_2As_2$ crystals close to magnetic ordering temperature (poster)

II Russian-Chinese International School “Superconducting Functional Materials for Advanced Quantum Technologies”, September 23–27, 2024

- Shestakov A.V., Belskaya N.A., Khrapova E.K., Yatsyk I.V., et al.: Magnetic properties of the $(Mg_{1-x}Ni_x)_3Si_2O_5(OH)_4$ $x = 2/3$ and 1
- Ерёмина Р.М., Мошкина Е.М., Яцык И.В.: Магнитные свойства кристалла $Mn_{3-x}Ni_xBO_5$ (стенд.)

XXIV International Youth Scientific School “Actual Problems of Magnetic Resonance and its Application”, Kazan, Russia, September 23–29, 2024

- Enderova T.N., Sakhin V.O., Zaripov R.B., Kukovitsky E.F., Talanov Yu.I.: Non-resonant microwave absorption in topological insulator $Bi_{1.1-x}Sn_xSb_{0.9}Te_2S$ (oral)
- Shestakov A.V., Seidov Z.Y., Yatsyk I.V., Ovchinnikov A.S., Vagizov F.G., Shustov V.A., Badelin A.G., Karpasyuk V.K., Krug von Nidda H.-A., Eremina R.M.: Magnetic properties of $La_{1-y}Sr_yMn_{0.9}Fe_{0.05}Zn_{0.05}O_3$ ($y = 0.17, 0.19, 0.3$) (oral)
- Shestakov A.V., Yatsyk I.V., Fazlizhanov I.I., Semeno A.V., Demishev S.V., Ulanov V.A.: Study of the magnetic properties of $PbTe$ (Mn, Cu) by ESR method in X, Q, V-bands (poster)
- Slesareva Yu., Volkov M.Yu., Vavilova E.L., Astvatsaturov D.A., Chumakova N.: Molecular dynamics of acetonitrile intercalated into graphite oxide studied via 1H NMR

II Международная конференция “РОСТКИ: Россия и Китай – взаимовыгодное сотрудничество”, Казань, Россия, 13–15 ноября 2024 г.

- Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Одиванов В.Л., Баязитов А.А.: Разработка оборудования и методик для неразрушающей диагностики и контроля продукции и технологий органического земледелия (устн.)

V Международная конференция “Газоразрядная плазма и синтез наноструктур”, Казань, Россия, 6–9 декабря 2023 г.

- Степанов А.Л.: Ионный синтез металлических наночастиц в диэлектриках и полупроводниках (приглашённый)

II Межрегиональная научно-практическая конференция с международным участием “Практическая педагогика: от идеи до результата”, Казань, Россия, 12 декабря 2024 г.

Фаттахова М.Я., Хабилов Р.Ш., Баязитов А.А., Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Красножен В.Н., Ахатов А.Ф.: Диагностика и восстановление голосовой функции педагогов с применением компьютерного спектрального анализа голоса и МРТ (устн.)

Российские конференции

- Нейрофорум “Неделя нейронаук в Казани-2024”, Международная конференция “Медицина и искусство. От Бехтерева и до наших дней”, Казань, 12–14 марта 2024 г.
- Фаттахова М.Я., Хабилов Р.Ш., Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Ахатов А.Ф., Бекмачева Е.С., Лукашев А., Красножен В.Н.: Современные физические методы ранней диагностики голосовых нарушений (устн.)

Конференция “Молодёжные разработки и инновации в решении приоритетных задач АПК”, Казань, 28–29 марта 2024 г.

- Салихов К.М.: Размышления вслух о науке (устн.)

Итоговая научно-образовательная конференция студентов Института физики по секции “Физика”, Казань, Россия, 14 апреля 2024 г.

- Арбузова Л.Р., Турайханов Д.А., Калачёв А.А.: Повышение эффективности атмосферного квантового канала с помощью адаптивной оптики

Всероссийская конференция по люминесценции, Москва, 23–26 апреля 2024 г.

- Жарков Д.К., Леонтьев А.В., Шмелёв А.Г., Нуртдинова Л.А., Митюшкин Е.О., Андрианов В.В. и др.: Томография и термометрия в живых тканях нервной системы виноградной улитки с помощью люминесцентной конфокальной микроскопии (стенд.)
- Лапаев Д.В., Никифоров В.Г., Судакова С.Н., Подъячев С.Н., Мустафина А.Р.: Внутримолекулярная миграция энергии в люминесцентном комплексе $Tb(III)$ с тетра-1,3-дикетон каликс[4]ареном (устн.)
- Никифоров В.Г., Жарков Д.К., Леонтьев А.В., Шмелёв А.Г., Нуртдинова Л.А., Митюшкин Е.О.: Одиночные апконверсионные частицы в роли люминесцентных сенсоров (устн.)
- Петров Д.Н., Шмелёв А.Г., Исламова Л.Н., Калинин А.А., Балакина М.Ю., Никифоров В.Г.: Люминесцентные

свойства новых хромофоров с высокой оптической нелинейностью (стенд.)

Солодов А., Савенков А., Гатауллина Р.М., Никифоров В.Г., Жарков Д.К., Амиров Р.: Новый подход к получению нанолуминофоров на основе фторидной матрицы NaYF_4 , легированной редкоземельными ионами (Устный доклад)

Шмелёв А.Г., Нуртдинова Л.А., Леонтьев А.В., Жарков Д.К., Заиров Р.Р., Федоренко С.В., Мустафина А.Р., Никифоров В.Г.: Нанолуминофор $[\text{Ru}(\text{dipy})_3]^{2-}@\text{SiO}_2$ в качестве нанотермосенсора (стенд.)

XXXIX Собрание по физике низких температур ФНТ-2024, Черногоровка, 3–7 июня 2024 г.

Гимазов И.И., Железнякова Д.Е., Зарипов Р.Б., Перваков К.С., Пудалов В.М., Таланов Ю.И.: Критическое поведение магнитных и транспортных параметров EuFe_2As_2 вблизи температуры магнитного упорядочения (стенд.)

Демишев С.В., Шестаков А.В., Яцык И.В., Семенов А.В., Григорьев С.В., Ерёмин Р.М.: Исследование низкотемпературного спин-флуктуационного перехода в конической фазе MnSi (стенд.)

Камашев А.А., Гарифьянов Н.Н., Большаков С.А., Мамин Р.Ф., Гарифуллин И.А.: Исследования тонкоплёночных мультислойных структур Fe1/Cu/Fe2/Cu/Pb и Co1/Cu/Co2/Cu/Pb на пьезоэлектрической подложке PMN-PT (стенд.)

Камашев А.А., Гарифьянов Н.Н., Валидов А.А., Катаев В.Е., Осин А.С., Фоминов Я.В., Гарифуллин И.А.: Эффект сверхпроводящего спинового клапана в гетероструктурах с изоляционными слоями (устн.)

Мамин Р.Ф., Евсеев К.В., Гумарова И.И., Камашев А.А.: DFT исследования магнитоэлектрических свойств гетероструктур ферромагнетик/сегнетоэлектрик (стенд.)

Мамин Р.Ф., Шапошникова Т.С.: Магнитоэлектрические свойства скирмиоподобных структур

Сахин В.О., Куковицкий Е.Ф., Лядов Н.М., Камашев А.А., Гарифьянов Н.Н., Таланов Ю.И.: Транспортные исследования эффекта близости тонкой сверхпроводящей плёнки на топологическом изоляторе $\text{Bi}_{1.08}\text{Sn}_{0.02}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$ (устн.)

Таланов Ю.И., Гимазов И.И., Железнякова Д.Е.: Спиновые корреляции и проводимость пниктидов железа при $T > T_c$ (устн.)

Научный семинар “Нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия-2024”, Казань, 10–12 июля 2024 г.

Архипов Д.Д., Шмелёв А.Г., Никифоров В.Г.: Перенос энергии в наночастицах $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$, влияние окружения (стенд.)

Бегишев Е.М., Базаров В.В., Шмелёв А.Г., Жарков Д.К., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Хайбуллин Р.И.: Оптическая спектроскопия кислородных вакансий в рутиле (TiO_2), облучённом ионами аргона (устн.)

Гатауллина Р.М., Солодов А.Н., Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Шмелёв А.Г., Жарков Д.К., Никифоров В.Г.:

Новый подход к созданию многофункциональных люминесцентных сенсоров для широкого круга задач на основе фторидов наночастиц, допированных лантаноидами (устн.)

Лапаев Д.В., Князев А.А., Галяметдинов Ю.Г., Никифоров В.Г.: Многофункциональные люминесцентные материалы на основе анизометричных бета-дикетонатных комплексов лантаноидов (III) для молекулярной фотоники (приглашённый)

Митюшкин Е.О., Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Шмелёв А.Г., Жарков Д.К., Никифоров В.Г.: Микрочастицы $\text{NaYF}_4:\text{Yb}, \text{Er}, \text{Tm}$ в роли температурных сенсоров и люминесцентных зондов для биовизуализации (устн.)

Морозова А.С., Чулкинов А.П., Митюшкин Е.О., Нургазизов Н.И., Никифоров В.Г.: Импринтинг с высоким пространственным разрешением апконверсионных наночастиц $\text{NaYF}_4:\text{Yb}, \text{Er}$ на макроскопически чистую поверхность (стенд.)

Никифоров В.Г., Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Шмелёв А.Г., Жарков Д.К., Гатауллина Р.М., Митюшкин Е.О., Солодов А.Н., Заиров Р.Р., Мустафина А.Р., Андрианов В.В., Муранова Л.Н., Гайнутдинов Х.Л.: Люминесцентная томография изолированной нервной системы виноградной улитки с разными типами наночастиц (стенд.)

Солодов А.Н., Гатауллина Р.М., Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Шмелёв А.Г., Жарков Д.К., Никифоров В.Г.: Гидрофилизация олеат-стабилизированных апконверсионных наночастиц натрия-иттрия фторида, легированного ионами Yb и Ho (устн.)

Фёдорова В.А., Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Шмелёв А.Г., Жарков Д.К., Шамилов Р.Р., Галяметдинов Ю.Г., Никифоров В.Г.: Фотодеградация квантовых точек CdSe/ZnS и CdSe/CdS/ZnS в условиях разного окружения (устн.)

Чулкинов А.П., Морозова А.С., Митюшкин Е.О., Нургазизов Н.И., Никифоров В.Г.: Прецизионная селекция из ансамбля, перемещение в нанометровых масштабах и угловое ориентирование наночастиц на основе NaYF_4 и YVO_4 , допированных Yb и Er , проявляющих апконверсионные люминесцентные свойства (устн.)

Чулкинов А.П., Морозова А.С., Никулина В.В., Митюшкин Е.О., Никифоров В.Г., Нургазизов Н.И.: Атомно-силовая спектроскопия как метод изучения адгезионных свойств к стеклянной подложке апконверсионных наночастиц NaYF_4 , допированных Yb и Er (стенд.)

Шегеда А.М., Короблёва С.Л., Морозов О.А.: Незаимность оптических свойств кристаллов $\text{YLiF}_4:\text{Er}^{3+}$ и $\text{LuLiF}_4:\text{Er}^{3+}$ в постоянных и импульсных магнитных полях

Шмелёв А.Г., Петров Д.Н., Леонтьев А.В., Жарков Д.К., Заиров Р.Р., Мустафина А.Р., Никифоров В.Г.: Калибровка люминесцентных сенсоров температуры на основе наночастиц $[\text{Ru}(\text{dipy})_3]^{2-}@\text{SiO}_4$ (устн.)

XV Конференция “Кремний-2024”, Иркутск, 15–20 июля 2024 г.

Сы Ч., Тыщенко И.Е., Баталов Р.И., Володин В.А., Попов В.П., Шмелёв А.Г., Черкова С.Г.: Фотолюминесценция в видимом спектральном диапазоне плёнок SiO_2 , имплантированных ионами In^+ и As^+ (устн.)

IV Конференция матцентров РФ, секция “Математическая логика и теоретическая информатика”, Санкт-Петербург, 6–11 августа 2024 г.

Аблаев М.Ф., Аблаев Ф., Салихова Н.: Эффективные квантовые алгоритмы поиска в словаре

IX Всероссийская конференция и школы молодых учёных и специалистов “Физические и физико-химические основы ионной имплантации”, Нижний Новгород, 22–25 октября 2024 г.

Баталов Р.И., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Файзуллин Д.А., Подлесных И.М.: Сверхлегирование монокристаллов Si и Ge примесью серы методами ионной имплантации и лазерного отжига (стенд.)

Бегишев Е.М., Базаров В.В., Вахитов И.Р., Лядов Н.М., Нуждин В.И., Самошкина Ю.Э., Петров Д.А., Суханов А.А., Хайбуллин Р.И.: Микроструктура, магнитооптика и ферромагнетизм рутила (TiO_2), имплантированного ионами кобальта при повышенной температуре подложки (стенд.)

Смирнова М.А., Степанов А.Л., Бачурин В.И., Чурилов А.Б.: Оптические свойства поверхности германия, облучённой ионами галлия (устн.)

Хайбуллин Р.И., Бегишев Е.М., Базаров В.В., Валеев В.Ф., Вахитов И.Р., Гумаров А.И., Зиннатуллин А.Л., Киямов А.Г., Лядов Н.М., Суханов А.А.: Особенности ферромагнетизма в эпитаксиальных плёнках диоксида олова (SnO_2), имплантированных ионами 3d-элементов (приглашённый)

XXXVI Симпозиум “Современная химическая физика”, Туапсе, 16–26 сентября 2024 г.

Чукланов А.П., Морозова А.С., Митюшкин Е.О., Жарков Д.К., Леонтьев А.В., Никифоров В.Г., Нургазизов Н.И.: Применение методов сканирующей зондовой микроскопии для перемещения в нанометровых масштабах и изолирования апконверсионных наночастиц NaYF_4 и YVO_4 , допированных Yb и Er (устн.)

Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием “Учение академика И. П. Павлова в современной системе нейронаук”, Санкт-Петербург, 18–20 сентября 2024 г.

Андрианов В.В., Яфарова Г.Г., Базан Л.В., Богодвид Т.Х., Июдин В.С., Нагибов А.В., Пашкевич С.Г., Филиппович Т.А., Гайнутдинов Х.Л.: Эффекты мезенхимальных стволовых клеток на содержание оксида азота в гиппокампе и обонятельных луковицах крыс при кратковременной ишемии головного мозга

20-я Международная научная конференция-школа по нано-, микро-, оптоэлектронике и волоконной оптике, Саранск, 24–27 сентября 2024 г.

Желева Е.Б., Семашко В.В., Шавельев А.А., Морозов О.А., Кяшкин В.М., Карабутов А.А., Бродниковский Ю.П.: Качество кристаллов колькпирита

Колесникова В.И., Шакуров Г.С., Морозов О.А., Кораблева С.Л., Семашко В.В.: О возможности использования микрочастиц LiHoF_4 в качестве визуализаторов интенсивности КВЧ-излучения

Семашко В.В., Карабутов А.А., Ораевский А.А., Бродниковский Ю.П.: Оптоакустические технологии в дефектоскопии и медицине (пленарный

Шишкин А.Д., Семашко В.В.: Лабораторный макет рабочего эталона первого разряда для измерения скорости продольных звуковых колебаний

XXII Всероссийская молодёжная Самарская конкурс-конференция по оптике, лазерной физике и физике плазмы, Самара, 12–16 ноября 2024 г.

Гатауллина Р.М., Солодов А.Н., Никифоров В.Г., Амиров Р.Р., Шмелёв А.Г.: Улучшение износостойкости и механических свойств эпоксидных нанокомпозитов за счёт поверхностно-концентрированного магнитного и люминесцентного оксида графена (устн.)

Митюшкин Е.О., Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Шмелёв А.Г., Жарков Д.К., Нургазизов Н.И., Чукланов А.П., Никифоров В.Г.: Мониторинг температуры с помощью одиночных частиц $\text{NaYF}_4:\text{Yb,Er}$ (устн.)

Никифоров В.Г., Лапаев Д.В., Галяметдинов Ю.Г., Князев А.А.: Дизайн плёночных люминесцентных материалов на основе бета-дикетонатных комплексов лантаноидов (приглашён.)

XXVIII Молодёжная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”, Казань, 7–8 ноября 2024 г.

Митюшкин Е.О., Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Шмелёв А.Г., Нургазизов Н.И., Чукланов А.П., Жарков Д.К., Никифоров В.Г.: Одиночные сенсоры температуры на основе апконверсионных частиц $\text{NaYF}_4:\text{Yb,Er}$ (стенд.)

II Russian Conference “Brain Diseases – The Challenge of the 21st Century”, Kazan, November 14–15, 2024

Gainutdinov Kh.L., Andrianov V.V., Silantyeva D.I., Deryabina I.B., et al.: Investigation of NO content in nervous tissue during combined brain and spinal cord injury

Гости института

Участники международной конференции “Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives (EPR-80)”

Stephany Natasha Arellano Ahumada, National Polytechnic Institute, Mexico City, Mexico

Ramírez-Rosales Daniel, National Polytechnic Institute, Mexico City, Mexico

Абдракимова Эльмира Хамитовна, студентка, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Абдуллин Аяз Фернатович, инженер, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Аганова Оксана Варгановна, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет

Алакишин Егор Михайлович, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Александров Артём Сергеевич, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Андреев Георгий Юрьевич, ассистент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Андреева Софья, Институт физических проблем им. П. Л. Капицы, ВШЭ, Москва

Арифиллин Марсель Равшанович, к.ф.-м.н., Оренбургский государственный университет, Оренбург

Афанасьева Анастасия Николаевна, студентка, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Барышников Кирилл Александрович, к.ф.-м.н., Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

Батуева Екатерина Евгеньевна, ассистент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Богайчук Александр Вячеславович, н.с., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Болтенкова Екатерина Ивановна, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Буньков Юрий Михайлович, д.ф.-м.н., Российский квантовый центр, Москва

Вагизов Фарит Габдулхакович, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Валиуллин Алик Ленарович, студент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Ванин Анатолий Фёдорович, д.б.н., ФИЦ Химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН, Москва

Волков Виталий Иванович, д.ф.-м.н., Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка

Воронина Елена Валентиновна, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Габбасов Булат Фаритович, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Гараева Аделина Радиковна, ассистент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Гинкель Анна Константиновна, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Глазков Василий Николаевич, д.ф.-м.н., Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, Москва

Голдберг Артёмий Александрович, студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Грачева Ирина Николаевна, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Гумарова Ирина Ивановна, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Гурин Александр Сергеевич, к.ф.-м.н., Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

Давыдов Роман Вадимович, к.ф.-м.н., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Дедушенко Сергей Константинович, к.х.н., Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва

Дементьев Сергей, Международный томографический центр, Новосибирск

Демехин Максим Андреевич, студент, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург

Демишев Сергей Васильевич, д.ф.-м.н., Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва

Дуглав Александр Васильевич, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Дулов Евгений Николаевич, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Евсеев Александр Александрович, инженер, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Евсеев Кирилл Васильевич, м.н.с., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Залуцкий Александр Альбертович, к.ф.-м.н., Ярославский государственный технический университет, Ярославль

Зарипова Раиля Ирековна, к.б.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Иванов Дмитрий Сергеевич, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Ивченко Евгений Львович, д.ф.-м.н., Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

Ильясов Ахат Вахитович, академик, Академия наук Республики Татарстан, Казань

Исаев Николай Павлович, к.ф.-м.н., Институт химической кинетики и горения имени В. В. Воеводского, Новосибирск

Исламов Тимур Рафисович, инженер, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

- Камнев Александр Анатольевич, д.х.н., Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов, Саратов
- Карпеев Андрей Александрович, к.ф.-м.н., Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва, Саранск
- Климова Софья Андреевна, студентка, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург
- Ковычева Екатерина Игоревна, инженер, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
- Кокорин Александр Ильич, д.х.н., Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова, Москва
- Комлева Диана Игоревна, ассистент, Московский государственный университет им. Ломоносова, Москва
- Константинова Елизавета Александровна, д.ф.-м.н., Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва
- Кочелаев Борис Иванович, профессор-консультант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Кузина Диляра Мтыгулловна, к.г.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Кузьмин Вячеслав Владимирович, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Кусраев Юрий Георгиевич, д.ф.-м.н., Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург
- Лесная Марина, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва
- Литовских Никита, Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова РАН, Новосибирск
- Мамин Георгий Владимирович, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Матвеев Михаил Владимирович, студент, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва
- Матвеева Анна Геннадьевна, к.х.н., Институт химической кинетики и горения имени В. В. Воеводского, Новосибирск
- Мельникова Дарья Леонидовна, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Миннегулова Зарина Ильдаровна, инженер, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Миронов Роман Петрович, инженер, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Мурзаханов Фадис Фанилович, м.н.с., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Мусин Вадим Фархадович, студент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Назаров Сергей Олегович, м.н.с., архив РАН, Москва
- Недопекин Олег Владимирович, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Одиванов Владимир Леонидович, к.т.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Патрин Геннадий Семёнович, д.ф.-м.н., Сибирский федеральный университет, Красноярск
- Подаров Роман, Международный томографический центр, Новосибирск
- Подшивалов Алексей Павлович, инженер, Уральский федеральный университет, Екатеринбург
- Попов Артемий Александрович, студент, ВШЭ, Москва
- Пулотов Жамшед Хуршидович, студент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Пятаев Андрей Васильевич, м.н.с., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Рубин Дмитрий Станиславович, к.ф.-м.н., Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск
- Садовникова Маргарита Александровна, м.н.с., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Саенко Никита Сергеевич, м.н.с., Институт химии ДВО РАН, Владивосток
- Самсоненко Аркадий Антонович, студент, Международный томографический центр, Новосибирск
- Санников Кирилл Олегович, студент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Сарицкий Денис Алексеевич, м.н.с., Институт химии ДВО РАН, Владивосток
- Сафин Ансар Ризаевич, д.ф.-м.н., Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова, Москва
- Связов Сергей Владимирович, аспирант, Международный томографический центр, Новосибирск
- Семено Александра Викторовна, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва
- Сименидо Георгий Александрович, аспирант, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва
- Смирнов Александр Иванович, д.ф.-м.н., Институт физических проблем имени П. Л. Капицы, Москва
- Сюракшина Людмила Александровна, к.ф.-м.н., Объединённый институт ядерных исследований, Дубна
- Тарасов Артём, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Тимралиева Александра Акбулатовна, инженер, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург
- Трахинина Софья Юрьевна, лаборант, Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова РАН, Новосибирск
- Трошкина Анастасия Андреевна, инженер, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Усеинов Ниязбек Хамзович, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
- Федин Матвей Владимирович, д.ф.-м.н., Международный томографический центр, Новосибирск
- Фролов Кирилл Владимирович, к.ф.-м.н., Институт кристаллографии имени А. В. Шубникова, Москва
- Хлынова Тамара Андреевна, Международный томографический центр, Новосибирск
- Циберкин Кирилл Борисович, к.ф.-м.н., Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

Цухлова Дарья Александровна, инженер, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
 Чистякова Наталья Владимировна, к.ф.-м.н., Московский государственный университет им. Ломоносова, Москва
 Чумакова Наталья Алексеевна, к.т.н., ФИЦ Химической физики им. Н. Н. Семёнова, Москва
 Шавелев Алексей Андреевич, м.н.с., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
 Шагинян Василий Робертович, д.ф.-м.н., Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
 Шайдуллина Амина Фирдусовна, студентка, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
 Шамсиева Айгуль, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
 Шамсиярова Энже Ильдусовна, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
 Шестаков Алексей, к.ф.-м.н., Институт общей физики имени А. М. Прохорова, Москва
 Шукринов Юрий Маджнунович, д.ф.-м.н., Объединённый институт ядерных исследований, Дубна
 Янилкин Игорь Витальевич, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
 Янцен Никита Владимирович, лаборант, Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, Саранск

Организационный комитет конференции

Таюрский Дмитрий Альбертович, д.ф.-м.н., проректор по научной деятельности, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
 Гафуров Марат Ревгерович, д.ф.-м.н., директор Института физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
 Романова Ирина Владимировна, к.ф.-м.н., заместитель директора по научной деятельности, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
 Юсупов Роман Валерьевич, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Спонсоры конференции

Омиров Андрей, компания Криотрейд Инжиниринг, Москва
 Чазов Илья Игоревич, начальник отдела спектроскопии и ФМИ, компания Элемент, Екатеринбург
 Черкасов Антон, ведущий специалист, компания Элемент, Екатеринбург
 Шамис Алексей, ЦТС 'Наука', Москва

Сопровождающие лица

Залуцкая Ольга
 Захарова Елена
 Кусраева Лилия

Другие гости

Знакомство с институтом

Абдуллазянов Эдвард Юнусович, ректор КГЭУ
 Ахметова Ирина Гареевна, проректор по развитию и инновациям КГЭУ
 Владимиров Олег Вячеславович, доцент кафедры "Электроснабжение промышленных предприятий" КГЭУ
 Гасников Александр Владимирович, ректор Университета Иннополис
 Ившин Игорь Владимирович, проректор по науке и коммерциализации КГЭУ
 Низамиев Марат Фирденатович, начальник Управления научных исследований, инноваций и разработок КГЭУ
 Отарашвили Зураб Автандилович, советник ректора Университета Иннополис
 Садыков Марат Фердинантович, заведующий кафедрой "Теоретические основы электротехники" КГЭУ
 Сафин Альфред Робертович, заведующий кафедрой "Электроснабжение промышленных предприятий" КГЭУ
 Соловьёв Александр Вячеславович, руководитель МКБ "Энергия взлёта" КГЭУ
 Филимонова Антонина Андреевна, заведующий кафедрой "Химия и Водородная энергетика" КГЭУ
 Чичирова Наталия Дмитриевна, заведующий кафедрой "Атомные и тепловые электрические станции" КГЭУ
 Журавлёв Михаил Валерьевич (Томский политехнический университет), посещение ускорителя ТЕМП
 Кудряшов Сергей Иванович, к.ф.-м.н., Физический институт им. Лебедева РАН, Москва, знакомство с лабораторией ИРВ
 Подлесных Иван Михайлович, м.н.с., Физический институт им. Лебедева РАН, Москва, знакомство с лабораторией ИРВ
 Паштецкий Владимир Степанович, директор НИИСХ Крыма, доктор с/х наук, член-корреспондент РАН, президент МОО "Крымская Академия Наук", знакомство с лабораторией ММФ
 Дидович Светлана Витальевна, заместитель директора НИИСХ Крыма по науке в направлении с/х микробиологии, знакомство с лабораторией ММФ
 Болилый Артём Олегович, заведующий лабораторией основ сельскохозяйственной инженерии НИИСХ Крыма, знакомство с лабораторией ММФ
 Рыбин Дмитрий Станиславович, к.ф.-м.н., ФТИ УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, обсуждение планов работ
 Ежков Владимир Олегович, д.в.н., Казанская государственная академия ветеринарной медицины им. Н. Э. Баумана, проведение совместных исследований
 Капранов Иван Александрович, Московский физико-технический институт, обсуждение планов работ
 Матвеев Пётр Игоревич, к.х.н., МГУ имени М. В. Ломоносова, обсуждение планов работ

ФИЦПРЕСС
2025

ISSN 2782-4780