



КАЗАНСКИЙ
ФИЗИКО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

ИМЕНИ
Е. К. ЗАВОЙСКОГО

2025

ЕЖЕГОДНИК

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

КАЗАНСКИЙ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

ИМЕНИ Е. К. ЗАВОЙСКОГО



ТОМ 25
2026

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 25. – Казань: ФИЦ КазНЦ РАН, 2026. 236 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. Н. 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 2025 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
научной деятельности института.

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

© КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, 2026
© Обложка Аксёнов И.А., 2026

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 19.06.2026
Формат 60х90/8. Бумага мелованная
Гарнитура Times. Печать офсетная
Тираж 100 экз.

Предисловие редактора

25 лет Ежегоднику КФТИ

Начало выпуска Ежегодника нашего института совпало с началом XXI века. Поэтому это ежегодное издание с описанием значимых событий, которые произошли в жизни института в целом, в жизни физтеховцев, с представлением результатов работы в течение года, можно рассматривать как полную летопись Казанского физико-технического института имени Е. К. Завойского в первой четверти XXI века.

Начало нового тысячелетия стало временем больших перемен в Российской академии наук. Была осуществлена реформа Российской академии наук, институты РАН стали Федеральными исследовательскими центрами, подчинёнными непосредственно Министерству науки и высшего образования Российской Федерации. Изменились подходы к планированию научной работы и характер отчётов о проделанной работе. Нашими планами работы стали государственные задания. Оценка результатов нашей работы производится в значительной степени методами наукометрии, а не экспертной оценкой комиссий, назначаемых Президиумом РАН, как это было до реформы. Реформа стартовала десять лет назад. Уже накоплен некоторый опыт работы в новых условиях. Мне представляется, что было бы хорошо в Ежегоднике ввести раздел типа “Новое в организации нашей работы”. Например, молодёжные лаборатории – это новое в нашей жизни, это интересное и многообещающее дело, и оно пришло в нашу жизнь с реформой академии.

Когда мы создавали Ежегодник, были сформулированы задачи, цели этого довольно хлопотливого проекта. Они были изложены в Предисловии к первому выпуску Ежегодника КФТИ. Чтобы каждый мог сравнить, насколько хорошо были выполнены поставленные в этом проекте задачи, это Предисловие приводится в разделе, посвящённом 25-летию Ежегодника.

Считаю, что Ежегодник КФТИ состоялся успешно, поставленные задачи выполнены. Но нет предела совершенству. Думаю, можно было бы ввести новые разделы, которые бы полнее отражали работу Учёного совета, вспомогательных служб института, работу научных семинаров в институте, наше взаимодействие с Академией наук Татарстана, с университетами и школами, содержательно представляли гостей института и внедрение наших научных достижений в реальное производство.

В этот период больших перемен нам помогли и помогают установившиеся традиции в нашем институте. У нас практически всегда в среду в 9.30 научная сессия Учёного совета института. У нас регулярно выходит Ежегодник. В создании Ежегодника участвуют практически все. Эти и другие традиции дают нам ощущение стабильности даже в моменты серьёзных организационных перемен.

Успешная реализация проекта Ежегодник КФТИ – это заслуга всех сотрудников института. Но некоторые внесли и вносят особенный вклад. И за это они заслуживают нашу особенную благодарность. Всем большое спасибо.

Большое спасибо коллегам, которые подготовили Ежегодник-2025 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!

Подводя итоги 2025 года, могу с уверенностью сказать, что он стал для нашего физтеха годом реализации стратегических задач, сформулированных в Программе развития ФИЦ КазНЦ РАН. Несмотря на сохраняющиеся внешние вызовы, коллектив института продемонстрировал высокую устойчивость, профессиональную зрелость и способность работать на опережение. Мы успешно выполнили государственное задание, усилили взаимодействие с промышленными партнёрами, а публикации сотрудников вновь подтвердили значимость наших исследований. Все ключевые достижения и наиболее значимые события уходящего года подробно отражены на страницах этого выпуска Ежегодника КФТИ.

Особым событием года стала успешно проведённая в сентябре Неделя науки города Казани “Kazan Science Week-2025”. Благодаря слаженной работе организационных комитетов и самоотдаче сотрудников на высочайшем уровне прошли церемония вручения Международной премии имени Е. К. Завойского, международные конференции “Modern Development of Magnetic Resonance 2025” и “Advanced Laser Technologies – ALT 2025”, а также молодёжные школы по когерентной оптике и магнитному резонансу. Форум собрал ведущих отечественных и зарубежных специалистов, способствовал живому обмену идеями и закладке основ для новых совместных проектов.

В 2025 году сотрудники института вновь были удостоены высоких наград: ведомственных знаков отличия, благодарностей Правительства Республики Татарстан, почётных грамот КазНЦ РАН и г. Казани. Свою научную квалификацию подтвердили и молодые учёные: успешно защищены две докторские и одна кандидатская диссертации, что свидетельствует о преемственности наших научных школ. Благодаря грантовой поддержке продолжилось обновление экспериментальной базы. Укрепилось сотрудничество с предприятиями реального сектора – несколько лабораторных разработок перешли в стадию пилотного внедрения, что подчёркивает возрастающую прикладную ценность наших фундаментальных результатов.

Не менее важной остаётся наша просветительская и кадровая миссия. В 2025 году институт принял значительное количество образовательных экскурсий. Школьники и студенты смогли воочию увидеть современные лаборатории, пообщаться с действующими исследователями и составить представление о научных карьерных траекториях. Уверен, что эта непростая, но очень важная работа уже в ближайшие годы обеспечит приток талантливой молодёжи в наши стены.

Глядя вперёд, хочу подчеркнуть: наша стратегическая цель – не просто сохранять лидерство, а формировать научную повестку в областях квантовых технологий, спинтроники, магнитной резонансной спектроскопии, разработке новых функциональных материалов. Уверен, что благодаря энергии, профессионализму и преданности науке сотрудников наш физтех не только сохранит, но и приумножит свой авторитет в российской и мировой научной среде.

Искренне благодарю сотрудников нашего института за труд, инициативу и ответственное отношение к делу. Желаю вам крепкого здоровья, вдохновения, новых открытий и уверенности в завтрашнем дне. Вместе мы продолжим делать науку, которая отвечает на вызовы времени и меняет мир к лучшему.

С. М. Хантимеров

Содержание

Структура института

- 9 Структура института

Важнейшие события года

- 12 Неделя науки города Казани “Kazan Science Week”
Т. П. Гаврилова
- 19 Признание заслуг
- 22 ФИЦ КазНЦ РАН и ННГУ им. Н. И. Лобачевского договорились
о сотрудничестве

Важнейшие результаты года

- 24 Важнейшие результаты исследований 2025 года

Ежегоднику – 25 лет!

- 147 Ежегоднику – 25 лет!

Научные сообщения

- 29 Парадигма в радиационной физике: концептуальные сценарии
модификации ионно-облучаемой поверхности германия при
порообразовании в зависимости от её распыления и распухания
*А. Л. Степанов, В. Ф. Валеев, В. И. Нұждин, А. М. Рогов,
В. Ф. Сотникова, Д. А. Коновалов*
- 40 Слои нанопористого германия на тонких плёнках, полученных ионно-
стимулированным осаждением
*А. Л. Степанов, И. А. Файзрахманов, В. Ф. Валеев, А. М. Рогов,
В. Ф. Сотникова, В. И. Нұждин, Д. А. Коновалов*
- 46 Ионно-лучевые способы формирования оптических дифракционных
решёток на основе слоёв нанопористого германия
*А. Л. Степанов, В. Ф. Валеев, А. М. Рогов, В. Ф. Сотникова,
И. А. Файзрахманов, В. И. Нұждин, Д. А. Коновалов*
- 52 Квазиоднородное распределение намагниченности в планарных
микрочастицах никеля квадратной формы, обусловленное вогнутостью
сторон
Д. А. Бизяев, Н. И. Нургазизов, А. П. Чукланов, А. А. Бухараев

- 59 Эффект магнитоэлектрической невязимности в субмиллиметровой ЭПР-спектроскопии примесных ионов $^{166}\text{Er}^{3+}$ в монокристалле $^7\text{LiYF}_4$
В. Ф. Тарасов, М. В. Ерёмин
- 63 Центры ионов Ho^{3+} в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Ho}^{3+}$
Г. С. Шакуров, В. В. Семашко, О. А. Морозов
- 66 Влияние термического и термобарического отжига на магнитные свойства слоистых перовскитов $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4\pm\delta}$
Д. В. Мамедов, Ю. А. Деева, В. В. Бажал, Т. И. Чупахина, М. А. Черосов, Р. Г. Батулин, Т. П. Гаврилова
- 71 Почему эффект обменного сужения спектра ЭПР в разбавленных растворах парамагнитных частиц может не наблюдаться в эксперименте?
К. М. Салихов
- 77 Как создать эффективные органические светоизлучатели: изучение фотофизических особенностей донорно-акцепторных диад, в которых реализуется процесс термически активированной замедленной флуоресценции (TADF)
А. А. Суханов, А. Е. Мамбетов, В. К. Воронкова
- 81 Сепарабельность, скрытые параметры и квантовая коррелированность пар ЭПР (Эйнштейна-Подольского-Розена)-Бом-Белла
Н. К. Соловаров
- 84 Эхо-явления в спиновой спектроскопии протонов и мюонов
Н. М. Сулейманов, С. А. Моисеев
- 89 Структурные, оптические и фотоэлектрические свойства слоёв Si с внедрёнными примесными ионами индия и мышьяка
Р. И. Баталов, В. В. Базаров, Е. М. Бегишев, Н. М. Лядов, В. Ф. Валеев, Г. А. Новиков, Р. Ф. Ликеров
- 94 ЭПР-исследования и особенности моделирования спектров от железосодержащих белков крови
М. И. Ибрагимова, А. И. Чушников, И. В. Яцык, Г. Г. Гумаров
- 101 Бабочка и усиление фотонного эха в импульсном магнитном поле в кристаллах $\text{Y}(\text{Lu})\text{F}_4:\text{Er}^{3+}$
А. М. Шегада, О. А. Морозов
- 106 Модуляция спектральных характеристик сенсорной поверхности композитного волоконного термосенсора
Н. С. Перминов, А. В. Шкаликов
- 114 Хиральные и топологические свойства кольцевой фотонной молекулы из четырёх оптических микрорезонаторов
Н. С. Перминов, С. А. Моисеев
- 120 Автоматизация настроек специализированного магнитно-резонансного томографа
В. Л. Одиванов, Я. В. Фаттахов, А. Р. Фахрутдинов, В. А. Шагало, А. А. Баязитов
- 124 Формирование микроструктур на поверхности кремния мощными световыми импульсами для повышения эффективности солнечных элементов
Б. Ф. Фаррахов
- 127 Диагностика заболеваний голоса педагогов. Разработка программного модуля для измерения амплитуды и энергии формант голоса
А. А. Баязитов, М. Я. Фаттахова, Р. Р. Бадриева, В. Л. Одиванов, Я. В. Фаттахов

- 132 Синтез, структура и электрохимические свойства композитных плёнок Ge–Ni, полученных магнетронным распылением
В. В. Базаров, В. Ф. Валеев, Р. Р. Гарипов, Н. М. Лядов, В. И. Нурждин, Н. М. Сулейманов, В. А. Шустов, И. В. Янилкин
- 136 Эффект сверхпроводящего спинового клапана в Fe/Si₃N₄/Pb/Si₃N₄/Fe гетероструктурах
А. А. Камашев, Н. Н. Гарифьянов, Д. А. Арбузов¹, А. А. Валидов, И. А. Гарифуллин
- 142 Abstracts

Аспиранты и молодые учёные

- 158 Аспиранты и молодые учёные

Персоналии

- 160 Евгений Филиппович Куковицкий. К 80-летию со дня рождения
Ю. И. Таланов
- 162 Яхъя Валиевич Фаттахов. К 70-летию со дня рождения
В. Ф. Тарасов
- 164 Альфия Закировна Губайдуллина. К 70-летию со дня рождения
К. М. Салихов, В. Ф. Тарасов
- 165 Нина Алексеевна Карташёва. К 70-летию со дня рождения
А. И. Андреева, В. К. Воронкова
- 167 Валерий Александрович Шагалов. К 70-летию со дня рождения
А. Р. Фахрутдинов, О. И. Гнездилов, А. И. Андреева

Научно-организационная деятельность

- 169 О работе Учёного совета
Л. И. Савостина
- 171 Семинар памяти Г. Б. Тейтельбаума
Ю. И. Таланов
- 173 Международная онлайн конференция “СПИН-2025: Смена парадигмы спинового обмена”, 17–20 июня 2025 года
К. М. Салихов
- 175 Международная премия им. Е. К. Завойского 2025
Л. В. Мосина
- 177 Журнал “Applied Magnetic Resonance”
Л. В. Мосина
- 179 “EPR newsletter”: на пороге нового десятилетия ЭПР
Л. В. Мосина
- 181 Премия Блатта
С. Г. Львов
- 182 Когда наука отдыхает: как прошёл первый чемпионат физтеха по стрельбе из лука
Д. Е. Железнякова, Т. П. Гаврилова
- 184 Итоги 2025 года: торжественное собрание сотрудников КФТИ
Л. З. Гайнуллина, А. М. Шегада

СМИ о сотрудниках института

188	Как разработки учёных повлияли на нашу жизнь?
189	Дан старт Международному году квантовой науки и технологии
190	Революция в диагностике и медицинских имплантатах. Учёные открыли новые биосовместимые пьезоэлектрические материалы
191	Физика для жизни. “Всевидающий” газ и сверхпроводниковый “пирог”
193	В Казанском научном центре РАН выберут лучшего молодого учёного и аспиранта
194	Сюжет о конкурсе “Лучший молодой учёный (аспирант) Казанского научного центра РАН 2024”
194	Молодёжь пошла в науку
195	Алексей Калачёв о едином центре академической науки в РТ: “До 2030 года проект должен быть реализован”
197	Алексей Калачёв: “Когда наши учёные конкурируют с китайцами, те могут снизить цену в 10 раз”
200	Казанский научный центр РАН отметил 80-летие
201	Президент Академии наук России поздравил с 80-летним юбилеем ФИЦ КазНЦ РАН
201	Разработки, стартапы и награждение: “Неделя науки” стартовала в Казани
202	Песошин вручил замминистра образования Китая премию имени Завойского
204	Замминистра образования Китая вручили в Казани премию имени Завойского в пять тысяч евро
205	Лауреатом премии Завойского 2025 года стал заместитель министра образования Китая
205	В Казани вручили 35-ю Международную премию имени Е. К. Завойского
205	Премия имени Евгения Завойского
206	Книжная полка Алексея Калачёва

Цифры и факты

208	2025 год в цифрах
209	Темы государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН, выполняемые КФТИ им. Е. К. Завойского
209	Проекты, финансируемые на конкурсной основе
210	Публикации
217	Защиты, награды
217	Участие сотрудников института в преподавательской деятельности
218	Патенты
219	Конференции, организованные КФТИ и при участии КФТИ
227	Участие сотрудников в конференциях
234	Гости института



Структура приводится по состоянию на 31 декабря 2025 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

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.

Гарифьянов Надир Нургаязович, д.ф.-м.н.

Зарипов Руслан Булатович, к.ф.-м.н.

Ерёмина Рушана Михайловна, д.ф.-м.н.

Камашев Андрей Андреевич, к.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

Степанов Андрей Львович, д.ф.-м.н.

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

Тарасов Валерий Фёдорович, д.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:
д.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: к.ф.-м.н. Хайбуллин Рустам Ильдусович

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:
д.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

Неделя науки города Казани “Kazan Science Week”

С 22 сентября по 3 октября 2025 года в Казани состоялось уникальное научное мероприятие – Неделя науки города Казани “Kazan Science Week”. В его программу вошли:

- Международная конференция “Передовые лазерные технологии 2025” (Advanced Laser Technologies 2025);
- Церемония вручения Международной премии имени Е. К. Завойского (Zavoisky Award 2025);
- Международная конференция “Современное развитие магнитного резонанса 2025” (Modern Development of Magnetic Resonance 2025);
- Международная конференция “Сверхпроводимость в наноструктурах 2025” (Superconductivity in Nanostructures 2025);
- Международная молодёжная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”;

- Международная научно-техническая конференция “Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий” с элементами молодёжной школы.

Основными организаторами Недели науки выступили ФИЦ КазНЦ РАН, Казанский федеральный университет и Академия наук Республики Татарстан при поддержке ряда научных институтов из других городов России. Объединение нескольких научных форумов в единый проект было направлено на обмен информацией между учёными различных научных центров России и мира о достигнутых результатах и тенденциях развития в передовых областях науки.

Центральным событием Недели науки в 2025 году стала 32-я международная конференция “Передовые лазерные



Места проведения мероприятий Недели науки города Казани.



Директор ФИЦ КазНЦ РАН
А. А. Калачёв открывает
Неделю науки города Казани.
22 сентября 2025 г.

технологии 2025”. Ранее проводившаяся в девятнадцати странах, включая Россию, она впервые прошла в Казани с 22 по 26 сентября. Конференция собрала порядка 400 участников, значительную часть которых составили представители стран БРИКС. Её тематика охватила широкий круг вопросов лазерной физики, фотоники и квантовых технологий. Учитывая, что 2025 год был объявлен ООН Международным годом квантовой науки и технологий, проведение этой конференции в Казани вызвало значительный интерес как в России, так и за рубежом. Тематически

её удачно дополнила конференция “Сверхпроводимость в наноструктурах 2025”. Параллельно с конференциями работала международная молодёжная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”. С 26 сентября начала работу ежегодная конференция “Современное развитие магнитного резонанса 2025”. В рамках Недели науки также состоялась церемония вручения премии имени Е. К. Завойского. Председатель международного комитета премии Кев Минуллин Салихов объявил лауреата 2025 года – заместителя министра образования КНР, профессора Цзяньфэна Ду (Китайский научно-технологический университет).

Устные заседания конференций проходили в смешанном формате, предоставляя возможность онлайн-участия учёным из России и других стран. Стендовые сессии были организованы в очном формате.

Всего в мероприятиях Недели науки города Казани приняло участие около 700 докладчиков, включая как ведущих специалистов, так и молодых учёных, а также около 200 слушателей – студентов казанских вузов. Среди участников были ведущие учёные из стран Европы и Азии. Наиболее представительная делегация прибыла из Китайской Народной Республики (около 30 человек). Также в работе приняли участие около 10 учёных из Азербайджана, Беларуси, Португалии, США, Узбекистана, Франции и Японии. География российских участников была обширной: в Казань приехали исследователи из более чем двадцати городов. Наиболее многочисленные делегации прибыли из Москвы, Нижнего Новгорода,



Двери ИТ-парка им. Башира Рамеева открыты для науки: здесь проходили ключевые события Недели науки города Казани.



Почётные участники церемонии открытия Недели науки города Казани Л. Р. Фазлеева и Д. А. Таюрский. 22 сентября 2025 г.

Новосибирска, Самары, Саратова, Санкт-Петербурга и Томска. В рамках всех мероприятий было представлено более 400 устных и 200 стендовых докладов.

Мероприятия Недели науки проходили преимущественно на четырёх площадках. Церемония открытия состоялась в ИТ-парке имени Башира Рамеева под председательством директора ФИЦ КазНЦ РАН члена-корреспондента РАН Алексея Алексеевича Калачёва. В церемонии приняли участие высокопоставленные гости, в том числе заместитель Премьер-министра Республики

Татарстан Лейла Ринатовна Фазлеева, вице-президент Академии наук Республики Татарстан Лейсан Рахимовна Абзалилова и первый проректор – проректор по научной деятельности Казанского федерального университета Дмитрий Альбертович Таюрский. Председателем всей Недели науки был директор ФИЦ КазНЦ РАН чл.-корр. РАН А. А. Калачёв.

Проведение столь масштабной Недели науки, объединившей крупную международную конференцию “Передовые лазерные технологии 2025”, церемонию вручения



Работа организационного комитета. Зона регистрации готова к приёму участников Недели науки города Казани. Слева направо: А. Х. Кадикова, Р. Ф. Ликеров, Т. Н. Энедерева, Е. О. Кудрявцева, М. А. Садовникова, Л. И. Савостина.



Конференцию “Передовые лазерные технологии 2025” открывает научный руководитель Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН академик РАН И. А. Щербаков. 22 сентября 2025 г.

международной премии имени Е. К. Завойского и другие события, способствовало повышению авторитета Казани и Республики Татарстан как ведущего центра современных научных исследований, а также популяризации достижений отечественной науки.

Тематика конференций отличалась большим разнообразием.

В рамках конференции “Передовые лазерные технологии 2025” работали следующие секции:

- Взаимодействие лазерного излучения с веществом
- Биомедицинская фотоника
- Лазерные системы и материалы
- Лазерная диагностика и спектроскопия
- Нелинейная и терагерцовая фотоника
- Фотоника и квантовые технологии
- Нанопотоника

В рамках конференции “Современное развитие магнитного резонанса 2025” обсуждались:

- Достижения в теории и инструментарии магнитного резонанса
- Современные методы магнитного резонанса
- Низкоразмерные системы, наносистемы и молекулярные магнетики
- Обработка информации на основе спинов и оптические квантовые технологии
- Сильнокоррелированные электронные системы
- Химические и биологические системы
- Дефекты и спиновые кубиты
- Магнитно-резонансная томография и приложения в медицинской физике

В программу конференции “Сверхпроводимость в наноструктурах 2025” были включены следующие секции:

- Сильно неупорядоченные сверхпроводники, топологические изоляторы и сверхпроводники, гибридные сверхпроводящие структуры на основе двумерных слоёв
- Зарядовая и спиновая динамика в гибридных сверхпроводящих структурах
- Сверхпроводящие квантовые технологии
- Сверхпроводящие генераторы и детекторы излучения

Тематика пленарных лекций охватывала наиболее актуальные вопросы соответствующих областей исследований.

В рамках конференции “Передовые лазерные технологии 2025” были представлены следующие пленарные доклады: Valery Tuchin (Saratov University, FRC “Saratov Scientific Centre of RAS”) “Benefits of optical imaging and phototherapy through tissue optical clearing”, Dmitry Khokhlov (Lomonosov Moscow State University, Lebedev Physical Institute of RAS) “Photoconductivity in HgCdTe-based topological insulators induced by terahertz laser radiation”, Sergey Moiseev (Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI) “Photon echo quantum memory: traditional and new approaches to implementation”, Anna Paterova (South Ural State University) “Infrared metrology based on quantum interferometry”, Yury Kulchin (Far Eastern Branch of RAS) “Light as a factor in controlling plants growth and development”, Alexander Sergeev (National Center for Physics and Mathematics) “Physics of extreme light fields”, Anna Rodina (Ioffe Institute of RAS) “Colloidal quantum dots as lasing material: optical gain vs nonradiative recombination”, Alexey Kucherik (Vladimir State University) “Linear carbon chains: properties, synthesis, prospective applications in photonics and optoelectronics”. В рамках конференции “Современное развитие магнитного резонанса 2025”, помимо доклада лауреата международной премии им. Е. К. Завойского профессора Цзяньфэн Ду на тему “Electron spin resonance from spin ensemble to single spin”, в разные дни конференции были представлены девять пленарных докладов: Sergey Demishev (Vereshchagin High Pressure Physics Institute of RAS) “New type of Griffiths phase with enhanced ferromagnetic interaction. The breaking of the universal paradigm”, Elena Bagryanskaya (N. N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry SB RAS) “EPR study of pH in living cells using spin labels based on triarylmethyl radicals”, Sergey Nikitov (Kotel’nikov Radioengineering and Electronics Institute of RAS, Moscow Institute of Physics and Technology) “Antiferromagnetic spintronics and magnonics”, Matvey Fedin (International Tomography Center SB RAS) “EPR of nanoporous materials: new applications”, Tatyana Polenova (University of Delaware, USA) “Magnetic resonance and integrative structural biology, outside and inside Mammalian cells”, Alexander Smirnov (P. L. Kapitza Institute for Physical Problems RAS) “Spin excitations in ordered XXZ-chain system CS_2COCl_4 ”, Kev Salikhov (Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS) “Nuclear hyperpolarization



Конференцию “Современное развитие магнитного резонанса 2025” открывает научный руководитель Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН академик РАН К. М. Салихов. 29 сентября 2025 г.

in electron transfer in chiral”, Gareth Eaton (University of Denver, USA) “Comparison of electron spin relaxation and pulse turning angles of lanthanide complexes with differing coordination numbers”, Alexandra Yurkovskaya (International Tomography Center, SB RAS) “High-resolution NMR and nuclear spin hyperpolarization with fast field cycling”.

Многие ведущие специалисты в области лазерной физики, фотоники, квантовых технологий, магнитного резонанса, спиновой химии и физики магнитных явлений со всего мира выступили в качестве приглашённых докладчиков. Собрать их всех одновременно было сложной задачей из-за плотного графика учёных такого уровня. Однако несомненным остаётся тот факт,



Команда организаторов. Локальный комитет Недели науки города Казани. Нижний ряд слева направо: М. А. Садовникова, А. Х. Кадикова, средний ряд слева направо: Е. Е. Батуева, А. С. Морозова, Д. Е. Железнякова, верхний ряд слева направо: А. А. Камашев, Р. Ф. Ликеров.



Победители в номинации для молодых учёных “Лучший стендовый доклад” в рамках конференции “Передовые лазерные технологии 2025”. Слева направо: А. Д. Григорьева, В. А. Домакова с директором ФИЦ КазНЦ РАН А. А. Калачёвым.

что очное присутствие, живое общение и возможность продолжать дискуссию в течение всего периода проведения конференции в большей степени способствуют формированию долгосрочных партнёрских отношений и плодотворного научного сотрудничества. Именно в этом пространстве личных встреч, свободного обмена мнениями и невербальной коммуникации зарождается то самое профессиональное взаимопонимание и творческая химия, которые впоследствии превращаются в прочные научные связи, совместные гранты и инновационные разработки, определяющие прогресс в науке на годы вперёд.

В 2025 году в рамках конференций “Передовые лазерные технологии 2025” и “Современное развитие магнитного резонанса 2025” были отобраны лучшие стендовые доклады среди работ молодых учёных. Лауреатами в рамках конференции “Передовые лазерные технологии 2025” были выбраны Vera Domakova (ITMO University) с докладом “Glass marking by combining laser-induced backward transfer (LIBT) and laser-induced periodic surface structures (LIPSS) via nanosecond IR laser”, Ksenia Bylinskaya (Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics) с докладом “Multimodal assessment of microcirculatory parameters using optical diagnostics techniques”, Veronika Grigorieva (Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry) с докладом “Low-thermal-gradient Czochralski growth of nonlinear $(\text{Li,Na})_6\text{Mo}_9\text{O}_{30}$ crystals”. В рамках стендовой сессии конференции “Современное развитие магнитного резонанса 2025” были также отобраны три лучших работы. Лауреатами стали Anelia Kadikova (Kazan Federal University) с работой “Inverse spin-hall effect and structural phase transitions in $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Mn}_x\text{Pt}_{1-x}$ bilayers”, Nikolay Nefediev (Alferov University) с работой “Application of convolutional neural network to improve the efficiency of

tumor segmentation in prostate MRI” и Bulat Mukhamadullin (Kazan Federal University) с работой “Monitoring of nanoparticles nucleation in capillary system using ^1H NMR”.

Неделя науки города Казани полностью соответствовала целям и задачам Десятилетия науки и технологий в Российской Федерации. В рамках мероприятия были успешно реализованы ключевые инициативы:

- Поддержка и привлечение молодёжи в науку: была создана система льгот и привилегий (включая финансовые, организационные и образовательные) для молодых исследователей, докладчиков и участников, направленная на снижение барьеров для входа в научную сферу и формирование нового поколения учёных.
- Интеграция науки, власти и общества: для решения стратегически важных задач страны и региона было организовано тесное взаимодействие между научным сообществом, представителями Правительства, Министерства образования и науки, а также Академии наук Республики Татарстан. Это способствовало выработке практико-ориентированных решений и укреплению связей между фундаментальной наукой и реальным сектором экономики.
- Популяризация науки и повышение её узнаваемости: мероприятие достигло широкого охвата аудитории благодаря публичным лекциям ведущих российских и зарубежных учёных, а также активному освещению в федеральных и региональных СМИ. Эта работа была направлена на повышение информированности общества о достижениях отечественной науки и формирование позитивного образа исследовательской деятельности.

Проведение столь масштабного мероприятия на высоком уровне было бы невозможно без помощи и поддержки



Победители в номинации для молодых учёных “Лучший стендовый доклад” в рамках конференции “Современное развитие магнитного резонанса 2025”. Слева направо: А. Х. Кадикова, Н. А. Нефедьев, Б. М. Мухамадуллин с руководителем КФТИ им. Е. К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН С. М. Хантимеровым.

партнёров и спонсоров Недели науки города Казани. Организаторы конференции выражают искреннюю благодарность Министерству науки и высшего образования РФ, Министерству образования и науки РТ, Российской академии наук, Академии наук РТ, Казанскому федеральному университету, ООО “Авеста”, ООО “Специальные Системы. Фотоника”, компании Solar Laser System, АО “ЛЛС”, компании SLS Prime Technology, компании “ЭЛЕМЕНТ”, ООО “Лакопа”, Центру технического сопрово-

ждения “НАУКА” и Федеральному исследовательскому центру “Казанский научный центр Российской академии наук” за оказанную поддержку.

Организаторы уверены, что мероприятия Недели науки города Казани внесли существенный вклад в осмысление и решение актуальных научных задач. Ключевые проблемы современных областей были всесторонне обсуждены на пленарных, устных и стендовых заседаниях при активном участии всех участников конференции.

Т. П. Гаврилова

Признание заслуг

Государственные и ведомственные награды

Почётное звание “Почётный работник науки и высоких технологий Российской Федерации” присвоено: главному научному сотруднику **Воронковой Виолете Константиновне**, ведущему научному сотруднику **Таланову Юрию Ивановичу** и руководителю КФТИ **Хантимерову Сергею Мансуровичу**. Награды вручили директор

Департамента координации деятельности научных организаций Кира Алексеевна Швед (Воронковой В.К. и Хантимерову С.М. – на праздновании 80-летия ФИЦ КазНЦ РАН) и директор ФИЦ КазНЦ РАН Алексей Алексеевич Калачёв (Таланову Ю.И. и Тагирову Л.Р. (награда 2024 года) – на открытии Недели науки Казани 2025).

Директор Департамента координации деятельности научных организаций К. А. Швед вручает награды сотрудникам института.

Директор ФИЦ КазНЦ РАН А. А. Калачёв вручает награды сотрудникам института.



В. К. Воронкова



С. М. Хантимеров



Л. Р. Тагиров



Ю. И. Таланов

Благодарность Кабинета Министров Республики Татарстан вручена ведущему научному сотруднику **Шахмуратову Рустэму Назимовичу** (награда 2024 года), старшему научному сотруднику **Хайбуллину Рустаму Ильдусовичу** и ведущему научному сотруднику **Сулейманову Наилу Муратовичу**. Шахмуратов Р.Н. получил награду из рук заместителя премьер-министра РТ Лейлы Ринатовны

Файзлеевой на церемонии открытия Недели науки города Казани 2025, Хайбуллин Р.И. – от руководителя института С. М. Хантимерова на новогоднем заседании Учёного совета. Сулейманову Н.М. награду вручил директор ФИЦ КазНЦ РАН А. А. Калачёв на итоговой конференции, приуроченной ко Дню российской науки.



Заместитель
премьер-министра
РТ Л. Р. Фазлеева
вручает награду
Р. Н. Шахмуратову.



Директор
ФИЦ КазНЦ РАН
А. А. Калачёв
вручает награду
Н. М. Сулейманову.



Руководитель КФТИ С. М. Хантимеров поздравляет сотрудников института с получением наград. Слева направо: Р. И. Хайбуллин, С. М. Хантимеров, А. Л. Степанов, Г. С. Шакуров.

Государственной медали Республики Татарстан “За доблестный труд” удостоен главный научный сотрудник **Гарифуллин Ильгиз Абдулсаматович**. **Благодарность Министерства науки и высшего образования РФ** объявлена главному научному сотруднику **Гайнутдинову Халилу Латыповичу** и ведущему научному сотруднику **Шакурову Гильману Султановичу**.

Знаком отличия “Отличник сферы науки и образования” (Минобрнауки РТ) награждены: старший научный сотрудник **Фалин Михаил Леонидович**, главный специалист **Хамидуллин Булат Шавкатович**, научный сотрудник **Шустов Владимир Алексеевич**, ведущий научный сотрудник **Степанов Андрей Львович**.

Руководитель ФИЦ КазНЦ РАН А. А. Калачёв вручает награды сотрудникам института.



Х. Л. Гайнутдинов



Б. Ш. Хамидуллин



М. Л. Фалин



В. А. Шустов

Муниципальные награды Казани

Почётная грамота Казани вручена заведующей канцелярией Куркиной Нине Георгиевне (за многолетний добросовестный труд).

Благодарности Мэра Казани удостоены секретарь руководителя Губайдуллина Альфия Закировна и ведущий экономист Ахметгалиева Алла Михайловна.

Знака отличия “За безупречную службу Казани” удостоена Мосина Ляйля Васильевна.

Признание коллег

Президиум ФИЦ КазНЦ РАН выражает искреннюю благодарность **Андреевой Алле Ивановне** – за многолетний добросовестный труд, чуткое отношение к сотрудникам и неоценимый вклад в сохранность материальных ценностей института на протяжении более чем полувека.

Руководитель ФИЦ КазНЦ РАН А. А. Калачёв поздравляет сотрудниц института.



Н. Г. Куркина



А. З. Губайдуллина



А. М. Ахметгалиева



А. И. Андреева

Государственной награды Республики Татарстан – медали “За доблестный труд” в 2024 году был удостоен главный научный сотрудник В. Ф. Тарасов. Награда вручена в 2025 году.

Награду В. Ф. Тарасову
вручает Раис Республики Татарстан
Р. Н. Минниханов.



ФИЦ КазНЦ РАН и ННГУ им. Н. И. Лобачевского договорились о сотрудничестве

В начале апреля 2026 года Федеральный исследовательский центр “Казанский научный центр РАН” и Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского подписали Соглашение о сотрудничестве.

Документ предусматривает совместную работу в нескольких ключевых формах:

- проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ;
- организация конференций, семинаров и создание рабочих групп;
- обмен информацией и консультации по актуальным научно-техническим проблемам.

Проректор по науке и инноваци-
ям ННГУ им. Н. И. Лобачевского
М. Ю. Грязнов (слева)
и директор ФИЦ КазНЦ РАН
А. А. Калачёв (справа).





Слева направо: учёный секретарь ФИЦ КазНЦ РАН С. А. Зиганшина, советник директора ФИЦ КазНЦ РАН А. В. Новиков, представитель бизнеса, директор ФИЦ КазНЦ РАН А. А. Калачёв, проректор по науке и инновациям ННГУ им. Н. И. Лобачевского М. Ю. Грязнов, советник при ректорате ННГУ им. Н. И. Лобачевского А. М. Усманов, директор Научно-исследовательского института химии ННГУ им. Н. И. Лобачевского Е. В. Сулейманов, руководитель лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН А. А. Камашев, декан физического факультета ННГУ им. Н. И. Лобачевского А. И. Малышев, представитель бизнеса.

Основные направления сотрудничества охватывают передовые области науки и технологий:

- квантовые и информационные технологии;
- оптические сенсоры;
- инновации и коммерциализация технологий;
- материаловедение: кристаллические материалы фотоники и радиофотоники; композиционные материалы;

- высокоэффективная и ресурсосберегающая энергетика;
- образовательные программы и академический обмен.

Координацию работы по всем направлениям со стороны ФИЦ КазНЦ РАН будут осуществлять специалисты Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского.

ВАЖНЕЙШИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГОДА

Важнейшие результаты исследований 2025 года

1.

Дальнейшее развитие парадигмы спинового обмена и его проявления в ЭПР спектроскопии в разбавленных растворах парамагнитных частиц

Обменное взаимодействие при бимолекулярных столкновениях парамагнитных частиц вызывает ряд процессов: декогеренцию спинов со скоростью $V_{\text{ex}} = K_{\text{ex}}C$ (C – концентрация радикалов, K_{ex} – константа скорости декогеренции) перенос квантовой когерентности (отдача) от партнёра по столкновению ($V_{\text{ex,сст}} = K_{\text{ex,сст}}C \equiv qV_{\text{ex}}$) и перенос энергии. Если эти процессы происходят с одинаковой скоростью ($q = 1$), то спиновый обмен называют эквивалентным. Благодаря отдаче спиновой когерентности при случайных столкновениях формируются коллективные моды движения намагниченности спинов. И в эксперименте проявляются резонансные частоты возбуждения именно этих коллективных мод. В 2025 году был проведён детальный анализ проявления неэквивалентности спинового обмена в форме спектров ЭПР.

Для иллюстрации на рис. 1 приведены рассчитанные резонансные частоты и их уширение, вызванные спиновым обменом, для раствора радикалов с одним магнитным ядром.

Из рис. 1 можно сделать следующие заключения:

- Коллапс спектра ЭПР наступает при условии равенства скорости отдачи квантовой когерентности начальному расщеплению двух линий в спектре ЭПР, $qK_{\text{ex}}C = a$.
- В случае неэквивалентного спинового обмена эффект обменного сужения спектра может и не проявляться. На кривых справа видно, что в отличие от ситуации эквивалентного обмена (кривые слева на рис. 1) в условиях коллапса спектра обе линии продолжают уширяться с ростом V_{ex} . В случае неэквивалентного спинового обмена в условиях коллапса спектра одна из линий уширяется с меньшим наклоном, чем другая (ср. рис. 1а, б).

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

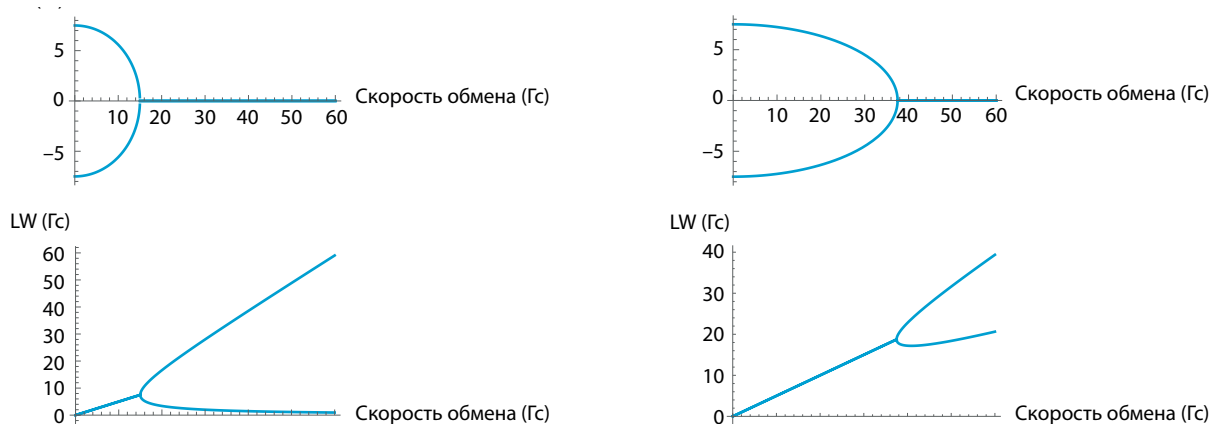


Рис. 1. Зависимость уширения линий и резонансных частот от скорости спинового обмена для эквивалентного обмена ($q = 1$, кривые слева) и неэквивалентного обмена ($q = 0.4$, кривые справа).

Публикации:

1. Salikhov K.M.: Widespread model (paradigm) of spin exchange and its manifestation in EPR spectroscopy in dilute solutions of radicals // Appl. Magn. Reson. **56**, 1077–1097 (2025), doi: 10.1007/s00723-025-01789-6
2. Salikhov K.M.: Further development of new paradigm of the spin exchange and its manifestations in EPR spectroscopy in dilute solutions of radicals // Appl. Magn. Reson. **56**, 1099–1130 (2025), doi: 10.1007/s00723-025-01792-x
3. Khairutdinov I.T., Salikhov K.M., Bakirov M.M., Zaripov R.B.: Mixed shape of EPR spectrum lines under conditions of slow spin exchange // Appl. Magn. Reson. **56**, 1145–1153 (2025), doi: 10.1007/s00723-025-01787-8

Исследования проводились в рамках выполнения государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН “Разработка физических основ, материалов и элементной базы квантовых оптических и спиновых технологий”, руководитель А. А. Калачёв, № 125031903980-3.

Приоритетные направления ПФНИ: 1.3.2.2 Структурные исследования конденсированных сред, связь структуры и свойств; 1.3.2.3. Физика магнитных явлений, магнитные материалы и структуры, спинтроники.

2.

Новая структура сверхпроводящего спинового клапана с управляемым эффектом близости сверхпроводник/ферромагнетик

Создана и исследована новая структура сверхпроводящего спинового клапана (ССК) типа Ф1/И/С/И/Ф2 (рис. 1). Ключевой особенностью конструкции является целенаправленная модификация границы раздела сверхпроводник/ферромагнетик (С/Ф) с помощью ультратонких диэлектрических прослоек (И), что позволяет управлять параметром прозрачности и, как следствие, эффектом близости С/Ф. Были исследованы структуры ССК Fe/Si₃N₄/Pb/Si₃N₄/Fe, где варьировалась толщина как сверхпроводящих (Pb), так и изолирующих (Si₃N₄) слоёв. Проведённая оптимизация этих толщин позволила достичь полного переключения между нормальным и сверхпроводящим состояниями при изменении взаимной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоёв с антипараллельной на параллельную. Максимальная величина эффекта ССК составила 0.36 К (рис. 2). Важнейшим достижением является то, что этот значительный эффект наблюдается в относительно малом внешнем магнитном поле величиной 1 кЭ, что выгодно отличает предложенную структуру от известных аналогов. Полученные результаты открывают возможности для разработки новых энергоэффективных спинтронных устройств.

Авторы: Камашев А.А., Гарифьянов Н.Н., Валидов А.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Осин А.С., Фоминов Я.В. (ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН), Гарифуллин И.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН)

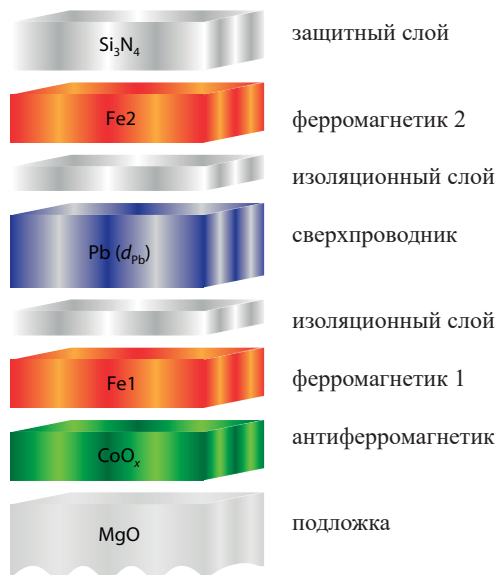


Рис. 1. Структура приготовленных образцов CoO_x (3.5 нм)/Fe (3 нм)/[Si₃N₄/Pb/Si₃N₄]/Fe (3 нм)/Si₃N₄ (85 нм). Толщина слоя Pb (*d_{Pb}*) варьировалась от 40 до 60 нм, а толщины прилегающих слоёв Si₃N₄ (*d_{Si3N4}*) – от 0 до 1.2 нм.

Публикация:

- Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A., Osin A.S., Fominov Ya.V., Garifullin I.A.: Superconducting spin valve effect in Fe/Si₃N₄/Pb/Si₃N₄/Fe heterostructures // Phys. Rev. B **112**, 134509 (2025), doi: 10.1103/647c-6xj4

Исследования проводились в рамках выполнения грантов РНФ № 21-72-20153-П “Исследование особенностей сверхпроводимости, магнетизма и топологических эффектов в квантовых материалах” (рук. Ю. И. Таланов), РНФ № 25-72-10025 “Поиск и разработка оптимальных конструкций сверхпроводящего спинового клапана” (рук. А. А. Камашев) и государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН “Физика функциональных материалов и гибридных

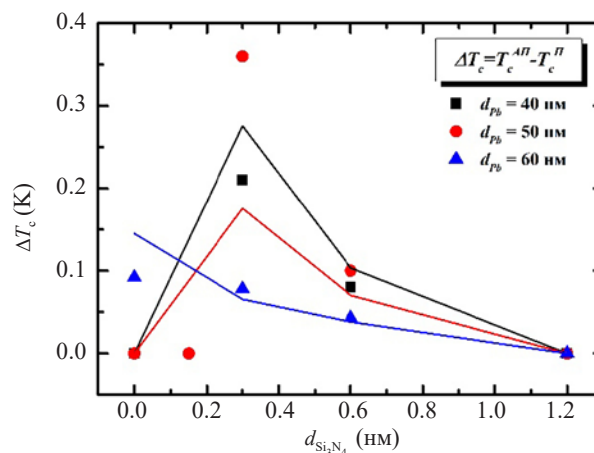


Рис. 2. Зависимость величины эффекта ССК ΔT_c от толщины слоёв Si₃N₄ (*d_{Si3N4}*) для трёх серий образцов. Сплошные линии – теоретические кривые, рассчитанные согласно теории Фоминова и др. для структур ССК модели Ф1/С/Ф2.

мезоскопических структур для микроэлектроники, энергетики и информационных технологий” (рук. Л. Р. Тагиров).

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

3.

Экспериментально доказано, что формирование локализованного триплетного состояния, индуцированного рекомбинацией зарядов, вблизи триплета с разделёнными зарядами повышают эффективность наблюдения термически активированной задержанной флюоресценции (TADF) в донорно-акцепторных диадах.

Донорно-акцепторные диады (D-A) демонстрирующие свойство TADF, считаются перспективными для применения в органических светодиодах (OLED) что требует детального понимания механизмов TADF. В 2016 году было предложено, что для реализации TADF в D-A диадах необходимо участие трёх состояний: излучательное состояние 1CS, тёмное состояние 3CS и локализованное на хромофоре состояние 3LE, которое необходимо для опосредования перехода из состояния 3CS в излучательное состояние 1CS. Мы первые в 2019 году наблюдали одновременно спектры от двух триплетов и инверсию поляризации электронных спинов триплета с разделёнными зарядами в TADF диадах. В 2025 году методом

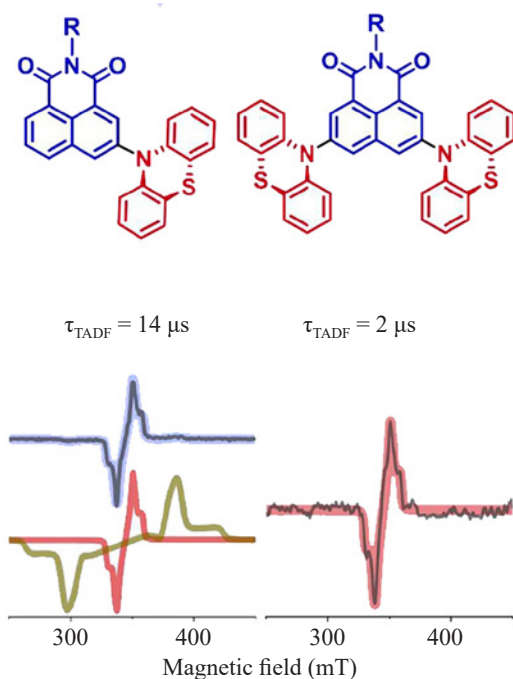


Рис. 1. Химические структуры диад и ВР ЭПР спектры.

ВРЭПР выполнено детальное исследование ряда TADF излучателей на основе новых компактных D-A диад, показано, что спектры ВРЭПР являются суммой спектров двух триплетов, вклады от которых изменяются от состава диад, увеличение вклада от локализованного триплета коррелирует с увеличением времени TADF. Впервые показана роль механизма формирования локализованного триплета на эффективность TADF. Наблюдаемая инверсия электронной спиновой поляризации состояния 3CS при длительных задержках и зависимость эффекта от температуры являются убедительным и прямым экспериментальным доказательством механизма спин-вибронной связи TADF.

Авторы: Суханов А.А., Мамбетов А.Е., Воронкова В.К. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Zhao J. (Dalian University of Technology, Dalian, China)

Публикации:

1. Ye K., Sukhanov A., Pang Yu., et al.: Time-resolved transient optical and electron paramagnetic resonance spectroscopic studies of electron donor-acceptor thermally activated delayed fluorescence emitters based on naphthalimide-phenothiazine dyads // PCCP **27** (2), 813 (2025), doi: 10.1039/D4CP03629H
2. Pei Yuying, Sukhanov A.A., et al.: The photophysics of naphthalimide-phenoselenazine electron donor-acceptor dyads: Revisiting the heavy-atom effect in thermally activated delayed fluorescence // Chemistry – A European Journal, **31**, e202403542 (2025), doi: 10.1002/chem.202403542
3. Pei Y., Bussotti L., Liu X., Sukhanov A.A., et al.: Study of the thermally-activated delayed fluorescence (TADF) mechanism of phenothiazine dibenzothiophene-S,S-dioxide electron donor acceptor dyads using steady-state and time resolved optical and electron paramagnetic resonance spectroscopies // Chem. Sci. **16**, 19737–19751 (2025), doi 10.1039/D5SC03644E

Исследования проводились в рамках выполнения госзадания.

Приоритетное направление ПФНИ: 1.3.2.12.

4.

Концептуальные сценарии (парадигма) модификации поверхности германия вследствие её распыления и набухания при ионном облучении

Предложена классификация концептуальных сценариев (парадигма) модификации поверхности Ge, сопровождающейся порообразованием при высокодозовом ионном облучении и вызываемой конкурирующими процессами распыления и набухания материала. Предложенная парадигма ситуационного поведения (концептуальных сценариев) на примере облучаемого Ge может быть рассмотрена и применена к широкому классу полупроводниковых материалов (GaN, GaAs, GaSb, Si и др.), также

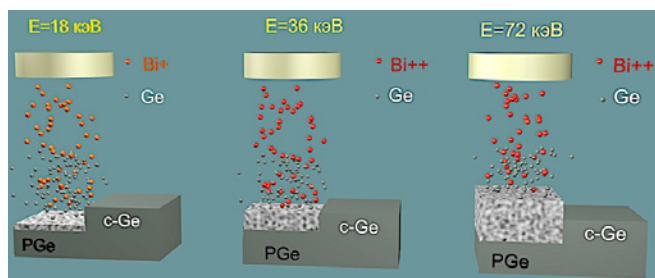


Рис. 1. Примеры сценариев изменения уровня модифицируемой поверхности c-Ge при порообразовании (PGe) во время облучения ионами Bi с различными энергиями.

демонстрирующих порообразование на своей поверхности при ионном облучении.

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

Публикации:

1. Stepanov A.L., Faizrahmanov I.A., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Rogov A.M., Konovalov D.A.: Thin germanium films created by ion-assisted stimulating deposition for formation of nanoporous layers // *Appl. Phys. A* **131**, 647 (2025), doi: 10.1007/s00339-025-08773-8
2. Степанов А.Л., Рогов А.М., Сотникова В.Ф., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Коновалов Д.А.: Концептуальные сценарии модификации поверхности германия вследствие распыления и набухания при низкоэнергетическом ионном облучении // *ЖТФ* (2025) в печати.
3. Stepanov A.L.: Applications of nanoporous germanium layers formed by metal-ion implantation / Chapter in the Book: Dynamics at the surface: Leveraging interactions of ions and electrons with materials for nanotechnology // Apple Academic Press (2025) in press.

Исследования проводились в рамках выполнения гранта РФФИ № 25-29-00022 (рук. Степанов А.Л.) и госзадания ФИЦ КазНЦ РАН “Физика функциональных материалов и гибридных мезоскопических структур для микроэлектроники, энергетики и информационных технологий”, руководитель Л. Р. Тагиров, № 125031903979-7.

Приоритетное направление ПФНИ: 1.3.2.6. Физика поверхности, границ раздела и других протяжённых дефектов

5.

Методами силовой микроскопии пьезоотклика были изучены свойства новых пьезоэлектрических материалов, полученных на основе дипептидов Phe-Leu и Leu-Phe

Короткоцепные олигопептиды являются перспективными соединениями для разработки биосовместимых органических пьезоэлектрических материалов с использованием стратегии супрамолекулярной химии. Разнообразие аминокислот, доступных человечеству, позволяет конструировать и

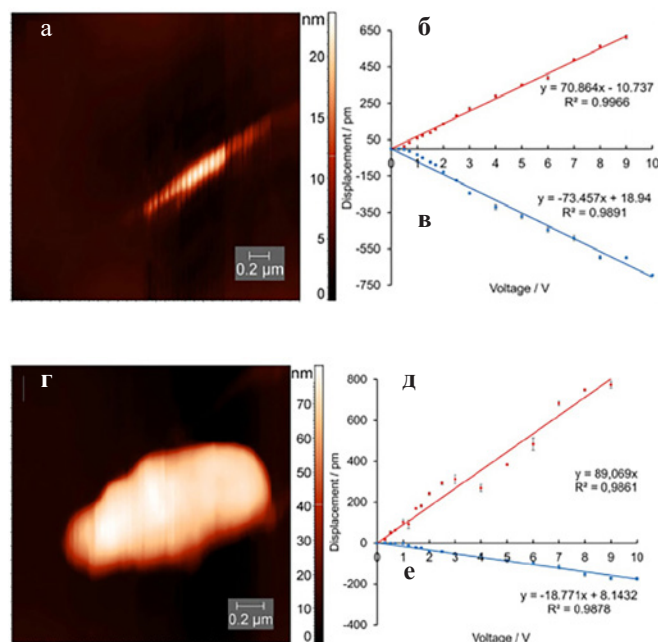


Рис. 1. АСМ-изображения кристаллов (а, г) Phe-Leu и Leu-Phe, корреляции вертикальных (б, д) и боковых (в, е) смещений зонда с приложенным напряжением. Перпендикулярные линии показывают стандартное отклонение измерений.

тонко настраивать множество пьезоэлектрических материалов для различных технологий, включая биомедицину и зелёную энергетику. Однако до настоящего времени пьезоэлектрические свойства таких объектов остаются практически неизученными.

Впервые исследованы микро- и нанокристаллы дипептидов L-фенилаланил-L-лейцин (PheLeu) и L-лейцил-L-фенилаланин (LeuPhe) с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) в режиме силовой микроскопии пьезоотклика. Рассчитаны эффективные пьезоэлектрические коэффициенты для вертикальных и латеральных перемещений, рис. 1. Из графика зависимости вертикального/латерального пьезоотклика от прикладываемого переменного напряжения было вычислено значение эффективного пьезоэлектрического коэффициента как углового коэффициента линейного уравнения, полученного аппроксимацией зависимости: для кристалла PheLeu 71 пм/В для вертикального и –73 пм/В для латерального смещения, рис. 1а–в; для кристалла LeuPhe 89 пм/В для вертикального и –19 пм/В для латерального смещения, рис. 1г–е.

Также предложены методы формирования аморфных плёнок и выращивания кристаллов этих дипептидов требуемого размера. Полученные данные могут быть полезны для разработки пьезоэлектрических устройств на основе дипептидных кристаллов.

Авторы: Морозова А.С., Кудрявцева Е.О., Зиганшина С.А., Курбатова Н.В. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Зиганшин М.А. (КФУ, АН РТ), Бухараев А.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, АН РТ)

Публикация:

- Morozova A.S., Kudryavtseva E.O., Ziganshina S.A., Kurbatova N.V., Ziganshin M.A., Bukharaev A.A.: New piezoelectric materials based on Phe-Leu and Leu-Phe dipeptides // *Applied Materials Today* **42** (2025), doi: 10.1016/j.apmt.2024.10256

Исследования проводились в рамках государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

Приоритетное направление ПФНИ: 1.3.2.2 Структурные исследования конденсированных сред, связь структуры и свойств.

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

1-е место:

- Митюшкин Е.О., Солодов А.Н., Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Никифоров В.Г., Жарков Д.К.: Даун-конверсионная люминесценция наночастиц как способ улучшения эффективности кремниевых солнечных панелей.

2-е место:

- Тарасов В.Ф. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Ерёмин М.В. (КФУ): Эффект магнитоэлектрической невязимности в субмиллиметровой ЭПР-спектроскопии примесных ионов $^{166}\text{Er}^{3+}$ в монокристалле $^7\text{LiYF}_4$.

- Латыпов И.З., Турайханов Д.А., Шкаликов А.В. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Гушин Л.А., Зеленский И.В., Низов В.А., Низов Н.А., Собгайда Д.А., Ахмеджанов Р.А. (ИПФ РАН), Калачёв А.А. (ФИЦ КазНЦ РАН): Источник перепутанных пар фотонов на основе двухрезонаторного ПГС для СКРК с недоверенным узлом на основе твердотельной квантовой памяти.

3-е место:

- Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Рогов А.М., Сотникова В.Ф., Коновалов Д.А.: Вариации изменения поверхности германия при порообразовании во время ионного облучения.

Парадигма в радиационной физике: концептуальные сценарии модификации ионно-облучаемой поверхности германия при порообразовании в зависимости от её распыления и набухания

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

Лаборатория нанооптики и наноплазмоники, лаборатория радиационной физики

Изучено формирование тонких поверхностных нанопористых слоёв Ge (NanoPGe) в процессах ионного распыления и высокодозовой ионной имплантации гладкой монокристаллической подложки *c*-Ge. Облучение проводилось ионами $^{209}\text{Bi}^+$ с энергией $E = 18$ кэВ, а также ионами $^{209}\text{Bi}^{++}$ с $E = 36$ и 72 кэВ при дозах $D = 1.3 \cdot 10^{15} - 1.3 \cdot 10^{17}$ ион/см². Установлено, что в процессе ионного распыления при $E = 18$ кэВ образуются слои Bi:NanoPGe, состоящие из плотно упакованных прижатых друг к другу нанонитей, при этом уровень облучённой поверхности понижается относительно исходного образца до 200 нм. Для более высоких $E = 36$ и 72 кэВ в противоположность ионному распылению с ростом D наблюдается набухание слоёв Bi:NanoPGe, которое приводит к возвышению уровня облучённого участка образца относительно необлучённой поверхности на несколько десятков нанометров. При этом морфология набухших слоёв состоит из более тонких нанонитей, разделённых свободным пространством. Обсуждаются физические концептуальные сценарии взаимодействия ускоренных ионов с плоской поверхностью *c*-Ge, определяющие характер преобразования морфологии и уровня облучаемой поверхности в зависимости от D . Предложена классификация основополагающих концептуальных сценариев (объединённых парадигмой в радиационной физике) модификации поверхности Ge, сопровождающейся порообразованием, при высокодозовом ионном облучении, вызываемой конкурирующими физическими процессами распыления и набухания материала.

Paradigm in radiation physics: conceptual scenarios for modification of the ion-irradiated surface of germanium during pore formation depending on sputtering and swelling

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

Nanooptics and nanoplasmonics laboratory, Laboratory of radiation physics

The formation of thin surface nanoporous Ge (NanoPGe) layers was studied in the processes of ion sputtering and high-dose ion implantation of a smooth monocrystal *c*-Ge substrate. Irradiation was carried out with $^{209}\text{Bi}^+$ ions with an energy of $E = 18$ keV, as well as $^{209}\text{Bi}^{++}$ ions with $E = 36$ and 72 keV at doses $D = 1.3 \cdot 10^{15} - 1.3 \cdot 10^{17}$ ion/cm². It was found that ion sputtering at $E = 18$ keV produces Bi:NanoPGe layers consisting of densely packed nanowires pressed against each other, while the irradiated surface layer level decreases relative to the original sample to 200 nm. For higher $E = 36$ and 72 keV, in contrast to ion sputtering, a swelling process of the Bi:NanoPGe layers was observed with increasing D , leading to an elevation of the irradiated region of the sample relative to the unirradiated surface by several tens of nanometers. The morphology of the swollen layers consists of thinner nanowires separated by free space. Conceptual physical scenarios for the interaction of accelerated ions with a flat *c*-Ge surface are discussed, determining the nature of the transformation of the morphology and level of the irradiated surface in dependence on D . A classification of fundamental conceptual scenarios (united by a paradigm in radiation physics) for Ge surface modification, accompanied by nanopore formation, under high-dose ion irradiation is proposed. Such modifications were caused by the competing physical processes of sputtering and swelling of the material.

Введение

К основным современным ионно-лучевым технологиям относятся методы ионного распыления и травления [1, 2], обработка сфокусированным ионным пучком (ФИП) [3] и ионная имплантация [4–6], основанные на эффектах взаимодействия ускоренных ионов с веществом. Задача ионного распыления и ФИП заключается в модификации материала за счёт локального разрушения и удаления его части путём выбивания атомов из облучаемого поверхностного слоя. Ионная имплантация на начальных этапах своего развития обеспечивала легирование полупроводниковых и металлических матриц различными химическими элементами вплоть до концентраций, превышающих их предел растворимости. В настоящее время функции ионной имплантации значительно расширились, и она успешно применяется для нано- и микроstructuring поверхности, синтеза наночастиц в объёме материала, периодического профилирования и т. д. [7]. При этом достаточно часто оказывается, что процессы, проходящие при ионном распылении и ионной имплантации, по их применимости в научной литературе рассматриваются и обсуждаются отдельно, независимо друг от друга. Однако основа физических явлений, а именно эффекты столкновения и торможения ускоренных частиц с атомами мишени, является единой, а различия радиационных вкладов определяются конкретными условиями и параметрами ионного облучения, такими как энергия (E) и тип иона, доза (D), плотность тока в ионном пучке (J), температура облучаемой подложки, её структура и химический состав и др.

Как было указано, модификация облучаемой поверхности ионным пучком включает процессы взаимодействия между первичными ионами и атомами твёрдой мишени, которые вызывают значительные структурные и композиционные изменения на атомарном масштабе. При столкновении ускоренных частиц с веществом и их торможении происходят потери энергии частицы E , которые обычно описываются двумя основными механизмами. Первый механизм обусловлен ядерными (упругими) столкновениями, при которых энергия первичного иона преобразуется в кинетическую энергию поступательного движения атомов мишени (экранированное кулоновское взаимодействие). Второй механизм неупругих столкновений проявляется при взаимодействии электронов падающего на образец иона с электронами атомов мишени (электронное торможение) [8, 9]. Первый механизм доминирует при относительно низких значениях E (обычно ≤ 300 кэВ). В результате столкновений атомы мишени смещаются из своих равновесных положений. Также образуются вакансии, пары Френкеля и другие структурные дефекты, которые изменяют локальное расположение атомов. Электронное торможение преобладает при более высоких значениях E ионов (при МэВ и выше).

Технически ионное распыление или травление проводятся при достаточно низких значениях E порядка 0.5–30 кэВ [10]. Если рассматривать низкоэнергетическую

ионную имплантацию $E \approx 300$ кэВ, то очевидно, что в диапазоне малых E следует ожидать результатов модификации поверхности аналогичных тем, которые получаются при ионном распылении. Следует отметить, что количество публикаций по вопросам облучения c -Ge с энергиями, достаточно близкими к ~ 30 кэВ, на границе эффектов распыления и доминирующего ионного внедрения, невелико. Поэтому важно выявить все возможные физические концептуальные сценарии взаимодействия ускоренных ионов с плоской поверхностью, приводящие к её модификации, в частности, при нормальном падении на неё первичных ионов. В данном исследовании рассматриваются эффекты модификации облучаемой ионами поверхности образца при комнатной температуре в зависимости от E и D на примере Ge. Особенности матрицы Ge заключаются в том, что при взаимодействии с ионами в определённых условиях может происходить не только её распыление, но и образование распухаемого слоя нанопористого германия (NanoPGe) [11]. Результаты исследования возможных сценариев модификации подложек Ge актуальны, поскольку полученные закономерности и установленные ситуационные изменения поведения могут быть применимы для ряда других полупроводников, например, GaAs [12], InSb [13], GaN [14], GaSb [15] и Si [16], для которых также наблюдалось образование пор на поверхностях в результате ионного облучения.

В настоящей работе представлены новые результаты исследований по модификации поверхности монокристаллической подложки c -Ge в процессе ионного облучения с целью выявления возможных физических сценариев преобразования её морфологии и изменения уровня поверхности (h_{surf}) относительно исходного гладкого образца с ростом D для различных E . В качестве первичных ионов были использованы тяжёлые частицы $^{209}\text{Bi}^+$ и $^{209}\text{Bi}^{++}$ с $E = 18, 36$ и 72 кэВ. Поскольку эти ионы имеют значительную массу и, следовательно, характеризуются малой глубиной проникновения, они способны вызывать значительное разрушение облучаемой мишени. При этом на практике ионы $^{209}\text{Bi}^+$ или их кластеры достаточно часто используются для изучения процессов распыления облучаемых при малых E поверхностей различных полупроводников и металлов, например: Si, GaP, GaAs, GaSb, InAs, InSb, InP, Si, Cu и Au [10, 17–20], а также Ge [10, 20–25]. Отметим, что в конкретном случае химические элементы металлического Bi и полупроводникового Ge характеризуются взаимной нерастворимостью друг в друге [26].

Отдельно отметим, что к настоящему времени ещё не разработаны успешные теоретические модели, объясняющие сложные механизмы формирования NanoPGe при ионном облучении. Поэтому для получения знаний о сопутствующих физических процессах основное внимание на практике уделяется накоплению экспериментальных эмпирических данных, чему и посвящено настоящее исследование.

Методика эксперимента

Для проведения исследований были использованы полированные гладкие подложки *c*-Ge с кристаллографической ориентацией (111) марки ГДГ-45 толщиной 0.7 мм. Облучение подложек было выполнено однозарядными ионами $^{209}\text{Bi}^+$ с $E = 18$ кэВ и D от $2.5 \cdot 10^{16}$ до $1.0 \cdot 10^{17}$ ион/см², а также двухзарядными ионами $^{209}\text{Bi}^{++}$ с $E = 36$ и 72 кэВ с D от $1.3 \cdot 10^{15}$ до $1.3 \cdot 10^{17}$ ион/см², на ускорителе ИЛУ-3 при нормальном угле падения первичных ионов на поверхность *c*-Ge при комнатной температуре подложек. Для сравнительных экспериментов выбор $^{209}\text{Bi}^+$ и $^{209}\text{Bi}^{++}$ был обусловлен максимальным различием соответствующих им E на ускорителе. Величина J в данных экспериментах была задана одинаковой 5 мкА/см². Уровень вакуума в камере ионного ускорения составлял 10^{-5} Торр. Особенности работы ускорителя ИЛУ-3 подробно описаны в работе [11]. С целью определения изменения величины h_{surf} ионное облучение подложек *c*-Ge проводилось через поверхностную маску в виде Cu сетки с размерами квадратных ячеек 40 мкм.

Морфология сформированных поверхностных слоёв наблюдалась и регистрировалась на высокоразрешающем сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Merlin (Carl Zeiss) при заданном ускоряющем напряжении зондирующих электронов 5 кВ и $J = 300$ пА, а также на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) Dimension FastScan (Bruker) методом количественного наномеханического картирования. СЭМ был оснащён детектором дифракции отражённых электронов (ДОЭ) HKL NordLys (Oxford Instruments). Элементный анализ был проведён с помощью энергодисперсионного (ЭДС) спектрометра X-Max (Oxford Instruments) в вакуумной камере СЭМ. При проведении ДОЭ были выбраны следующие режимы: ускоряющее напряжение электронов также 5 кВ, зондовый ток 600 пА, рабочее расстояние между линзой и поверхностью образца 9.6 мм. В ходе электронно-микроскопических наблюдений возможного роста углеводородных наростов на облучаемых поверхностях подложек не обнаружено.

Результаты

Для оценки профилей распределения концентрации примесных атомов в приповерхностной области мишени Ge, облучаемой ионами $^{209}\text{Bi}^+$ и $^{209}\text{Bi}^{++}$ с $E = 18, 36$ и 72 кэВ, была использована компьютерная программа DYNA. Физические принципы расчёта, заложенные в неё, подробно обсуждаются в работе [27]. Данная программа основана на эффектах парных столкновений ускоренных ионов с атомами облучаемой матрицы, которые приводят к динамическому по времени изменению фазового состава облучаемого слоя подложки *c*-Ge, одновременно с учётом её поверхностного распыления. Из расчётных профилей примесных атомов в объёме Ge для различных E (рис. 1) следует, что накопление атомов металла

происходит в приповерхностной области образца от поверхности по статистическому гауссовому распределению концентрации примеси со средним значением их залегания на глубине R_p . При этом разброс залегания примеси от положения максимума R_p определяется величиной ΔR_p . Эффективная толщина облучённого слоя определяется как $h_{\text{Calc}} = R_p + 2\Delta R_p$ [8]. Расчётные параметры для рассматриваемых ионов составили следующие значения: $R_p^{\text{Bi}^+} = 9.3$ нм и $\Delta R_p^{\text{Bi}^+} = 3.2$ нм ($h_{\text{Calc}} = 15.7$ нм для $E = 18$ кэВ); $R_p^{\text{Bi}^{++}} = 14.4$ нм и $\Delta R_p^{\text{Bi}^{++}} = 4.9$ нм ($h_{\text{Calc}} = 24.2$ нм для $E = 36$ кэВ); $R_p^{\text{Bi}^{++}} = 21.8$ нм и $\Delta R_p^{\text{Bi}^{++}} = 7.6$ нм ($h_{\text{Calc}} = 37.0$ нм для $E = 72$ кэВ). Как будет показано далее, значениями h_{Calc} следует характеризовать образцы только на начальном этапе их облучения. Тем не менее, рис. 1 помогает сделать определённые оценки, например, что ионы $^{209}\text{Bi}^{++}$ при $E = 72$ кэВ проникают в Ge на глубину в два раза большую, чем ионы $^{209}\text{Bi}^+$ ($E = 18$ кэВ), однако концентрация примеси $^{209}\text{Bi}^+$ при R_p заметно выше, чем для $^{209}\text{Bi}^{++}$.

Отметим, что наличие Bi во всех облучённых образцах подтверждается ЭДС-измерениями, в спектрах которых присутствует нескольких характеристических линий вблизи 3 и 12 кэВ соответствующего химического элемента. Согласно данным по ДОЭ приповерхностного слоя все сформированные при ионном облучении слои в настоящем исследовании являются аморфными *a*-Ge. ДОЭ-изображение для *c*-Ge, состоящего из чётких контрастных линий Кикучи, соответствующие структуре монокристалла с ориентацией (111), после ионного облучения сменяются дифракционной картиной для поверхностного модифицированного слоя, состоящей из размытых диффузных колец, что указывает на аморфизацию поверхности.

Для характеристики морфологии облучаемой поверхности образцов, сформированных при облучении *c*-Ge ионами $^{209}\text{Bi}^+$ с $E = 18$ кэВ, были проведены СЭМ-наблюдения, результаты которых приведены на рис. 2. В отличие от гладкой поверхности исходной подложки *c*-Ge [25], облучённые слои представляет из себя губчатую

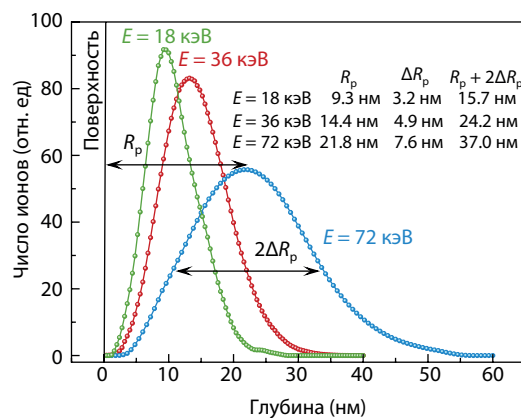


Рис. 1. Рассчитанные профили распределения ионов $^{209}\text{Bi}^+$ и $^{209}\text{Bi}^{++}$ в матрице Ge, при облучении с $E = 18, 36$ и 72 кэВ.

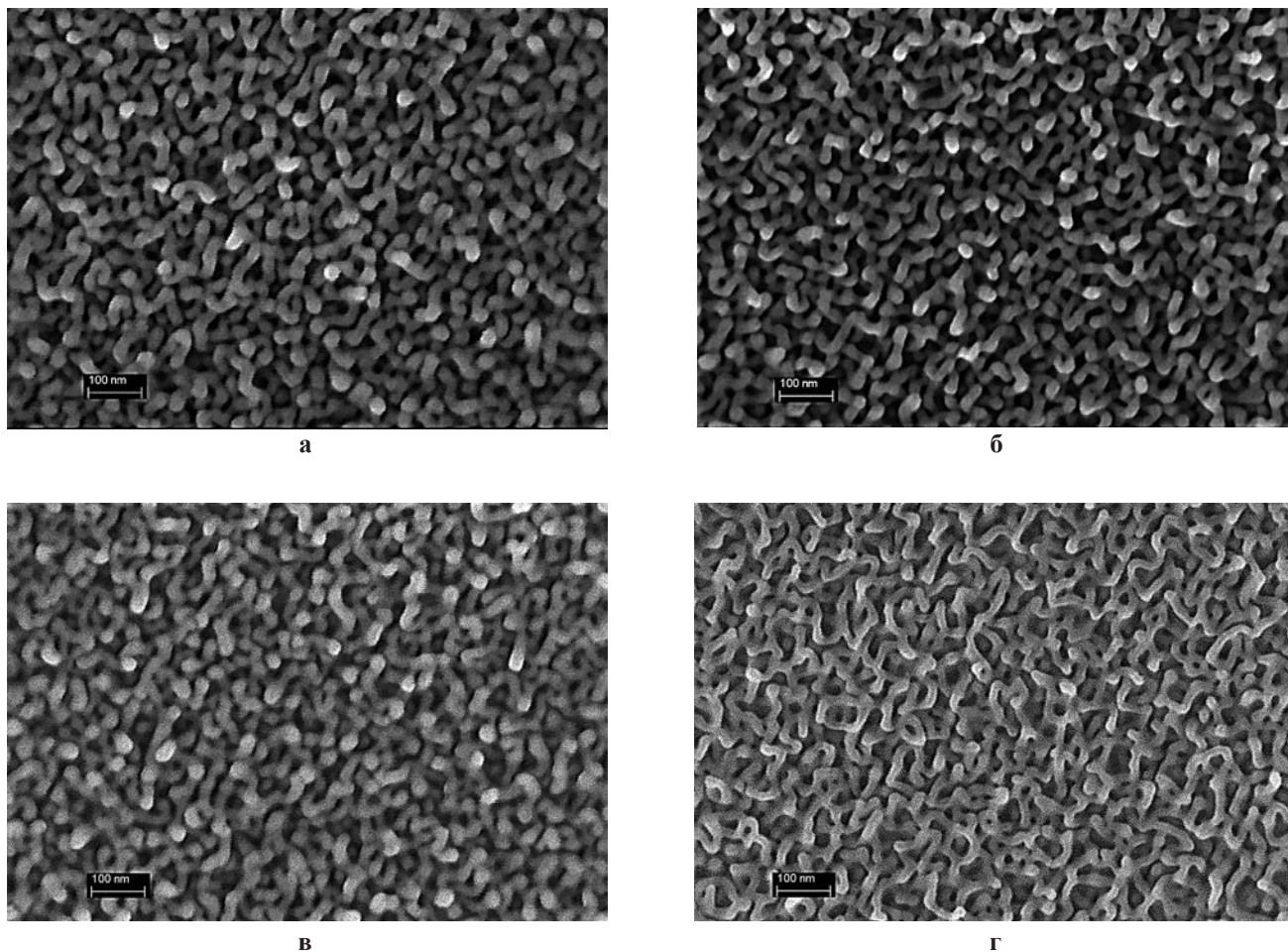


Рис. 2. СЭМ-изображение поверхности *c*-Ge, облучённой ионами $^{209}\text{Bi}^+$ при $E = 18$ кэВ с различными D облучения: $2.5 \cdot 10^{16}$ (а), $5.0 \cdot 10^{16}$ (б), $7.2 \cdot 10^{16}$ (в) и $1.0 \cdot 10^{17}$ ион/см 2 (г).

структуру NanoPGe, состоящую из переплетающихся плотноупакованных нанонитей Ge со средним диаметром $\sim 20\text{--}25$ нм при наименьшем значении $D = 2.5 \cdot 10^{16}$ ион/см 2 (рис. 2а). С ростом D до $1.0 \cdot 10^{17}$ ион/см 2 плотная губчатая структура качественно не изменяется, происходит только небольшое утончение нанонитей на несколько на-

нометров, а свободное пространство между ними слегка увеличивается (рис. 2б–г).

Для оценки изменения профиля поверхности, то есть определения величины h_{surf} на краях областей *c*-Ge, облучаемого через маску ионами $^{209}\text{Bi}^+$ при $E = 18$ кэВ, были проведены СЭМ-наблюдения. В качестве примера

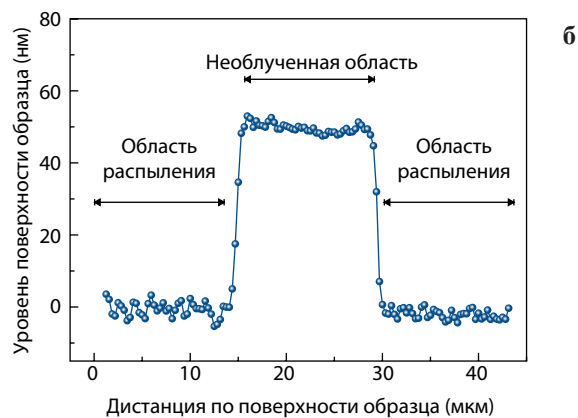
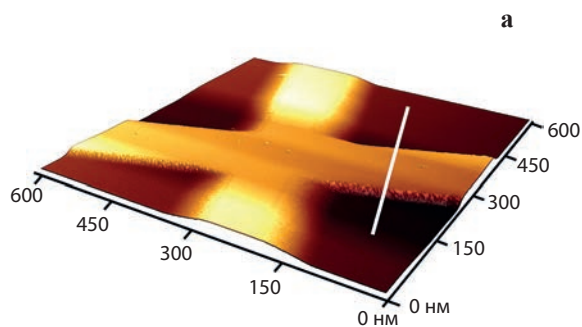


Рис. 3. СЭМ-изображение поверхности *c*-Ge, облучённой ионами $^{209}\text{Bi}^+$ при $E = 18$ кэВ и $D = 2.5 \cdot 10^{16}$ ион/см 2 через маску (а). Профиль, измеренный на краю исходной и распылённой (Bi:NanoPGe) областей на поверхности образца вдоль светлой линии, указанной на СЭМ-изображении (б).

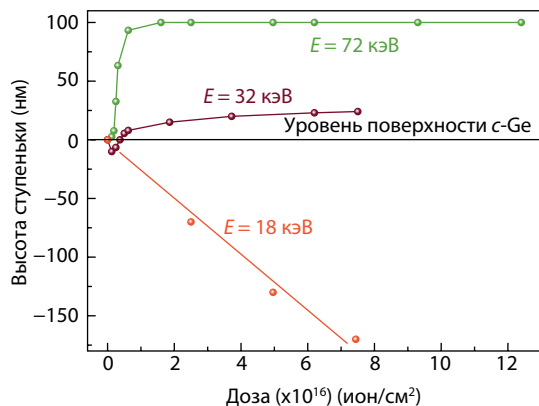


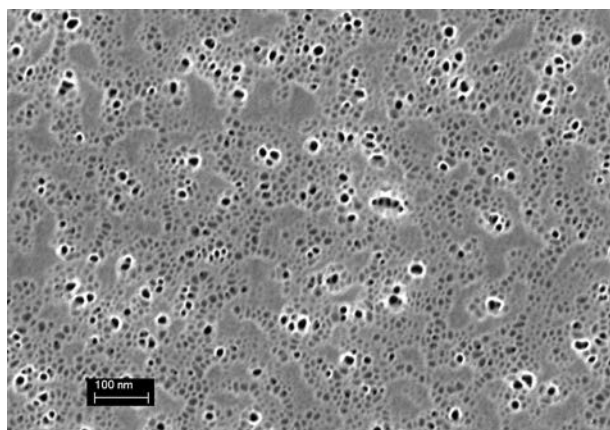
Рис. 4. Зависимость величины h_{surf} от D для поверхности $c\text{-Ge}$, облучённой ионами Bi^+ ($E = 18$ кэВ) и Bi^{++} ($E = 36$ и 72 кэВ). Измеренные экспериментальные значения обозначены точками.

на рис. 3а приведено СЭМ-изображение, сформированное при $D = 2.5 \cdot 10^{16}$ ион/см², на котором светлая область перекрестия на поверхности образца относится к участкам гладкой исходной подложки $c\text{-Ge}$, закрываемой при облучении маской. Из рисунка следует, что при заданных

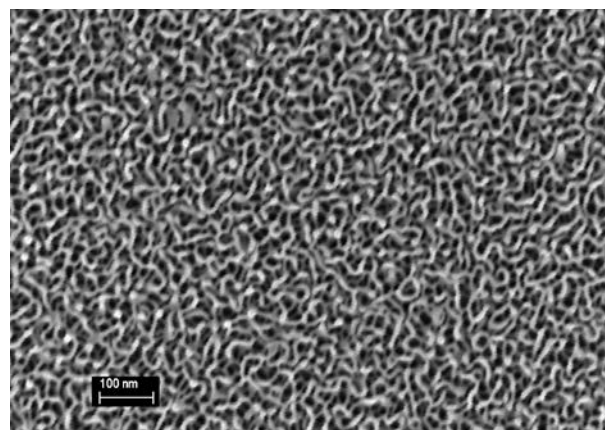
условиях D происходит заметное распыление поверхности образца (тёмные области на образце — Bi:NanoPGe) и образуется понижающая ступенька h_{sputt} . На рис. 3б приведён измеренный профиль в области ступеньки с высотой ($h_{\text{surf}} = h_{\text{sputt}}$) вдоль светлой линии, показанной на СЭМ-изображении (рис. 3а). На рис. 4 (красная кривая) представлена зависимость измеренных величин h_{sputt} от D , из которой следует, что для выбранных условий облучения глубина h_{sputt} практически линейно увеличивается с ростом D . Так, например, для максимального используемого значения $D = 1.0 \cdot 10^{17}$ ион/см² величина h_{sputt} составляет 200 нм.

При облучении подложки $c\text{-Ge}$ ионами $^{209}\text{Bi}^{++}$ с более высокими значениями $E = 36$ и 72 кэВ при $D = 1.0 \cdot 10^{15}$ ион/см² морфология поверхности визуально остаётся неизменной плоской, как у исходной подложки. При более высоких значениях D происходит изменение морфологии поверхности слоёв от плоской до Bi:NanoPGe , что показано на примерах СЭМ-изображений для образцов, сформированных с $E = 36$ кэВ (рис. 5) и $E = 72$ кэВ (рис. 6).

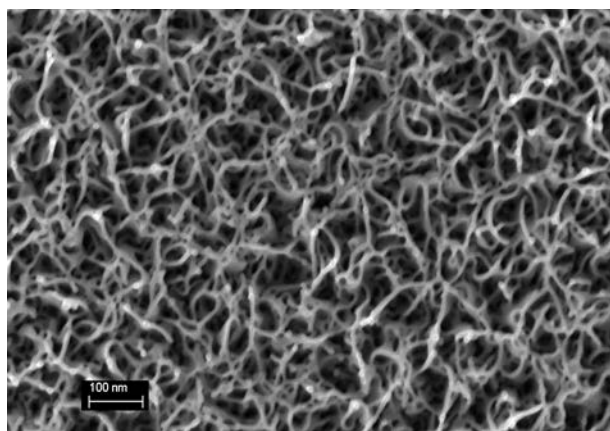
Как следует из СЭМ-изображения (рис. 5а), в случае облучения с $E = 36$ кэВ при несколько более



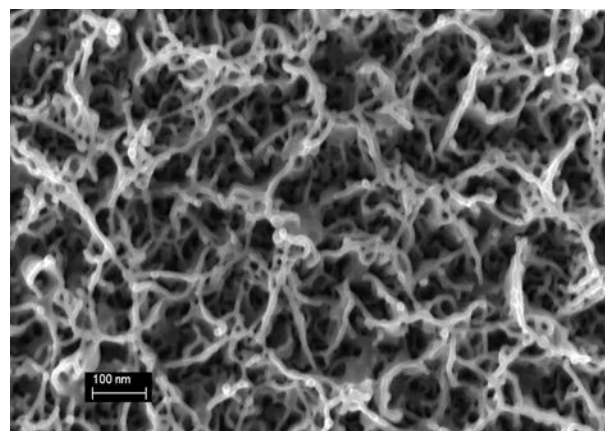
а



б

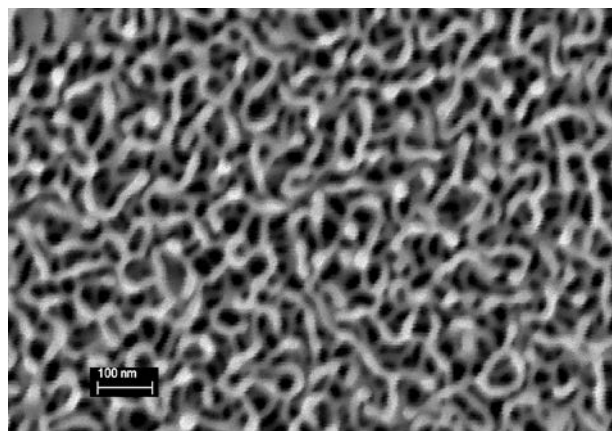


в

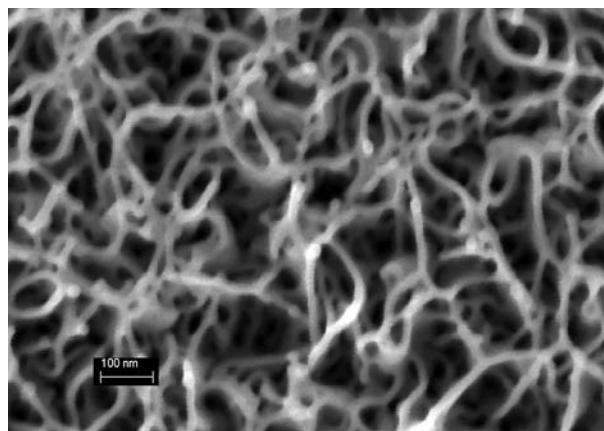


г

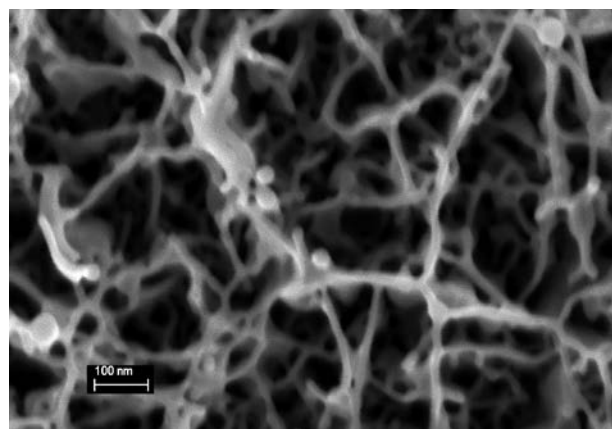
Рис. 5. СЭМ-изображения поверхности $c\text{-Ge}$, имплантированной ионами $^{209}\text{Bi}^{++}$ с $E = 36$ кэВ и различных D : $1.3 \cdot 10^{15}$ (а), $6.2 \cdot 10^{15}$ (б), $5.0 \cdot 10^{16}$ (в) и $1.3 \cdot 10^{17}$ ион/см² (г).



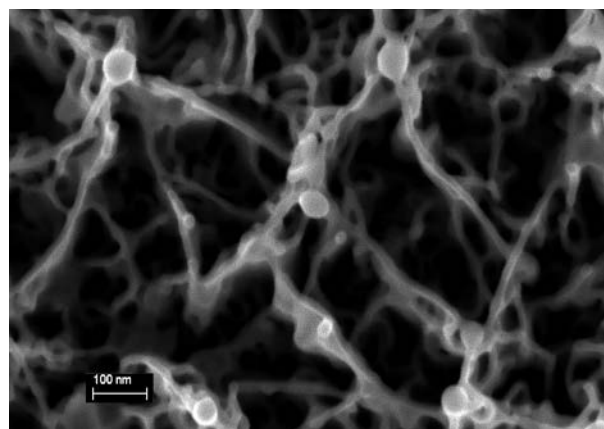
а



б



в



г

Рис. 6. СЭМ-изображения поверхности *c*-Ge, имплантированной ионами $^{209}\text{Bi}^{++}$ с $E = 72$ кэВ и различных D : $1.3 \cdot 10^{15}$ (а), $9.0 \cdot 10^{15}$ (б), $5.0 \cdot 10^{16}$ (в) и $1.3 \cdot 10^{17}$ ион/см² (г).

высоком значении $D = 1.3 \cdot 10^{15}$ ион/см² поверхность образца характеризуется структурой Bi:NanoPGe в виде множества кратеров (открытых пор). При превышении данной величины D поверхность Bi:NanoPGe с кратерами трансформировалась в губчатую структуру, состоящую из тонких переплетённых нанонитей (рис. 5б). Дальнейшее увеличение D до $7.5 \cdot 10^{15}$ ион/см² (рис. 5г) качественно не изменяет морфологию губчатого слоя Bi:NanoPGe. Однако при этом наблюдается заметное утончение нанонитей, сопровождающееся увеличением расстояния между ними и свободного объёма пористого материала. В случае ионного облучения *c*-Ge ионами $^{209}\text{Bi}^{++}$ с $E = 72$ кэВ (рис. 6а) также происходит образование губчатой структуры Bi:NanoPGe, состоящей из нанонитей, но уже при $D = 1.3 \cdot 10^{15}$ ион/см². Увеличение D ($E = 72$ кэВ) приводит к аналогичному изменению морфологии поверхности образца до $D = 1.3 \cdot 10^{17}$ ион/см² (рис. 6г), как и при $E = 36$ кэВ (рис. 5).

Как следует из рис. 5 и 6 для $^{209}\text{Bi}^{++}$, схожие между собой закономерности изменений морфологии поверхности образцов с увеличением до больших значений D ведут себя несколько иначе, чем для случая ионного облучения *c*-Ge при низкой энергии $E = 18$ кэВ, когда

слои Bi:NanoPGe состоят из плотноупакованных нанонитей практически без свободного пространства между ними. Для оценки изменения профиля поверхности также были проведены количественные СЭМ-измерения величины $h_{\text{surf}} = h_{\text{swell}}$ для *c*-Ge, облучённого ионами $^{209}\text{Bi}^{++}$ через маску. На рис. 7а приведён пример СЭМ-изображения участка поверхности образца с распухаемой областью вблизи перекрестия решётки, полученной при $D = 5.0 \cdot 10^{16}$ ион/см² ($E = 72$ кэВ). Из рисунка следует, что при заданных условиях имплантации происходит распухание поверхности образца и образуется возвышающаяся ступенька. На рис. 7б приведён измеренный профиль h_{swell} в области ступеньки вдоль светлой линии, показанной на вставке СЭМ рис. 7а.

На рис. 4 (зелёная кривая) представлена зависимость измеренных величин h_{swell} от D для соответствующих условий облучения *c*-Ge ионами $^{209}\text{Bi}^{++}$ с $E = 72$ кэВ. Из данной зависимости следует, что h_{swell} монотонно увеличивается с ростом D до критического значения $D_{\text{crit}} \sim 6.2 \cdot 10^{15}$ ион/см², при котором h_{swell} достигает 100 нм. При этом очевидно, что скорость роста распухаемого слоя превышает эффективность его распыления. Так же можно предполагать, что коэффициент распыления

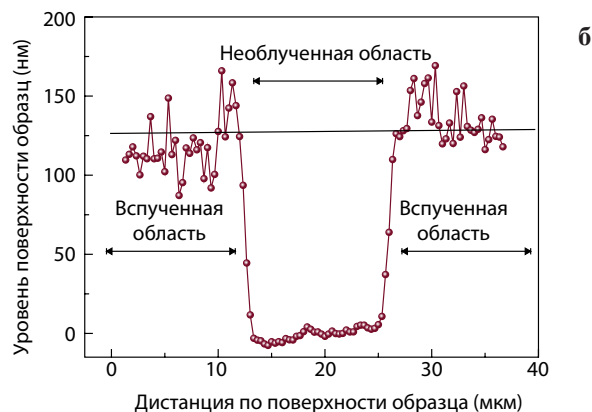
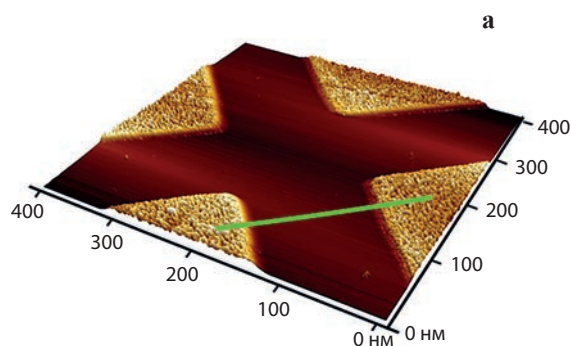


Рис. 7. а СЗМ-изображение поверхности *c*-Ge, облучённой ионами $^{209}\text{Bi}^{++}$ с $E = 72$ кэВ и $D = 5.0 \cdot 10^{16}$ ион/см². **б** Профиль, измеренный на краю набухающей и исходной областей на поверхности образца Bi:NanoPGe. Зелёная полоса обозначает направление, по которому проводилось измерение профиля ступеньки.

поверхности *c*-Ge является значимо меньшим, чем для NanoPGe, обладающего меньшей плотностью вещества и повышенным содержанием поверхностных атомов Ge с пониженной энергией связи по сравнению с атомами Ge в объёмном кристаллическом материале. При дальнейшем увеличении D вплоть до её рассматриваемого максимального значения $D = 1.3 \cdot 10^{17}$ ион/см² возвышение набухающего слоя Bi:NanoPGe над исходной поверхностью образца не меняется и остаётся на уровне $h_{\text{swell}} = 100$ нм. Таким образом, для данных условий ионного облучения *c*-Ge ионами Bi^{++} , начиная с критической D_{crit} , возникает уникальное динамическое компенсационное равновесие между скоростями процессов ионного распыления и набухания поверхности.

С целью определения h_{surf} для слоя Bi:PGe, сформированного облучением ионами $^{209}\text{Bi}^{++}$ с $E = 36$ кэВ, были проведены СЗМ-измерения, результаты которых приведены на рис. 4 (бордовая кривая). Особенностью изменения h_{surf} в данном случае является то, что на начальном этапе при последовательном увеличении D до $D_{\text{sputt}} = 1.3 \cdot 10^{15}$ ион/см² происходит ионное распыление поверхности образца с монотонным её понижением $h_{\text{surf}} = h_{\text{sputt}}$ аналогично тому, как это наблюдалось при $E = 18$ кэВ (рис. 4). При $E = 35$ кэВ СЗМ-профили в области перекрестий структур на поверхности оказываются подобными тем, что приведены на рис. 3. При превышении D_{sputt} с формированием структуры Bi:NanoPGe ситуация меняется: распыление прекращается и h_{surf} начинает увеличиваться аналогично случаю, описываемому на рис. 7. Очевидно, что при этом изменение $h_{\text{surf}} = h_{\text{swell}}$ обусловлено с процессом набухания облучённого слоя Bi:NanoPGe.

Обсуждение

В соответствии с классической теорией распыления Зигмунда [10, 28], взаимодействие ускоренных ионов с твёрдым телом зависит прежде всего от E . При малых E

(условно ≈ 30 кэВ) атомы выбиваются с твёрдой поверхности мишени под действием энергичной бомбардировки частицами, приводя к её разрушению. При данных E предполагается режим “линейного каскада” – парных взаимодействий первичных ионов с атомами твёрдого тела. При увеличении E первичных ионов выше 30 кэВ и (или) их массы ($Z > 20$), резко повышается число столкновений атомов в каскаде и возникает так называемый режим “теплого пика”, при котором возможно локальное плавление материала [10, 21]. Предполагается, что в этом режиме большее количество атомов каскада получают достаточно энергии, чтобы покинуть свои позиции в узле решётки твёрдого тела. Иными словами, с ростом E увеличивается число столкновений с атомами мишени, вызывающих изменение их локального расположения. Ионное распыление приводит к образованию четырёх основных различных типов морфологии поверхности: рябь, точки, пирамиды и гладкие структуры [21]. К настоящему времени не существует единого физического механизма, управляющего образованием конкретных морфологических структур на поверхности Ge, облучённой ионами [29]. Вместо этого действует ряд различных эрозийных, перераспределительных и диффузионных эффектов, и то, какие из них являются доминирующими, зависит от условий эксперимента. В общем случае ионное распыление вызывает разрушение поверхности, удаление её части, что и приводит к изменению (к понижению) уровня $h_{\text{surf}} = h_{\text{sputt}}$ относительно необлученной области образца. Обозначим такой тип модификации поверхности материала с понижением h_{sputt} с ростом D во время ионного облучения при низких E , как физический концептуальный сценарий № 1 (рис. 8, красная линия), как это показано на коллекции условных сценариев.

Отметим что, как правило, при экспериментальном исследовании процесса ионного распыления полученные результаты по изменению h_{surf} в научной литературе характеризуются не непосредственно данной измеряемой величиной, а, в большей степени, оценками коэффициен-

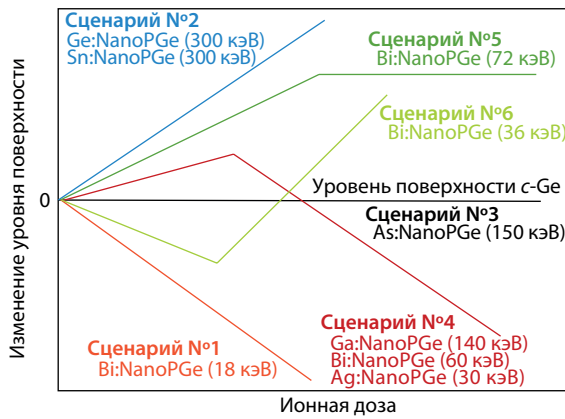


Рис. 8. Условные диаграммы физических концептуальных сценариев изменения уровня поверхности в результате распыления или набухания при порообразовании ионно-облучаемого c-Ge с увеличением D .

тов распыления. Имеется большое число научных работ, посвящённых компьютерному моделированию процессов распыления, однако публикаций об экспериментальных измерениях коэффициентов распыления значительно меньше. В качестве примеров результатов распыления Ge можно привести работы [30, 31], в которых формирование наноструктур из волн и точек наблюдалось на поверхности подложки c-Ge, когда масса падающих ионов $^{84}\text{Kr}^+$ и $^{131}\text{Xe}^+$ с $E \approx 2$ кэВ и $D = 6.8 \cdot 10^{17}$ ион/см² превышала массу атома мишени ^{73}Ge . При облучении ионами $^{131}\text{Xe}^+$ при несколько более высоких $E = 5$ и 20 кэВ с $D = 1.8 \cdot 10^{18}$ ион/см² подложек c-Ge на поверхности было обнаружено образование нанополостей и кратеров [32, 33]. В другой работе [34] исследовали поверхностные кратеры на образце c-Ge, созданные ионами $^{70}\text{Ga}^+$ с $E = 20$ кэВ и $D = 8.0 \cdot 10^{12}$ ион/см². При этом предполагается, что образованные кратеры могут являться предшественниками появления развитой открытой NanoPGe-структуры. Также сообщается о формировании морфологии из прямых или перевёрнутых прямоугольных пирамид, а также неглубоких изотропных впадин на поверхности c-Ge, облучаемого ионами $^{40}\text{Ar}^+$ с $E \approx 1$ кэВ и $D = 2.0\text{--}5.4 \cdot 10^{18}$ ион/см² [35]. В работе [36] показано образование ряби на поверхности c-Ge в процессе облучения тяжёлыми ионами $^{197}\text{Au}^+$ с $E = 25$ кэВ и $D = 4.0 \cdot 10^{18}$ ион/см². Следует отметить, что во всех перечисленных примерах [30–36] авторы не приводили экспериментальных значений h_{sputt} поверхности Ge после её распыления, а в ряде случаев оперировали только коэффициентом распыления.

Таким образом, результаты настоящей работы по распылению поверхности c-Ge ионами $^{209}\text{Bi}^+$ при $E = 18$ кэВ следует отнести к физическому концептуальному сценарию № 1 (рис. 8, красная линия) по взаимодействию ускоренных ионов с полупроводниковой мишенью, поскольку экспериментально продемонстрировано формирование Bi:NanoPGe-структуры (рис. 2), а также установлено, что с ростом ионной дозы D происходит монотонное и практически линейное понижение до $h_{\text{sputt}} \approx 200$ нм при $D = 1.0 \cdot 10^{17}$ ион/см² (рис. 4).

Для обсуждения вкладов в модификацию поверхности и изменения её уровня h_{surf} при низкоэнергетическом облучении (ионной имплантации) также следует рассмотреть физические концептуальные сценарии изменения материала Ge, в частности, при процессах образования и набухания NanoPGe [11, 37]. Рассмотрим процесс облучения Ge различными ионами при нормальном угле падения к поверхности образца при комнатной температуре. Несмотря на многолетние исследования и существенное накопление экспериментального материала, до сих пор присутствует неоднозначность в понимании механизмов порообразования в Ge при его ионном облучении [37]. Данная проблема по механизмам порообразования в настоящей работе непосредственно обсуждаться не будет. Отметим при этом, что определённые расхождения в научной литературе заключаются в оценках характера изменения уровня h_{surf} , в частности, его изменения при увеличении D для малых $E < 300$ кэВ в зависимости от конкурирующих процессов распыления (" h_{surf} " – h_{sputt}) или набухания (" h_{surf} " – h_{swell}). Повышение величины h_{swell} связывают непосредственно с увеличением толщины имплантированного слоя NanoPGe (h_{NanoPGe}), которое превышает h_{Calc} . При этом в научной литературе величину h_{NanoPGe} предлагается оценивать суммой $R_p + h_{\text{swell}}$.

Впервые внимание к эффекту увеличения h_{NanoPGe} объёмно-распухаемого имплантированного слоя с открытой структурой NanoPGe до 55 нм ($E = 50$ кэВ и $D = 2.0 \cdot 10^{15}$ ион/см²) и до 520 нм ($E = 300$ кэВ и $D = 6.0 \cdot 10^{16}$ ион/см²) на подложке c-Ge при её облучении относительно лёгкими ионами $^{73}\text{Ge}^+$ было привлечено в работе [38]. Было отмечено, что измеренные на СЭМ значения h_{NanoPGe} превышали в несколько раз расчётные величины проективного пробега R_p имплантируемых ионов для соответствующих E . Примерно в это же время при наблюдении поперечных срезов образцов на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) было показано, что имплантация тяжёлых ионов $^{209}\text{Bi}^+$ с $E = 280$ кэВ и $D = 4.0 \cdot 10^{15}$ ион/см² h_{swell} в c-Ge приводит к образованию NanoPGe-слоя, который набухает над поверхностью образца на величину $h_{\text{swell}} = 260$ нм [39]. Линейное увеличение h_{NanoPGe} с ростом D при облучении c-Ge ионами $^{73}\text{Ge}^+$ с $E = 130$ кэВ (для D от $1.0 \cdot 10^{16}$ до $1.0 \cdot 10^{17}$ ион/см²) и 300 кэВ (для D от $1.0 \cdot 10^{16}$ до $4.0 \cdot 10^{16}$ ион/см²) были зарегистрировано при ПСПЭМ-наблюдениях [37, 40, 41]. При этом h_{NanoPGe} возрастала до значения 450 нм для максимальной $D = 4.0 \cdot 10^{16}$ ион/см² при $E = 300$ кэВ. С ростом h_{NanoPGe} экспериментально наблюдалось и синфазное повышение h_{swell} . Обозначим изменение морфологии поверхности с образованием NanoPGe и одновременно при монотонном возрастании значения h_{swell} (h_{NanoPGe}) с ростом D при низкоэнергетической ионной имплантации c-Ge, как взаимодействие ускоренных ионов с поверхностью c-Ge по физическому концептуальному сценарию № 2 (рис. 8, синяя линия).

В работе [42] отмечается, что образованию слоя NanoPGe во время низкоэнергетической ионной имплантации при критической D_{NanoPGe} предшествует процесс аморфизации

(*a*-Ge) облучаемой поверхности *c*-Ge ($D_{a\text{-Ge}} < D_{\text{NanoPGe}}$). Примерное значение $D_{a\text{-Ge}}$ для $^{73}\text{Ge}^+$ составляет $5.0 \cdot 10^{13}$ ион/см². Поэтому очевидно, что NanoPGe-структура зарождается и формируется в приповерхностной области *a*-Ge слоя. Было показано для ионов $^{73}\text{Ge}^+$, что если после начала зарождения NanoPGe величина h_{NanoPGe} монотонно увеличивается с ростом D , то толщина *a*-Ge слоя при этом остаётся практически неизменной [40]. При ПСПЭМ-наблюдениях в работах [43, 44] также зафиксировано увеличение значения h_{swell} с ростом D для распухаемого NanoPGe, сформированного имплантацией ионов $^{73}\text{Ge}^+$ с $E = 140$ кэВ и более тяжёлых ионов $^{119}\text{Sn}^+$ с $E = 225$ кэВ для $D = 5.0 \cdot 10^{16} - 2.0 \cdot 10^{16}$ ион/см² в *c*-Ge, в интервале значений $h_{\text{swell}}^{\text{Ge}}$ от 5 до 100 нм и $h_{\text{swell}}^{\text{Sn}}$ от 60 до 390 нм, соответственно. Было высказано предположение, что тяжёлые ионы $^{119}\text{Sn}^+$ при внедрении в *c*-Ge вызывают большее выделение энергии в результате ядерных столкновений, приводящей к более эффективному образованию вакансий вдоль ионных треков, по сравнению со случаем $^{73}\text{Ge}^+$. Авторы работы [45] приводят данные по возрастанию h_{NanoPGe} от 30 до 516 нм для случая $^{73}\text{Ge}^+$ с $E = 140$ кэВ и для более высоких $D = 5.0 \cdot 10^{16} - 1.0 \cdot 10^{17}$ ион/см². Аналогичные результаты по линейному возрастанию h_{swell} распухаемого слоя NanoPGe с ростом D наблюдались при имплантации ионов $^{73}\text{Ge}^+$ в аморфные слои *a*-Ge с $E = 300$ кэВ ($D = 5.0 \cdot 10^{15} - 2.0 \cdot 10^{16}$ ион/см²) [37, 46]. Приведённые примеры также можно отнести к физическому концептуальному сценарию № 2 по характеру взаимодействия ускоренных ионов с поверхностью *c*-Ge (рис. 8, синяя линия).

Отдельно следует выделить результаты работы [47], в которой экспериментальные оценки значения h_{surf} проводились методом атомно-силовой микроскопии для случая формирования NanoPGe при имплантации *c*-Ge ионов $^{74}\text{As}^+$ с $E = 20$ кэВ и $D = 1.0 \cdot 10^{16}$ ион/см². Было заявлено, что формирование As:NanoPGe в приповерхностном слое *c*-Ge не приводит к изменению уровня h_{surf} . Можно предположить, что ионное распыление рыхлого слоя As:NanoPGe и удаление его с поверхности образцовой нивелируется распуханием слоя h_{NanoPGe} , инициируемого ионной имплантацией. Обозначим такое изменение морфологии и структуры поверхности как физический концептуальный сценарий № 3 (рис. 8, чёрная линия).

Отметим, что в рассматриваемом физическом концептуальном сценарии № 2 (рис. 8, синяя линия), показанном в исследованиях [38–41, 43–46], во всех случаях взаимодействие ионов $^{73}\text{Ge}^+$ с поверхностью *c*-Ge при $E = 55 - 300$ кэВ и $D = 2.0 \cdot 10^{15} - 1.0 \cdot 10^{17}$ ион/см² не вызывало распыления образца, а приводило только к распуханию имплантированного слоя NanoPGe и увеличению h_{swell} . Возможно, что при этом распыление было, но являлось малоэффективным. Из результатов данных работ складывается нетривиальное представление о том, что если бесконечно увеличивать D , то и величина h_{swell} должна непрерывно возрастать. При этом следует понимать, что формируемый слой NanoPGe характеризуется значительно меньшей плотностью вещества, большей удельной

площадью поверхности с атомами Ge с ограниченными связями, по сравнению с *c*-Ge, и неминуемо NanoPGe-слоем на каком-то этапе увеличения D должен начать распыляться и разрушаться при ионной бомбардировке. Поэтому, в целом, процесс ионного распыления NanoPGe-слоя с ростом D к настоящему времени вызывает ещё много вопросов.

Относительно недавно в работе [48] было показано поведение изменения h_{surf} с ростом D , отличающееся от случаев концептуальных сценариев 1–3. При имплантации *c*-Ge ионами $^{108}\text{Ag}^+$ с $E = 30$ кэВ с увеличением D последовательно наблюдалось распухание поверхности до значения h_{swell} в нескольких нанометров ($D = 1.25 \cdot 10^{16}$ ион/см²), сменяющегося затем эффективным ионным распылением Ag:NanoPGe-слоя с практически линейным увеличением h_{sputt} , как это наблюдалось до $D = 1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см². Обозначим такое поведение взаимодействия ускоренных ионов с поверхностью *c*-Ge как физический концептуальный сценарий № 4 (рис. 8, розовая линия), и состоящий из последовательных проявлений сценариев № 2 и № 1.

Если обратиться к результатам настоящей работы по изменению h_{surf} с ростом D при имплантации *c*-Ge ионами $^{209}\text{Bi}^{++}$ с $E = 72$ кэВ (рис. 4, зелёная линия), то видно, что в данном случае зависимость $h_{\text{surf}}(D)$ не описывается ни одним из сценариев № 1–4. Как показано на рисунке, увеличение D сначала приводит к возрастанию $h_{\text{surf}} = h_{\text{swell}}$, а начиная с D_{crit} величина h_{swell} не изменяется. Обозначим такое изменение облучаемой поверхности *c*-Ge при её взаимодействии с ионами, как физический концептуальный сценарий № 5, который состоит из последовательных сценариев № 2 и 3 (рис. 8, зелёная линия).

Облучение *c*-Ge ионами $^{209}\text{Bi}^{++}$ с несколько меньшей $E = 36$ кэВ (рис. 4, бордовая линия) приводит к отдельному, ранее не рассмотренному сценарию № 6 изменения h_{surf} . В начальный момент облучения, до $D = 1.3 \cdot 10^{15}$ ион/см², происходит распыление поверхности и понижение её уровня $h_{\text{surf}} = h_{\text{sputt}}$, которое сменяется монотонным распуханием $h_{\text{surf}} = h_{\text{swell}}$. Таким образом, физический концептуальный сценарий № 6 можно описать последовательным выполнением сценариев № 1 и 2 (рис. 8, кривая цвета спаржи).

В отличие от классических подходов ионного распыления и ионной имплантации относительно больших по площади поверхностей различных материалов широкополосными пучками ионов, рассмотренных ранее, отдельно можно выделить радиационную технологию ФИП [3]. Особенность данной технологии заключается в том, что облучение проводится при специальных условиях узконаправленными пучками (диаметром до 150 нм) ионов. При этом используются сопоставимые значения $E = 10 - 50$ кэВ, однако само облучение проводится при исключительных условиях последовательным пошаговым сканированием по точкам ограниченных локальных площадей образцов порядка 100×100 мкм при очень низких значениях $J \sim 5 - 7000$ пА по сравнению с миллиамперами, используемыми при классических облучениях. Иными сло-

Таблица 1. Физические концептуальные сценарии модификации поверхности и формирования NanoPGe при ионном облучении *c*-Ge.

Сценарий №	Характеристика $h_{\text{surf}}(D)$	Материал	Публикации
1	Постоянное уменьшение	Bi:NanoPGe	Настоящая работа
2	Постоянное возрастание	Ga:NanoPGe, Ge:NanoPGe, Sn:NanoPGe	[37, 40, 41, 43, 46, 53]
3	Постоянный уровень	As:NanoPGe	[47]
4	Возрастание + Уменьшение	Ga:NanoPGe, Ag:NanoPGe, Bi:NanoPGe	[22, 48, 50]
5	Возрастание + Постоянный уровень	Bi:NanoPGe	Настоящая работа
6	Возрастание + Постоянное	Bi:NanoPGe	Настоящая работа

вами, в ФИП-технологии заложены условия, при которых физические процессы взаимодействия ионов с поверхностью существенно отличаются от ранее рассмотренных результаты по распылению и набуханию облучаемых поверхностей. Поэтому результаты, полученные по технологии ФИП, в настоящей работе рассматриваются как особенные, и напрямую не сопоставляются в контексте физических концептуальных сценариев № 1–6 (рис. 8).

Тем не менее, следует отметить работы, связанные с обработкой поверхностей *c*-Ge методом ФИП, в которых также наблюдаются процессы распыления или набухания поверхности *c*-Ge при облучении, например, ионами $^{70}\text{Ga}^+$ [22, 49–54], $^{28}\text{Si}^+$ и $^{197}\text{Au}^+$ [50], а также ионами $^{209}\text{Bi}^+$ или $^{209}\text{Bi}^{++}$ и их кластерами [22–24]. Ряд исследований представляют результаты конкретно изменения h_{surf} . В частности, в работе [22] было показано, что в начальный момент облучения *c*-Ge ионами $^{209}\text{Bi}^+$ ($E = 30$ кэВ) или $^{209}\text{Bi}^{++}$ ($E = 60$ кэВ) наблюдалось увеличение $h_{\text{surf}} = h_{\text{swell}}$ с ростом D из-за набухания поверхности, которое при определённом значении D заменяется распылением образца ($h_{\text{surf}} = h_{\text{sput}}$) аналогично случаю ионной имплантации Ag:NanoPGe по сценарию № 4 [48]. Тот же физический концептуальный сценарий № 4 реализуется при облучении подложек *c*-Ge ионами $^{70}\text{Ga}^+$ [50]. В работе [53] было показано, что при облучении наноструктурированных и *a*-Ge слоёв ионами $^{70}\text{Ga}^+$ регистрировалось только увеличение h_{swell} с увеличением D .

Таким образом, на примере полупроводника *c*-Ge, на рис. 8 приведены известные на данный момент физические концептуальные сценарии модификации поверхности при порообразовании по изменению уровня h_{surf} , обуславливаемой конкурирующими процессами поверхностного распыления и набухания при ионном облучении. Список и краткое описание сценариев приведены в таблице 1.

Заключение

Экспериментальные результаты, полученные в настоящей работе, демонстрируют образование тонких аморфных слоёв NanoPGe в процессе ионного распыления и высокодозной ионной имплантации плоских монокристаллических подложек *c*-Ge при облучении ионами $^{209}\text{Bi}^+$ и $^{209}\text{Bi}^{++}$ с $D = 1.3 \cdot 10^{15} - 1.3 \cdot 10^{17}$ ион/см² с различными $E = 18, 36$ и 72 кэВ. Установлено, что при $E = 18$ кэВ наблюдался процесс ионного распыления и формируется

слой Bi:NanoPGe, состоящий из плотно упакованных нанонитей, при этом уровень поверхности снижался до 200 нм. При высоких $E = 36$ и 72 кэВ происходит образование набухающего губчатого слоя Bi:NanoPGe и тонких нанонитей, разделённых свободным пространством. На примере полупроводника Ge и на основании новых экспериментальных, а также литературных данных, предложена схема физических концептуальных сценариев (парадигма в радиационной физике) взаимодействия ускоренных ионов с облучаемой матрицей, определяющая характер преобразования морфологии и уровня облучаемой поверхности с ростом D вследствие её распыления или набухания. Предложенная в настоящей работе парадигма ситуационного поведения и строгого характера изменения облучаемой поверхности (физических концептуальных сценариев) на примере облучаемого Ge может быть рассмотрена и применена на практике к широкому классу полупроводниковых материалов (GaN, GaAs, GaSb, Si и др.), также демонстрирующих порообразование на своей поверхности при интенсивном ионном облучении.

Работа вошла в перечень важнейших достижений КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН за 2025 год.

Литература

1. Pivin J.-C.: J. Mater. Sci. **18**, 1267 (1983)
2. Huff M.: Micromachines **12**, 991 (2021)
3. Ali M.Y., Hung W., Yongqi F.: Int. J. Precision Eng. Manufact. **11**, 157 (2010)
4. Patro A., Rout C.S., Dhal S., Chatterjee S.: Nanotechnology **36**, 212001 (2025)
5. Wen S.-Y., He L., Zhu Y.-H., Luo J.-W.: J. Appl. Phys. **133**, 45703 (2023)
6. Shekhawat K., Negi D., Shyam R., Prajapat P., Gupta G., Singh F., Devi D., Ojha S., Gupta M., Nelamarri S.R.: Physica B: Condensed Matter **679**, 415547 (2024)
7. Jain I.P., Agarwal G.: Surf. Sci. Reports **66**, 77 (2011)
8. Nastasi M., Mayer J.W., Hirvonen J.K.: Ion-solid interactions. Fundamentals and applications. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1996.
9. Zhang Y., Weber W.J.: Appl. Phys. Rev. **7**, 41307 (2020)
10. Kudriavtsev Y., Asomoza R., Hernandez A., Kazantsev D.Y., Ber B.Y., Gorokhov A.N.: J. Vac. Sci. Technol. A **38**, 53203 (2020)
11. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Рогов А.М., Воробьев В.В.: Формирование слоёв пористого кремния и германия с металлическими наночастицами. Казань: ФИЦПРЕСС, 2019.
12. Hernandez A., Kudriavtsev Y., Salinas-Fuentes C., Hernandez-Gutierrez C., Asomoza R.: Vacuum **171**, 108976 (2020)
13. Destefanis G.L., Gaillard J.P.: Appl. Phys. Lett. **36**, 40 (1980)
14. Kucheyev S.O., Williams J.S., Jagadish C., Zou J., Craig V.S.J., Li G.: Appl. Phys. Lett. **77**, 1455 (2000)

15. Nikor S.S.S., Sumon M.S.I., Sankar S., Ma L., Patel V.J., Hawkins S.D., Addamane S.J., Arafim S.: *Appl. Phys. Express* **17**, 122005 (2024)
16. Stepanov A.L., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Vorobev V.V., Rogov A.M.: *Vacuum* **159**, 353 (2019)
17. Tolstoguzov A., Mazarov P., Ieshkin A.E., Meyer F., Fu D.J.: *Tech. Phys. Lett.* **48**, 18 (2022)
18. Tolstoguzov A., Ieshkin A.E., Kultusurin I.N., Mazarov P.: *Results Surf. Interfaces* **19**, 100491 (2025)
19. Kudriavtsev Y., Hernandez A.G., Diaz J.J., Avendano M., Ramirez G., Asomoza R.: *J. Mater. Sci: Mater Electron* **35**, 671 (2024)
20. Cassidy N., Blenkinsopp P., Brown I., Curry R.J., Mordin B.N., Webb R., Cox D.: *Phys. Status Solidi A* **218**, 2000237 (2021)
21. Hernandez A.G., Kudriavtsev Y.: *J. Vac. Sci. Technol. B* **34**, 61805 (2016)
22. Bischoff L., Pilz W., Schmidt B.: *Appl. Phys. A* **104**, 1153 (2011)
23. Böttger R., Heinig K.-H., Bischoff L., Liedke B., Facsko S.: *Appl. Phys. A* **113**, 53 (2013)
24. Böttger R., Keller A., Bischoff L., Facsko S.: *Nanotechnology* **24**, 115702 (2013)
25. Gavrilova T.P., Valeev V.F., Nuzhdin V.I., Rogov A.M., Konovalov D.A., Khantimerov S.M., Stepanov A.L.: *Tech. Phys.* **69**, 578 (2024)
26. Sully H.R., Tabatabaei K., Hellier K., Newton K.A., Ju Z., Knudson L., Zargar S., Wang M., Kauzlaich S.M., Bridges F., Carter S.A.: *ACS Applied Nano Mater.* **3**, 5410 (2020)
27. Stepanov A.L., Zhikharev V.A., Hole D.E., Townsend P.D.: *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **166**, 26 (2000)
28. Sigmund P.: *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **27**, 1 (1987)
29. Erb D.J., Pearson D.A., Skeren T., Engler M., Bradley R.M., Facsko S.: *Phys. Rev. B* **109**, 45439 (2024)
30. Ziberi B., Frost F., Rauschenbach B.: *J. Vac. Sci. Technol. B* **24**, 1344 (2006)
31. Teichmann M., Lorbeer J., Ziberi B., Frost F., Rauschenbach B.: *New J. Phys.* **15**, 102029 (2013)
32. Kim J.C., Cahill D.G., Averback R.S.: *Phys. Rev. B* **68**, 94109 (2003)
33. Kim J.C., Cahill D.G., Averback R.S.: *Surf. Sci.* **574**, 175 (2005)
34. Bellon P., Chey S.J., von Nostrand J.E., Ghaly M., Cahill D.G., Averback R.S.: *Surf. Sci.* **339**, 135 (1995)
35. Ou X., Keller A., Helm M., Fassbender J., Facsko S.: *Phys. Rev. Lett.* **111**, 16101 (2013)
36. Mollick S.A., Ghose D., Shipman P.D., Bradley R.M.: *Appl. Phys. Lett.* **104**, 43103 (2014)
37. Rudawski N.G., Jones K.S.: *J. Mater. Res.* **28**, 1633 (2013)
38. Wilson I.H.: *J. Appl. Phys.* **53**, 1698 (1982)
39. Holland O.W., Appleton B.R.: *J. Appl. Phys.* **54**, 2295 (1983)
40. Darby B.L., Yates B.R., Rudawski N.G., Jones K.S., Kontos A., Elliman R.G.: *Thin Solid Films* **519**, 5962 (2011)
41. Romano L., Impellizzeri G., Tomasello M.V., Giannazzo F., Spinella C., Grimaldi M.G.: *J. Appl. Phys.* **107**, 84314 (2010)
42. Claverie A., Koffel S., Cherkashin N., Benassayag G., Scheiblin P.: *Thin Solid Films* **518**, 2307 (2010)
43. Alkhaldi H.S., Tran T.T., Kremer F., Williams J.S.: *J. Appl. Phys.* **120**, 215706 (2016)
44. Alkhaldi H.S., Kremer F., Bierschenk T., Hansen J.L., Nylandsted-Larsen A., Williams J.S., Ridgway M.C.: *J. Appl. Phys.* **119**, 94303 (2016)
45. Alkhaldi H.S., Kremer F., Mota-Santiago P., Nadzri A., Schauries D., Kirby N., Ridgway M.C., Kluth P.: *J. Appl. Phys.* **121**, 115705 (2017)
46. Romano L., Impellizzeri G., Bosco L., Ruffino F., Miritello M., Grimaldi M.G.: *J. Appl. Phys.* **111**, 113515 (2012)
47. Kaiser R.J., Koffel S., Pichler P., Bauer A.J., Amon B., Claverie A., Benassayag G., Scheiblin P., Frey L., Ryssel H.: *Thin Solid Films* **518**, 2323 (2010)
48. Rogov A.M., Gumarov A.I., Tagirov L.R., Stepanov A.L.: *Composit. Comm.* **16**, 57 (2019)
49. Rubanov S., Munroe P.M.: *Micron* **25**, 549 (2004)
50. Yanagisawa J., Takarabe K., Ogushi K., Gamo K., Akasaka Y.: *J. Phys.: Condens. Matter* **19**, 445002 (2007)
51. Fritzsche L., Muecklich A., Facsko S.: *Appl. Phys. Lett.* **100**, 223108 (2012)
52. Kamaliy B., Mote R.G., Aslam M., Fu J.: *APL Mater.* **6**, 36106 (2018)
53. Oishi N., Kogo F., Nitta N.: *Vacuum* **213**, 112123 (2023)
54. Smirnova M.A., Bachurin V.I., Pukhov D.E., Mazaletsky L.A., Lebedev M.E., Churilov A.B.: *St. Petersburg Polytech. Univ. J. Phys. Mathem.* **16**, 21 (2023)

Слои нанопористого германия на тонких плёнках, полученных ионно-стимулированным осаждением

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

Лаборатория нанооптики и наноплазмоники, лаборатория радиационной физики

В работе исследуется возможность формирования нанопористых слоёв Ge – NanoPGe при облучении ионами Ag^+ тонких плёнок аморфного α -Ge, полученных методом ионно-стимулированного осаждения. Для изготовления плёнок α -Ge проводилось распыление низкоэнергетическими ионами Xe^+ мишени из монокристаллического c -Ge с одновременным осаждением на стеклянную подложку из плавленого кварца SiO_2 , предварительно покрытого металлическим проводящим слоем Ni. Последующее облучение ионами Ag^+ было выполнено при энергии $E = 30$ кэВ, плотности тока в ионном пучке $J = 5$ мкА/см² и дозах $D = 2.0 \cdot 10^{16}$ и $6.0 \cdot 10^{16}$ ион/см². Для анализа полученного материала были использованы методы сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии оптического отражения. Показано, что при малой дозе облучения поверхность плёнок α -Ge остаётся гладкой, тогда как увеличение дозы приводит к формированию NanoPGe-слоя, состоящего из хаотически-расположенных в плоскости поверхности образца иглообразных образований.

Nanoporous germanium layers formed by ion-stimulating deposition on thin films

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

Nanooptics and nanoplasmonics laboratory, Laboratory of radiation physics

The possibility for formation of nanoporous Ge layers – NanoPGe by irradiating thin amorphous α -Ge films obtained by ion-stimulated deposition by Ag^+ ions was studied. To produce α -Ge films, a monocrystal c -Ge target was sputtered by low-energy Xe^+ ions with simultaneous deposition onto a glass substrate made of fused quartz SiO_2 , pre-coated with a metallic conductive Ni layer. Subsequent ion irradiation by Ag^+ ions was performed at an energy of $E = 30$ keV, an ion beam of $J = 5$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, and doses of $D = 2.0 \cdot 10^{16}$ and $6.0 \cdot 10^{16}$ ion/cm². Scanning electron microscopy and optical reflectance spectroscopy were used to analyze the obtained material. It was shown that at a low irradiation dose the surface of α -Ge films remains smooth, whereas an increase in the dose leads to the formation of NanoPGe layer, consisting needle-like nanowires randomly located in the plane of the sample surface.

Введение

Совершенствование литий-ионных аккумуляторов путём поиска и создания новых композиционных материалов, в частности для анодов, является одним из приоритетных направлений как фундаментальных, так и прикладных исследований. Как было показано [1], для создания анодов с высокими ёмкостными характеристиками могут быть использованы элементы IV группы, такие как Si, Ge, Sn и т. д. Из них наиболее привлекателен Ge, поскольку он обладает высокой электронной проводимостью, что при сохранении достаточной ёмкости значительно увеличивает скорость заряда/разряда аккумуляторов [2]. В этом плане определённые достижения могут быть реализованы на нанопористом германии (NanoPGe), характеризуемом большой удельной площадью, что повышает эффективность химических реакций в электролитах [3]. Кроме того, слои NanoPGe являются перспективными фотонными и оптоэлектронными наноматериалами, которые могут быть эффективно использованы, например, в термоэлектрических фотопреобразователях и элементах солнеч-

ных батарей [4], ИК-поглощающих газовых сенсоров [5], в качестве биосенсоров [6], а также каркасных структур для выращивания сверхмалых бактерий или биоплёнок в клинических и биомедицинских исследованиях [7], для создания химических сенсоров на эффекте SERS [8], а также в терагерцовых устройствах [9, 10].

Один из физических способов формирования тонких слоёв NanoPGe заключается в облучении подложек Ge различными ионами [11]. На практике для получения структур NanoPGe были использованы различные варианты подложек Ge: монокристаллические пластины c -Ge [12], эпитаксиальные слои α -Ge [13] и плёнки α -Ge, полученные при магнетронном осаждении [14]. В то же время продолжают поиски новых технологий для дальнейшего удешевления процесса формирования NanoPGe, поскольку изготовление кристаллических полупроводниковых подложек является финансово затратным. Целью настоящей работы является экспериментальная проверка возможности создания слоя NanoPGe путём низкоэнергетической высокодозовой имплантации (облучения) ионов Ag^+ в тонкую плёнку α -Ge (TFGe), предварительно полученную

по относительно дешёвой технологии ионно-стимулированного осаждения (ИСО). Ранее данный подход был предложен и успешно апробирован при изготовлении тонких диэлектрических плёнок [15, 16]. Основная идея предлагаемой технологии заключается в осаждении на подложку выбранного материала из мишени, облучаемой и одновременно распыляемой низкоэнергетичными ионами инертного газа. Более того, по данной технологии до получения TFGe в той же вакуумной камере возможно осаждение проводящего металлического слоя для технических целей в различных устройствах, что затруднительно в случае использования *c*-Ge подложек.

Если сравнить предложенный метод ИСО для TFGe с нашей предыдущей работой [14], где TFGe был получен способом магнетронного осаждения, то можно выделить следующие преимущества ИСО-технологии. Во-первых, в случае ИСО для осаждения различных диэлектрических, металлических и полупроводниковых материалов, в частности Ge, нет обязательного требования к электропроводности распыляемой мишени, как в случае магнетронного осаждения [17]. Во-вторых, в геометрии эксперимента локальные области формирования ионного пучка на мишени и область осаждения TFGe при ИСО пространственно разделены. Поэтому давление в непосредственной области роста TFGe составляет всего 10^{-3} – 10^{-2} Па, что как минимум на порядок меньше, чем при магнетронном осаждении (~ 0.1 Па). Благодаря этому распылённые атомы мишени в зазоре между мишенью и осаждаемой TFGe во время ИСО практически не теряют свою энергию, которая в среднем составляет несколько электронвольт. Такой подход обуславливает влияние на адгезию осаждённой плёнки, как было замечено особенно в случае диэлектрических плёнок, изготовленных методом ИСО [15, 16]. Кроме того, с помощью данной методики существует потенциальная возможность независимого регулирования энергии ионов и плотности тока в ионном пучке J во время эксперимента, что в будущем позволит проводить вариационные исследования качества осаждения TFGe. В принципе, возможности ИСО для формирования TFGe ещё не были полностью изучены на практике, и проводимое исследование направлено на привлечение интереса к данной технологии. Общий результат для рассматриваемых методов ИСО и магнетронного осаждения, описанного в работе [14], заключается в том, что в обоих случаях TFGe являются аморфными, как было установлено в экспериментах по дифракции отражённых электронов (ДОЭ). Однако в работе [14] использовалась уникальная установка магнетронного осаждения с ионным источником “Radical”, количество которых в мире ограничено. Данное обстоятельство указывает на зависимость результатов от осаждения тонких плёнок на различных типах установок магнетронного осаждения, таких как цилиндрические коаксиальные магнетронные системы, системы с плоским катодом, со сбалансированным магнитным полем, с несбалансированным магнитным полем, с двумя магнетронами, с дополнительным устройством ионизации газа и т. д. Однако все эти варианты магне-

тронного осаждения ещё пока не были в полной мере изучены на практике для осаждения TFGe.

Таким образом, основная идея предлагаемого технологического подхода в настоящей работе заключается в осаждении на подложку выбранного материала из мишеней, одновременно распылённых низкоэнергетическими ионами инертного газа. Более того, согласно этой методики, перед формированием TFGe в той же вакуумной камере можно осадить проводящий металлический слой на диэлектрики для технических целей в различных устройствах, что обычно затруднительно в случае использования подложек из *c*-Ge.

Методика эксперимента

Для осаждения TFGe была использована оригинальная вакуумная установка по ионно-стимулированному осаждению однородных по химическому составу тонких плёнок. Распыление ионами Xe^+ мишени из *c*-Ge на подложку из плавленого кварца SiO_2 , покрытого проводящим слоем Ni толщиной $L_{\text{Ni}} = 200$ нм, проводилось в вакууме $\sim 2 \cdot 10^{-2}$ Па. В данной установке был использован ионный источник Кауфмана при следующих режимах: энергия ионов Xe^+ $E = 1$ кэВ, $J = 100$ мкА/см². В результате проведённого осаждения в течении ~ 10 мин была получена TFGe аморфного *a*-Ge толщиной $L_{\text{TFGe}} = 150$ нм. Подробности технологии нанесения слоя Ni при распылении из объёмной мишени ионами Xe^+ при $E = 1$ кэВ приведены в работе [18]. Значения среднеквадратичной шероховатости поверхности были определены на сканирующем зондовом микроскопе Dimention FastScan (Bruker) и в случае осаждённых слоёв Ni и TFGe не превышали $\sigma = 1$ нм.

Имплантиция плёнок TFGe проводилась ионами Ag^+ с $E = 30$ кэВ, $J = 5$ мкА/см², $D = 2.0 \cdot 10^{16}$ и $6.0 \cdot 10^{16}$ ион/см² на ионном ускорителе ИЛУ-3 при комнатной температуре облучаемой мишени. Для наблюдения морфологии поверхности образца был использован высокоразрешающий сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Merlin (Carl Zeiss) при ускоряющем напряжении 5 кВ и плотности тока 300 пА. СЭМ был оснащён детектором дифракции отражённых электронов (ДОЭ) HKL NordLys (Oxford Instruments). Спектры оптического отражения образцов в диапазоне 350–1100 нм были измерены на волноводном спектрометре AvaSpec-2048 (Avantes, Нидерланды).

Результаты и обсуждения

Для оценки профилей неоднородного распределения имплантируемых ионов по глубине образца Ge для Ag^+ с величиной $E = 30$ кэВ была использована компьютерная программа DYNA. Физические принципы расчёта, заложенные в неё, подробно обсуждаются в работе [19]. Данная программа основана на эффектах парных столкновений ускоренных ионов с атомами облучаемой матрицы, которые приводят к динамическому по времени облуче-

ния изменению элементного состава имплантированного слоя подложки, одновременно с учётом его изменения вследствие поверхностного распыления. Полученные результаты показывают, что имплантированные ионы Ag^+ залегают в Ge в соответствии с гауссовой статистической кривой распределения примеси с максимумом на глубине $R_p \sim 14.6$ нм и разбросом $\Delta R_p \sim 6.8$ нм. Толщина приповерхностного легированного слоя с учётом распыления поверхности при имплантации по оценке $h = R_p + 2\Delta R_p$ составляет порядка 30 нм. Данная величина h оказывается заметно меньше L_{TGe} .

На рис. 1а приведено СЭМ-изображение поверхности образца TFGе после имплантации с $D = 2.0 \cdot 10^{16}$ ион/см². Как видно, поверхность образца выглядит гладкой, без каких-либо существенных морфологических образований, аналогично неимплантированной TFGе. Облучение ионами Ag^+ при более высоких значениях $D = 6.0 \cdot 10^{16}$ ион/см² приводит к формированию структуры PGe на аморфной TFGе в виде наноструктурированных игольчатых образований примерно одного размера, хаотично ориентированных в плоскости поверхности образца (рис. 1б).

В настоящем исследовании, как и в работе [13], также поставлена технологически важная концептуальная задача, а именно, сравнение различных подходов по образованию пористости, индуцированной ионной

имплантацией в TFGе, с целью получения регулярных структур с контролируемыми свойствами и геометрией, чтобы обеспечить перенос технологии, разработанной ранее для объёмного материала с-Ge [12, 20], на слой TFGе. В обоих случаях, как в работе [13], где подложкой были слои TFGе, и работе [20], где применялась мишень с-Ge, имплантация осуществлялась лёгкими ионами Ge^+ при довольно высокой энергии $E = 300$ кэВ для подобного диапазона D от $3 \cdot 10^{15}$ до $3 \cdot 10^{16}$ ион/см². Были проведены сравнения между этими экспериментами и сделаны выводы о высоком сходстве морфологий сформированных имплантированных пористых слоёв в виде открытых вертикальных пор относительно плоскости образца. Для обоих типов облучённых подложек TFGе и с-Ge наблюдалось распухание имплантированного слоя до 400–500 нм, которое протекало монотонно с ростом D .

Как следует из экспериментальной части настоящей работы, были использованы параметры ионного облучения, достаточно сильно отличающиеся от используемых в работах [13, 20], а именно, ионы с большей массой Ag^+ при более низком значении $E = 30$ кэВ, сопоставимом значению $D = 3 \cdot 10^{16}$ ион/см². Однако в отличие от высокого сходства результатов формирования нанопор в работах [13] и [20], в случае ионов $^{108}\text{Ag}^+$ наблюдаются существенные различия в морфологии пористых структур для слоёв

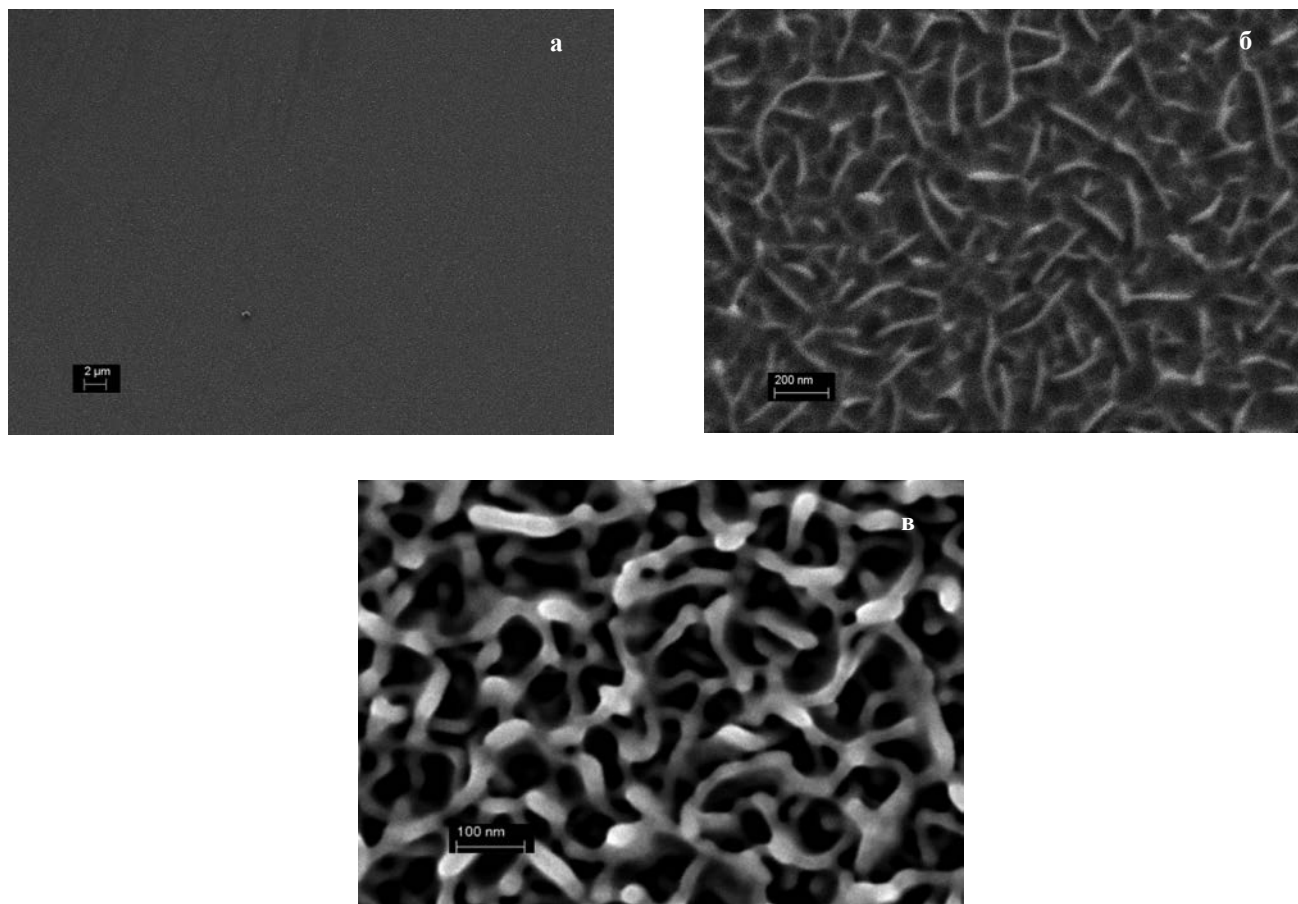


Рис. 1. СЭМ-изображение поверхности TFGе, имплантированной ионами Ag^+ при $E = 30$ кэВ, $J = 5$ мкА/см² и различных D : $2.0 \cdot 10^{16}$ (а), $6.0 \cdot 10^{16}$ ион/см² (б) и поверхности с-Ge, облучённой при $D = 6.0 \cdot 10^{16}$ (в).

TFGe (рис. 1б) и *c*-Ge (рис. 1в) [21], имплантированных в одинаковых условиях. В отличие от наноструктурированных игольчатых образований на аморфных TFGe (рис. 1б), на подложках *c*-Ge в начале ионной имплантации формировался аморфный слой *a*-Ge, а затем в этом слое создавалась губчатая нанопористая структура, состоящая из переплетённых нанонитей (рис. 1в). Таким образом, имеется экспериментальное подтверждение того, что исходная подложка одного и того же химического состава Ge, но с различными кристаллическими или аморфными структурами, при облучении тяжёлыми ионами приводит к образованию различных пористых морфологических форм, что не совпадает со случаями, описанными в работах [13, 20]. Кроме того, следует отметить, что если в работах [13, 20] авторы наблюдали непрерывное распухание пористых имплантированных областей, то в случае низкоэнергетической имплантации ионов Ag^+ с увеличением D реализуется иной сценарий – распыление ионно-генерированного пористого слоя [22]. Аналогично распыление было обнаружено и для слоя TFGe при облучении теми же ионами Ag^+ . Следует отметить, что подобная наноструктура NanoPGe была ранее впервые наблюдаена на подложках *c*-Ge, имплантированных ионами Ag^+ при заметно меньших $E = 10$ кэВ, тогда как при $E = 30$ кэВ на *c*-Ge формируется NanoPGe иной морфологической

формы в виде губчатой структуры из переплетающихся нанонитей Ge [23]. Точные механизмы, определяющие образование PGe слоёв различных морфологических форм, к настоящему времени ещё не определены, хотя в литературе подробно обсуждаются [11–14, 20–23].

Для количественной характеристики морфологии игольчатой структуры, образованной имплантацией ионов Ag^+ в слое TFGe, были измерены диаметры (d) наноиголок на СЭМ-изображении (рис. 1б) и построена гистограмма распределения d по размеру (рис. 2а) аналогично тому, как это было сделано ранее в работе [24] для образцов с нанопористой губчатой структурой, образованной на *c*-Ge путём её облучения ионами Ag^+ при $E = 30$ кэВ и $D = 7.4 \cdot 10^{16}$ ион/см². Поскольку величина d для наноиголок не постоянна в пределах одной наноиголочки, были определены значения d по нескольким измерениям вдоль длины множества отдельных наноиголок. Распределение d по размерам было аппроксимировано гауссовой кривой, из которой определены среднее значение $d_{\text{ср}}$, а также полная ширина на половине максимума (FWHM). Соответствующая гистограмма для измеренных значений диаметров показана на рис. 2а, из которой следует, что $d_{\text{ср}} = 20$ нм и FWHM = 10 нм. Полученные значения $d_{\text{ср}}$ для образца, сформированного в настоящей работе, меньше $d_{\text{ср}} = 29$ нм, определённой в работе [24], однако

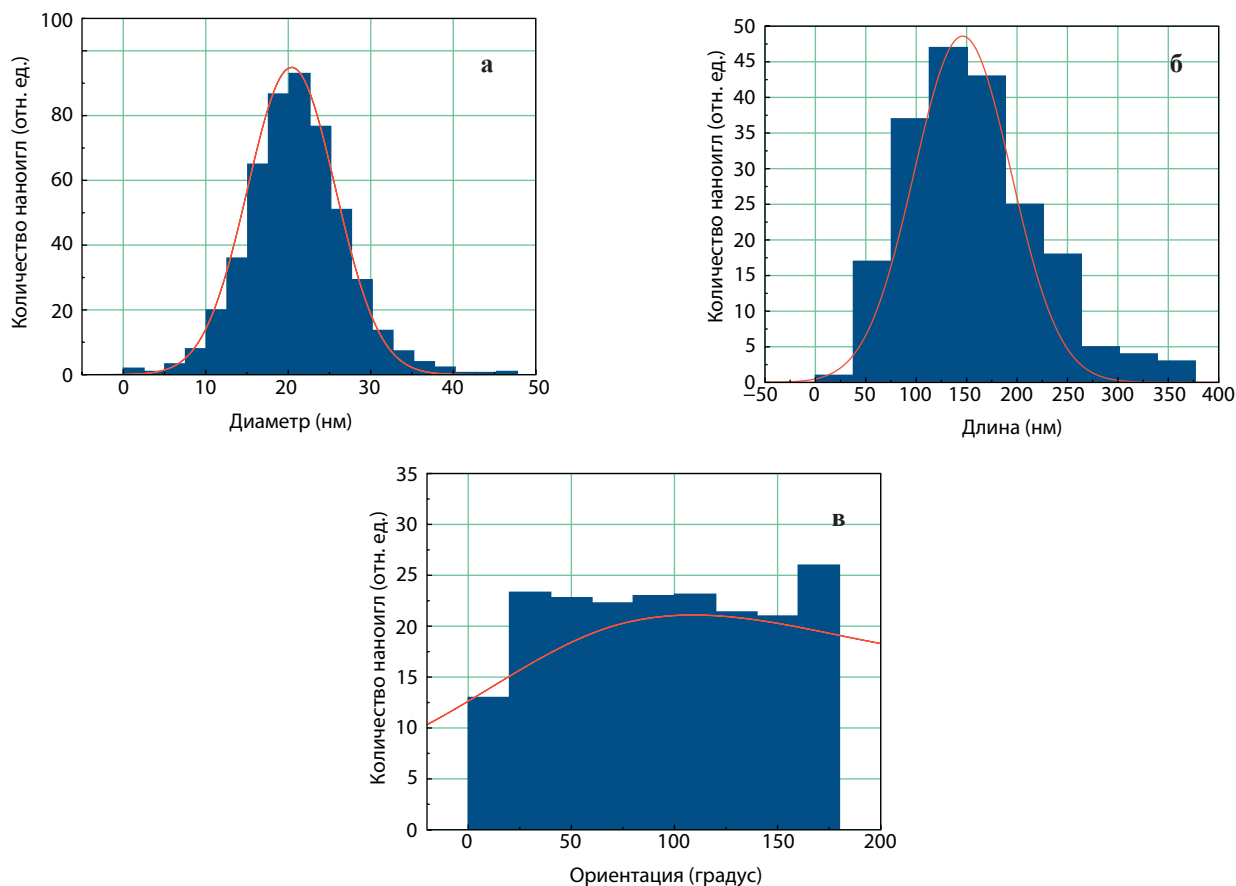


Рис. 2. Гистограммы распределения по размерам диаметров (а), длины игольчатых образований (б) и их ориентации на поверхности образца (в) для слоя TFGe, имплантированного ионами Ag^+ при $D = 6.0 \cdot 10^{16}$ ион/см².

при этом значения FWHM оказываются приблизительно одинаковыми в обоих случаях. Данные сравнительные количественные результаты дополнительно указывают на то, что имплантация ионами Ag^+ в одинаковых условиях и параметрах облучения приводит к появлению отличающихся морфологией NanoPGe-структур (игольчатых или губчатых с нанонитями) в случаях использования различных подложек из аморфного TFGе или *c*-Ge. Кроме того, дополнительно на основе проведённых измерений были построены характеристические гистограммы распределения длин сформированных нанонит (рис. 2б) и их ориентации (рис. 2в) относительно вертикальной оси на СЭМ-изображении СЭМ (рис. 1б). Как следует из соответствующих рисунков, на поверхности изображения расположены равномерно ориентированные иглы со средней длиной 150 нм, размеры которых располагаются в полном интервале значений от ~10 до 370 нм.

Спектры оптического отражения исходной TFGе, имплантированных образцов и для сравнения подложки *c*-Ge представлены на рис. 3. Спектр *c*-Ge характеризуется несколькими полосами с максимумами 276, двойным пиком около 564 и 820 нм (кривая 1), определяемыми внутризонным и межзонным электронными переходами [25]. Степень кристалличности Ge идентифицируется интенсивностью полосы отражения с максимумом 276 нм [26]. Как было установлено методом ДОО, TFGе является аморфным. Как видно, в спектре отражения TFGе отсутствуют коротковолновые полосы отражения 276 и 564 нм, что характеризует аморфную структуру осаждённой плёнки (рис. 3, кривая 2). Информация об оптическом отражении TFGе, имплантированного какими-либо ионами, в научной литературе не найдена.

У имплантированных ионами Ag^+ подложек TFGе последовательно с ростом D наблюдается уменьшение отражения, особенно в коротковолновой области спектров (рис. 3, кривые 3 и 4). Ранее в работах [27, 28] было установлено уменьшение интегрального отражения поверхности *c*-Ge в спектральном диапазоне от 200 до 3000 нм, имплантированной ионами Ni^+ и O^+ при

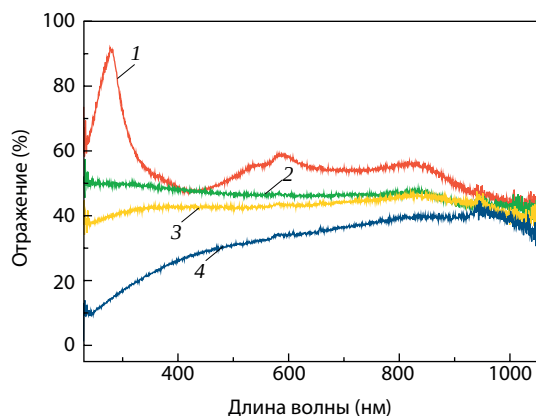


Рис. 3. Спектры оптического отражения подложки *c*-Ge (1), исходной TFGе (2) и TFGе, имплантированных ионами Ag^+ при различных D : $2.0 \cdot 10^{16}$ (3) и $6.0 \cdot 10^{16}$ ион/см² (4).

достаточно высоких энергиях $E = 45, 60$ и 75 МэВ и $D = 1.0 \cdot 10^{13} - 1.5 \cdot 10^{18}$ ион/см². В этих исследованиях, как следует из СЭМ-анализа, не наблюдалось поверхностной структуризации поверхности *c*-Ge после её облучения ионами. Таким образом, снижение интенсивности основных полос отражения *c*-Ge при 276 и 564 нм было объяснено аморфизацией приповерхностного имплантированного слоя *a*-Ge. Аморфизация возникает в *c*-Ge после её облучения ионами с малой D порядка 10^{13} ион/см² вследствие генерации радиационных дефектов [29]. При этом в осаждённом слое не исключается присутствие локальных наноразмерных областей квазикристаллической упорядоченной структуры.

Как следует из рис. 2, размеры структурных элементов игольчатого NanoPGe сопоставимы с длиной волны света, особенно для ультрафиолетового диапазона. Поэтому можно сделать вывод о существовании эффективного оптического рэлеевского рассеяния света при взаимодействии света с такими наноструктурами [30]. Такое оптическое рассеяние может быть дополнительным вкладом в общее уменьшение интегральной интенсивности отражения слоя NanoGe, помимо стимулированной аморфизации в процессе ионной имплантации. Для проверки относительных изменений интенсивности отражения вследствие структуризации поверхности Ge были рассчитаны модельные спектры оптического рассеяния наноструктурированных элементов (сферических частиц Ge различного размера в качестве простейшего объекта) в окружающей среде воздуха с применением электромагнитной теории Ми. Данная теория позволяет получать точное теоретическое решение для взаимодействия электромагнитной волны со сферическим объектом с определёнными размерами, характеризующим конкретными диэлектрическими контактами, а соответствующие уравнения представлены в монографии [30]. Диэлектрические постоянные наночастиц Ge, использованные для моделирования спектров оптического рассеяния, были использованы из работы [31]. Рассчитанные спектры рассеяния Ми для наночастиц Ge различных размеров (например, от 50 до 110 нм), сопоставимых с длиной игл (рис. 2а и б), представлены на рис. 4. Как следует из результатов моделирования, в рассматриваемой спектральной области от 300 до 1000 нм наблюдаются полосы рэлеевского рассеяния, максимумы которых смещаются в сторону длинных волн с увеличением размеров наночастиц Ge. Данные полосы рассеяния резонанса Ми проявляются в том же спектральном видимом диапазоне, что и основные полосы отражения в регистрируемых спектрах (рис. 3), что позволяет сделать вывод о качественном соответствии между результатами моделирования и экспериментом. Следует отметить, что измеренные спектры выглядят несколько шире, чем расчётные. Поэтому можно предположить, что экспериментально зарегистрированные спектры отражения представляют собой суперпозицию спектров отдельных наборов наночастиц Ge (структурных фрагментов) различных размеров. Очевидно, что

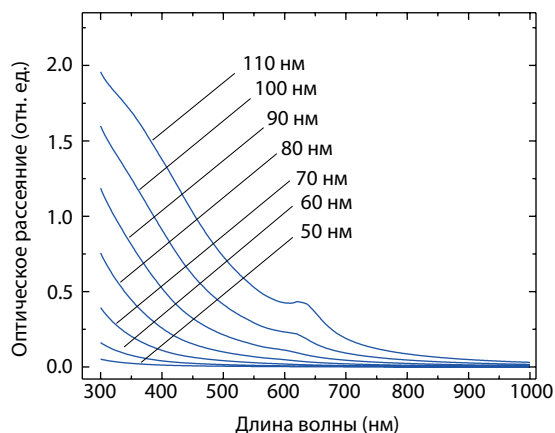


Рис. 4. Спектры оптического рассеяния для наночастиц *c*-Ge различного размера, находящихся на воздухе.

наночастицы Ge, использованные в расчёте, были лишь условными приближениями для описания размерных представлений наноигл. Обобщая, следует заключить, что снижение экспериментально-наблюдаемого отражения для ионно-имплантированных слоёв NanoPGe обусловлено как нарушением упорядоченности слоя TFGe на наноуровне (увеличение концентрации вакансий и междоузельных дефектов), так и на микроуровне (появление пористости).

Заключение

В настоящей работе продемонстрирована возможность получения TFGe аморфной структуры методом ионно-стимулированного осаждения при распылении мишени из *c*-Ge низкоэнергетическими ионами Xe^+ на подложку из кварцевого стекла, покрытого проводящим слоем Ni. Как продемонстрировано на примере, использование методики высокодозовой имплантации ионами Ag^+ слоёв TFGe с $E = 30$ кэВ, $J = 5$ мкА/см² и $D = 6.0 \cdot 10^{16}$ ион/см² позволяет сформировать тонкоплёночный аморфный слой Ag: NanoPGe морфологии игольчатого типа с хаотическим распределённых иголок в плоскости поверхности образца. Тип морфологических структур NanoPGe определяется не только параметрами ионной имплантации, но и особенностями изготовления матрицы Ge для её облучения.

Исследование выполнено в рамках госзадания ФИЦ КазНЦ РАН.

Литература

1. Selinis P., Farmakis F.: J. Electrochem. Soc. **169**, 10526 (2022)
2. Yanilmaz M., Cihanbeyoglu G., Kim J.: ACS Omega **8**, 16987 (2023)
3. Zhang Y., Zhou N., Liu X., Gao X., Fang S.: Dalton Trans. **51**, 14767 (2022)
4. Zhou Z., Liu W., Guo Y., Huang H., Ding X.: Coatings **12**, 1652 (2022)
5. Zegadi R., Lorrain N., Meziani S., Dumeige Y., Bodiou L., Guendouz M., Zegadi A., Charrier J.: Sensors **22**, 844 (2022)
6. Blond P., Bevernaegie R., Troian-Gautier L., Lagrost C., Hubert J., Reniers F., Raussens V., Jabin I.: Langmuir **36**, 12068 (2020)
7. Evtugin V.G., Rogov A.M., Valeeva L.R., Khabirova N.N., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Stepanov A.L.: Vacuum **177**, 109403 (2020)
8. Koleva M.E., Dutta M., Fukata N.: Mater. Sci. Engin. B **187**, 102 (2014)
9. Chen P., Hosseini M., Babakhani A.: Micromachines **10**, 367 (2019)
10. Каплунов И.А., Колесников А.И., Кропотов Г.И., Роголин В.Е.: Оптика и спектроскопия **126**, 271 (2019)
11. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Рогов А.М., Воробьёв В.В.: Формирование слоёв пористого кремния и германия с металлическими наночастицами. Казань: ФИЦПРЕСС, 2019.
12. Rudawski N.G., Jones K.S.: J. Mater. Res. **28**, 1633 (2013)
13. Impellizzeri G., Romano L., Bosco L., Spinella C., Grimaldi M.G.: Appl. Phys. Express **5**, 35201 (2012)
14. Klimovich I.M., Stepanov A.L.: Lett. Mater. **13**, 243 (2023)
15. Файзрахманов И.А., Базаров В.В., Степанов А.Л., Хайбуллин И.Б.: ФТП **40**, 419 (2006)
16. Stepanov A.L.: Appl. Phys. A **127**, 629 (2006)
17. Kelly P.J., Arnell R.D.: Vacuum **56**, 159 (2000)
18. Лядов Н.М., Базаров В.В., Вахитов И.Р., Гумаров А.И., Ибрагимов Ш.З., Кузина Д.М., Файзрахманов И.А., Хайбуллин И.Б., Шустов В.А.: ФТТ **63**, 1687 (2021)
19. Stepanov A.L., Zhikharev V.A., Hole D.E., Townsend P.D.: Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **166**, 26 (2000)
20. Romano L., Impellizzeri G., Tomasello M.V., Giannazzo F., Spinella C., Grimaldi M.G.: J. Appl. Phys. **107**, 84314 (2010)
21. Rogov A.M., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Stepanov A.L.: Composites Comm. **19**, 1 (2020)
22. Rogov A.M., Gumarov A.I., Tagirov L.R., Stepanov A.L.: Composites Comm. **16**, 57 (2019)
23. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Рогов А.М., Коновалов Д.А.: Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **7**, 83 (2024)
24. Pavlikov A.V., Rogov A.M., Sharafutdinova A.M., Stepanov A.L.: Vacuum **184**, 109881 (2021)
25. Тайц Я.: УФН **94**, 501 (1968)
26. Liu H., Li S., Sun P., Yang X., Liu D., Ji Y., Zhang F., Chen D., Cui Y.: Mater. Sci. Semicond. Processing **83**, 58 (2018)
27. Bhatia K.L., Singh P., Singh M., Kishore N., Mehra N.C., Kanjilal D.: Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **94**, 379 (1994)
28. Zhang Q.-C., Kelly J.C., Kenny M.J.: Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **47**, 257 (1990)
29. Koffel S., Scheiblin P., Claverie A., Benassayag G.: J. Appl. Phys. **105**, 13528 (2009)
30. Bohren C.F., Huffman D.R.: Absorption and scattering of light by small particles. New York: Wiley, 1983.
31. Palik E.D.: Handbook of optical constants of solids. New York: Academic Press, 1985.

Ионно-лучевые способы формирования оптических дифракционных решёток на основе слоёв нанопористого германия

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

Лаборатория нанооптики и наноплазмоники, лаборатория радиационной физики

Рассмотрены ионно-лучевые способы изготовления оптических тонкоплёночных дифракционных решёток на основе нанопористого *c*-Ge. В работе апробировано три экспериментальных метода, позволяющих создавать дифракционные элементы облучением через маску, а именно: (1) ионное распыление поверхности *c*-Ge, (2) ионная имплантация поверхности *c*-Ge и (3) ионно-стимулированное распыление нанопористых слоёв NanoPGe, предварительно сформированных ионной имплантацией.

Ion-beam methods for fabrication of optical diffraction grids based on nanoporous germanium layers

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

Nanooptics and nanoplasmonics laboratory, Laboratory of radiation physics

Ion-beam methods for the fabrication of optical thin-film diffraction gratings based on nanoporous *c*-Ge are considered. Three experimental methods for creating diffraction elements by irradiation through a mask are tested in the work, namely: (1) ion sputtering of the *c*-Ge surface, (2) ion implantation of the *c*-Ge substrate and (3) ion-stimulated sputtering of nanoporous NanoPGe layers pre-formed by ion implantation.

Введение

Оптические дифракционные решётки и их аналоги – фотонные кристаллы являются рабочими устройствами с периодическими структурами [1, 2], которые широко используются во многих областях науки и техники для решения таких задач, как например, объединение лазерных лучей [3], компрессия чирпированных импульсов [4], спектроскопия [5], функционирование жидкокристаллических дисплеев [6] и др.

Для изготовления дифракционных решёток и обеспечения в них фазового контраста в пределах периодических областей используются материалы, отличающиеся показателями преломления и поглощения. Определённый интерес среди таких материалов представляют периодически структурированные нанопористые среды различного химического состава. Известно о создании дифракционных решёток на основе слоёв нанопористого Si (PSi) [7]. Данные слои PSi создавались электрохимическими методами, а дифракционная структура на их поверхности формировалась при помощи фотоэлектронной литографии с последующим травлением облучённого слоя. Подобные дифракционные решётки на основе PSi слоёв активно используются в качестве оптических биологических сенсоров [8–10].

При создании различных типов оптических дифракционных решёток также используется полупроводниковый материал Ge [11, 12]. Более того, в фотонных устройствах на основе Ge, таких как солнечные батареи [13], оптоэлектронные преобразователи [14], фотодетекторы [15], применяется поверхностное микроструктурирование Ge. В таких материалах проявляются особые оптические эффекты, позволяющие реализовать на микроструктурированных слоях усилители поглощения [16], антиотражающие покрытия [17] и др.

Тонкоплёночные дифракционные оптические элементы могут быть созданы также на основе слоёв нанопористого Ge (NanoPGe) [18]. Слои NanoPGe в литературе носят условное название “чёрный Ge”. В работе [18] показан способ создания дифракционных решёток на слоях NanoPGe методом импринтинга (штамповки-получения оттиска). Для этого периодический рельеф первоначально формируется на поверхности мастер-штампа из твёрдого материала при помощи традиционной литографии. Затем мастер-штамп с заданной микроструктурой накладывается на подложку Ge, содержащую слой NanoPGe, предварительно изготовленный каким-либо методом. После этого происходит сжатие (впечатывание) мастер-штампа со слоем NanoPGe. При приложенном давлении нанопористый слой выборочно механически

деформируется (или подвергается дроблению) и удаляется из локализованных микроструктурированных областей. Таким образом данный способ предусматривает проведение нескольких технологических операций и не позволяет создавать дифракционные решётки в одном технологическом подходе.

Одним из перспективных методов формирования слоёв NanoPGe на поверхности монокристаллических *c*-Ge или аморфных *a*-Ge слоях является ионная имплантация [19]. В то же время, в ряде работ было продемонстрировано возможность создания оптических дифракционных периодических микроструктур на диэлектрических и полупроводниковых подложках облучением через маски различными ионами: алмазе (B^+) [20], полимере (Ag^+) [21], стёклах (He^+ , N^+ , Ag^+ , Au^+) [22–24], LiF (Cu^+ , Ag^+) [25] и Si [26]. Однако дифракционные решётки на основе пористых сред NanoPGe с помощью ионного облучения через маску до настоящего времени не изготавливались.

Таким образом, задача настоящего исследования заключается в оценке возможности использования ионно-лучевых способов создания дифракционных решёток оптического спектрального диапазона одновременно с формированием в качестве их периодических элементов микроструктур из слоёв NanoPGe. В работе апробировано три экспериментальных метода, позволяющих создавать дифракционные решётки облучением через маску, а именно: (1) ионное распыление поверхности *c*-Ge, (2) ионная имплантация поверхности *c*-Ge и (3) ионно-стимулированное распыление слоёв NanoPGe, предварительно сформированных ионной имплантацией. Образование различных дифракционных периодических структур демонстрируется на примерах облучения ионами Bi^+ и Bi^{++} подложек *c*-Ge с образованием слоёв Bi:NanoPGe. Вследствие своей большой массы и малого пробега данные ионы могут вызывать значительное разрушение облучаемой мишени, и поэтому достаточно часто используются для изучения процессов распыления поверхностей различных полупроводниковых материалов, например: Si, GaP, GaAs, GaSb, InAs, InSb [27, 28]. Следует отметить, что слои NanoPGe, сформированные облучением ионами Bi^+ (Bi:PGe), могут быть получены по технологии фокусированных ионных пучков в колонне электронного микроскопа [29]. Однако размеры обрабатываемых площадей, создаваемых фокусированными пучками, оказываются лишь порядка нескольких микрон. Поэтому данный подход не может быть эффективно использован на практике для создания масштабных (например, сантиметровых) оптических периодических дифракционных элементов.

Методика эксперимента

В работе были использованы полированные подложки *c*-Ge марки ГДГ-45 толщиной 0.7 мм с кристаллографической ориентацией (111), на поверхность которых накладывали маску в виде медной сетки с размером квадратных ячеек 20 и 40 мкм. В отдельных случаях использовали прово-

лочные маски других конфигураций. Облучение проводилось при комнатной температуре образцов на ускорителе ИЛУ-3, подробно описанном в монографии [19].

При изготовлении дифракционных элементов по первому способу ионного травления подложки *c*-Ge были подвергнуты облучению ионами $^{209}Bi^+$ с малой энергией $E = 18$ кэВ в диапазоне доз $D = 2.5 \cdot 10^{16} - 1.0 \cdot 10^{17}$ ион/см² и плотности тока в ионном пучке $J = 5$ мкА/см² на ускорителе ИЛУ-3.

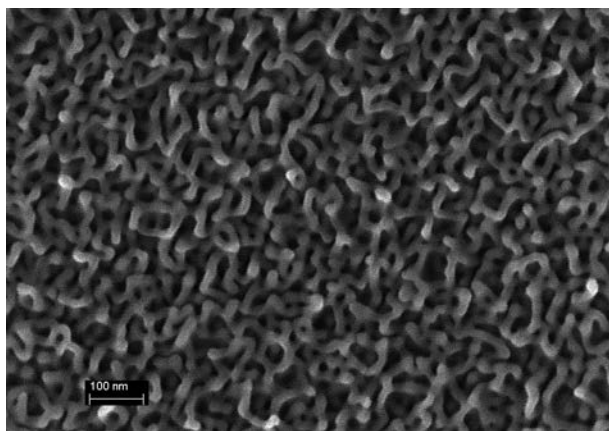
Для создания дифракционных решёток по второму способу был применён метод ионной имплантации, то есть глубинное внедрение примесных ионов. В данном подходе облучение проводилось двухзарядными ионами $^{209}Bi^{++}$ со значительно большей энергией, чем в первом случае, $E = 72$ кэВ, $D = 6.2 \cdot 10^{15}$ ион/см² и $J = 5$ мкА/см².

Третий радиационный способ получения дифракционных решёток является двухступенчатым. На первом этапе была проведена имплантация ионов Ag^+ с $E = 30$ кэВ, $J = 5$ мкА/см² $D = 6.0 \cdot 10^{16}$ ион/см² в подложку *c*-Ge без маски для формирования на её поверхности губчатого слоя Ag:NanoPGe, состоящего из переплетающихся нанонитей, как это было показано в работе [30]. На втором этапе данный образец был подвергнут локальному распылению через маску при низкоэнергетическом облучении ионами He^+ в вакууме, используя ионный источник Кауфмана, описанный в работе [31]. При этом использовались следующие режимы работы источника: энергия ионов He^+ $E = 1$ кэВ, $J = 150$ мкА/см² в течении 5 мин.

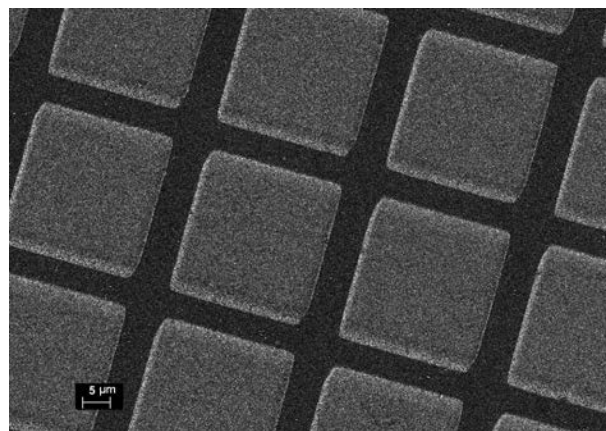
Морфология сформированных поверхностей наблюдалась и регистрировалась на высокоразрешающем сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Merlin (Carl Zeiss) при заданном ускоряющем напряжении зондирующих электронов 5 кВ и $J = 300$ пА, а также на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) Dimension FastScan (Bruker) методом количественного наномеханического картирования. Также характеристика сформированных дифракционных решёток проводилась с помощью оптического микроскопа Поляр-1 (Микромед) в режиме отражения. Регистрация оптической дифракционной картины осуществлялась при зондировании решётки гелий-неоновым лазером на длине волны 632.8 нм видимого спектрального диапазона.

Результаты и обсуждение

Для характеристики морфологии сформированной облучением поверхности образца Bi:NanoPGe ($E = 18$ кэВ, $D = 2.5 \cdot 10^{16}$ ион/см²) были проведены СЭМ-наблюдения, примеры которых приведены на рис. 1а. На СЭМ-изображении видно, что слой Bi:NanoPGe представляет из себя губчатую структуру, состоящую из переплетающихся плотноупакованных нанонитей Ge со средним диаметром ~20–25 нм. С ростом D до $1.0 \cdot 10^{17}$ ион/см² плотная губчатая структура качественно не изменяется, а происходит только небольшое утончение нанонитей на несколько нанометров. Поверхностная периодическая микроструктура, служащая основой для дифракционной



а



б

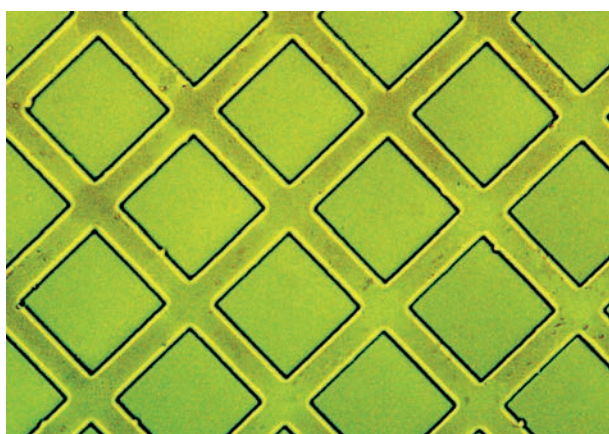
Рис. 1. СЭМ-изображение поверхности *c*-Ge, облучённой ионами Bi^+ при $E = 18$ кэВ, $J = 5$ мкА/см² и $D = 2.5 \cdot 10^{16}$ ион/см² (а). СЭМ-изображение микроструктурированного периодического слоя Bi:NanoPGe, сформированного ионным распылением (б).

решётки и сформированная распылением через маску, показана на СЭМ-изображении рис. 1б. Из рисунка видно, что решётка состоит из чередующихся светлых квадратных ячеек, относящихся к облучённым участкам поверхности образца со слоевой структурой Bi:NanoPGe, разделённых гладкими дорожками (тёмные области) исходного *c*-Ge. Размер облучённых участков Bi:NanoPGe 20×20 мкм соответствует размеру ячеек используемой маски.

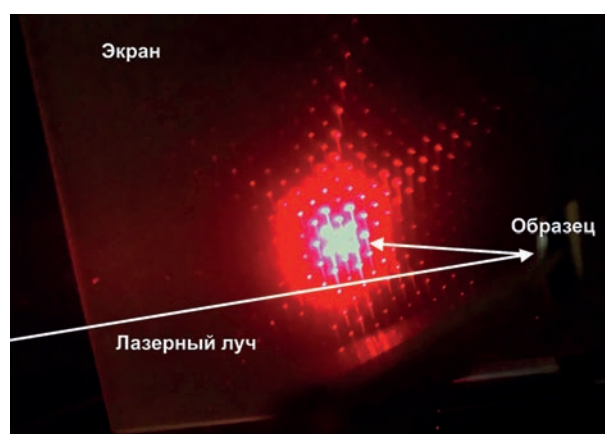
Для оценки глубины распыляемой поверхности *c*-Ge и образования слоя Bi:PGe были проведены СЭМ-измерения. Из полученных данных следует, что при заданных условиях имплантации происходит заметное распыление поверхности образца и образуется ступенька глубиной h_{sputt} . Установлено, что h_{sputt} практически линейно увеличивается с ростом D . Например, для максимального значения $D = 1.0 \cdot 10^{17}$ ион/см² величина h_{sputt} составляет 200 нм. Поскольку для каждого из используемых значений D формируются заглублённые периодические участки, то

можно заключить, что весь рассмотренный диапазон D пригоден для создания профильных (фазовых) дифракционных решёток.

На рис. 2а приведено изображение, полученное на оптическом микроскопе, соответствующее периодической микроструктурированной поверхности на основе Bi:NanoPGe, сформированной распылением *c*-Ge ионами Bi^+ через маску ($E = 18$ кэВ). Вся поверхность образца с масштабом около 0.5 см представляет собой упорядоченную решётку с квадратными ячейками. Более светлые квадратные ячейки соответствуют заглублённым областям Bi:NanoPGe, а стенки между ними состоят из *c*-Ge. Подобные периодические структуры могут играть роль фотонных кристаллов и дифракционных оптических элементов. В качестве иллюстрации на рис. 2б приведено дифракционное изображение, регистрируемое при зондировании профильной решётки, сформированной при $D = 2.5 \cdot 10^{16}$ ион/см², гелий-неоновым лазером на длине волны 632.8 нм спектра видимого



а



б

Рис. 2. Изображение, полученное на оптическом микроскопе, микроструктурированного слоя Bi:NanoPGe, полученного облучением ионами Bi^+ при $E = 18$ кэВ. Размер ячейки дифракционной решётки 20 мкм (а), изображение картины дифракционного рассеяния на экране, полученное на отражении от дифракционной решётки при зондировании гелий-неоновым лазером (б). Стрелкой показаны направления лазерного луча.

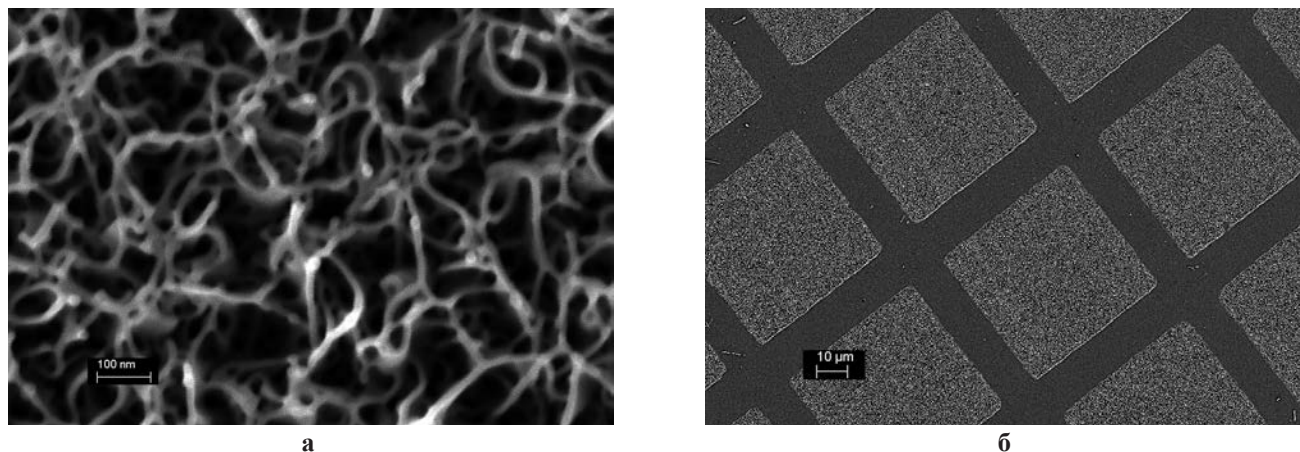


Рис. 3. СЭМ-изображение поверхности *c*-Ge, имплантированной ионами $^{209}\text{Bi}^{++}$ при $E = 72$ кэВ, $J = 5$ мкА/см 2 и $D = 6.2 \cdot 10^{15}$ ион/см 2 (а), СЭМ-изображение микроструктурированного слоя Bi:NanoPGe, сформированного ионной имплантацией (б).

диапазона в геометрии “на отражение”. Очевидно что, выбирая режимы ионного распыления, можно изменять тем самым профильную структуру поверхности Ge и, используя эффективный показатель преломления отдельных областей Bi:NanoPGe в решётке, управлять параметрами её оптических дифракционных элементов.

Рассмотрим второй способ изготовления дифракционных решёток. На рис. 3а приведено СЭМ-изображение поверхности подложки *c*-Ge, имплантированной ионами Bi^{++} с $E = 72$ кэВ. Видно, что облучённая поверхность представляет собой нанопористый слой Bi:NanoPGe губчатой структуры, состоящей из тонких переплетающихся

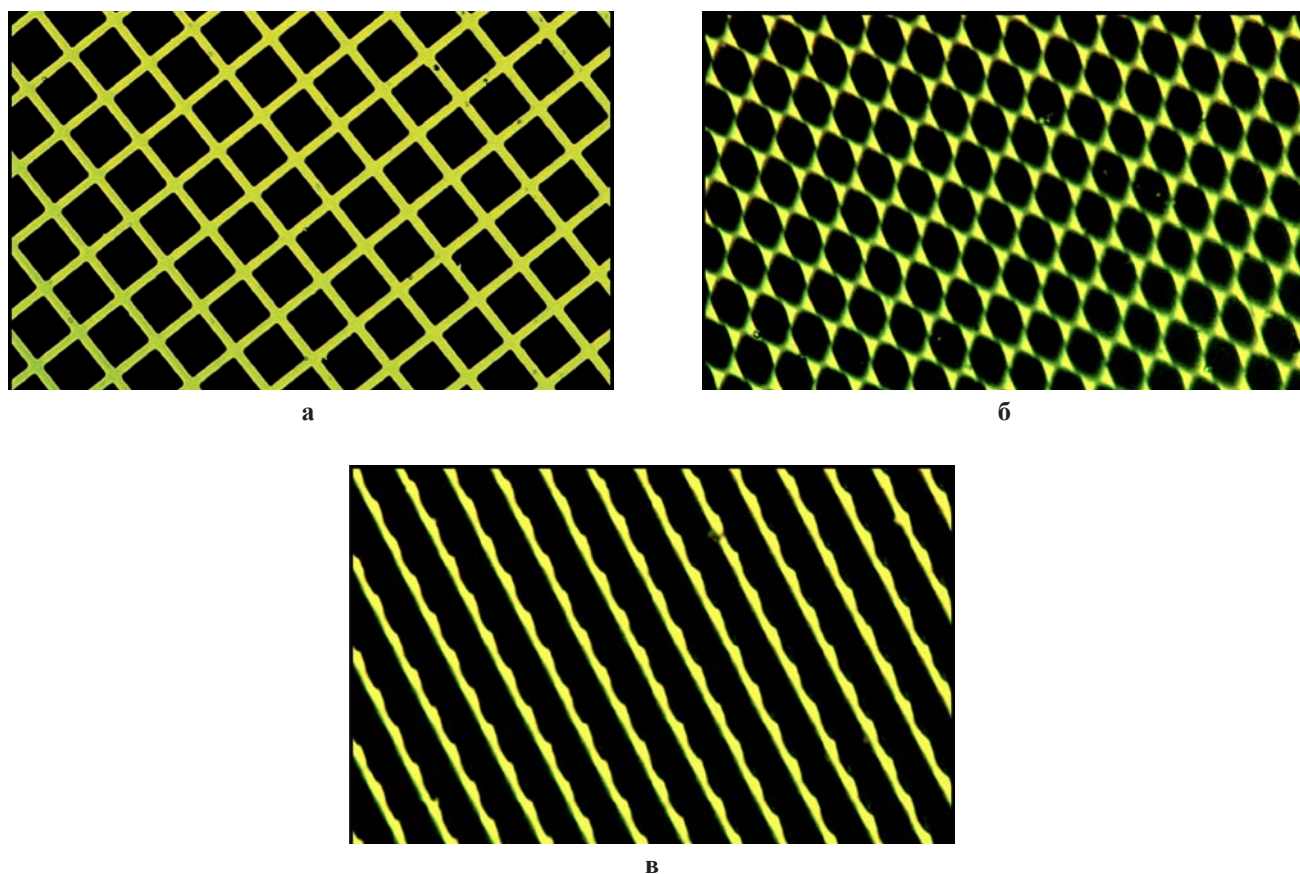


Рис. 4. Изображения, полученные на оптическом микроскопе, микроструктурированного слоя Bi:NanoPGe, сформированного имплантацией ионов Bi^{++} с $E = 72$ кэВ через маску с размером ячейки 40 мкм (а) и 2×5 мкм (б), а также при расстоянии между стенками 10 мкм (в).

нанонитей Ge со средним диаметром ~ 10 нм, сильно разнесённых друг от друга в отличие от плотных упаковок (рис. 1а). Сформированная облучением через маску периодическая структура показана на СЭМ-изображении (рис. 3б). Периодическая микроструктура состоит из чередующихся светлых квадратных ячеек, относящихся к имплантированным участкам поверхности образца со слоистой структурой Bi:NanoPGe, разделённых гладкими дорожками (тёмные области) необлученного *c*-Ge. Размер сторон имплантированных участков соответствует размеру ячеек используемой маски 40 мкм.

Для дополнительной характеристики структуры образца Bi:NanoPGe были проведены СЭМ-измерения. Из полученных результатов следует, что при заданных условиях имплантации происходит заметное распухание поверхности (увеличение объёма облучаемого материала Bi:NanoPGe относительно исходного Ge) и образуется возвышающаяся ступенька. При этом измеренная высота распухаемого слоя PGe составляет порядка 100–110 нм.

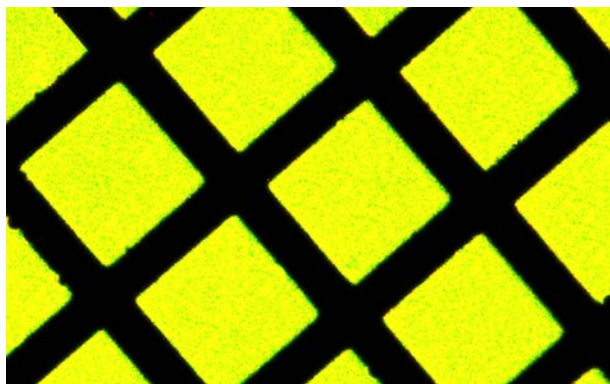
Поверхностные периодические микроструктуры на имплантированной ионами Bi^{++} через маску подложки *c*-Ge наблюдались также на оптическом микроскопе (рис. 4). Вся поверхность образца с масштабом около сантиметра представляет собой упорядоченную решётку с квадратными ячейками. Тёмные квадратные ячейки соответствуют имплантированным областям Bi:NanoPGe, светлые дорожки состоят из *c*-Ge. Подобные периодические структуры могут играть роль фотонных кристаллов и дифракционных оптических элементов. Схожая с рис. 2б дифракционная картина регистрировалась при зондировании периодически микроструктурированного элемента на основе Bi:NanoPGe гелий-неоновым лазером на отражение. Очевидно, что манипулируя режимами ионной имплантации, меняя тем самым структуру Ge и используя эффективный показатель преломления отдельных вспученных областей Bi:NanoPGe в дифракционной решётке, можно управлять её оптическими и дифракционными свойствами.

Для третьего способа изготовления дифракционной решётки предварительно, как было указано в экспериментальной части, были сформированы губчатые слои Ag:NanoPGe на поверхности подложек *c*-Ge. После облучения данных образцов низкоэнергетическими ионами Xe^+ через маску также были получены периодические микроструктуры из чередующихся светлых облучённых и тёмных необлучённых областей (в отличие от решётки на рис. 4), как это показано на изображении, полученном на оптическом микроскопе (рис. 5). Однако в отличие от предыдущих способов изготовления дифракционных решёток (рис. 1б и 3б), слой NanoPGe располагается не внутри квадратных ячеек, а сохраняется на участках, закрытых во время облучения маской. Внутренние области ячеек состоят из *c*-Ge, поскольку поверхностный имплантированный слой Ag:NanoPGe полностью распадается во время облучения ионами Xe^+ .

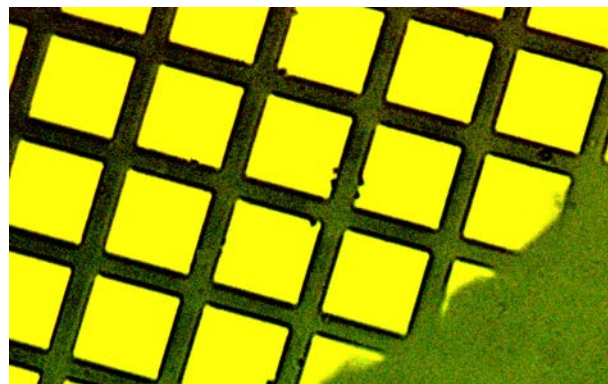
Заключение

Таким образом, продемонстрированы новые способы создания профильной дифракционной решётки:

- (1) на основе утопленных в образец периодических квадратных элементов из губчатого слоя Bi:NanoPGe, состоящего из плотноупакованных переплетающихся нанонитей, полученных распылением ионами Bi^+ поверхности полированной подложки *c*-Ge через поверхностную маску при их нормальном падении;
- (2) на основе возвышающихся над поверхностью исходной подложки периодических квадратных элементов из губчатого слоя Bi:NanoPGe, состоящего из разнесённых в пространстве переплетающихся нанонитей, полученных в процессе высокодозовой имплантации ионами Bi^{++} подложки *c*-Ge через поверхностную маску;
- (3) на основе возвышающихся над поверхностью исходной подложки периодических сетчатых структур



а



б

Рис. 5. Изображения, полученные на оптическом микроскопе, микроструктурированного слоя Ag:NanoPGe, сформированного имплантацией ионов Ag^+ с $E = 30$ кэВ и подвергнутого впоследствии облучению ионами Xe^+ через маску. Размер ячейки 40 мкм (а) и фрагмент решётки на краю маски (б).

из губчатого слоя Ag:NanoPGe, состоящего из переплетающихся нанонитей, полученных в два этапа имплантацией ионов Ag^+ в подложку c-Ge с последующим локальным распылением сформированного имплантацией слоя Ag:NanoPGe через маску при низкоэнергетическом облучении ионами Xe^+ в вакууме.

Исследование выполнено в рамках госзадания ФИЦ КазНЦ РАН и РФФИ № 25-29-00022.

Литература

1. Wang Y., Yuan Y., Zhang K.: Adv. Phys. Res. **3**, 2400076 (2024)
2. Luo L., Shan S., Li X.: Sensors **24**, 6617 (2024)
3. Zhang J., Peng H., Fu X., Liu Y., Qin L., Miao G., Wang L.: Opt. Express **21**, 3627 (2013)
4. Stankevicius L., Tamulevicius T., Zutautas A., Juodenas M., Juskevicius K., Drazdys R., Tamulevicius S.: Opt. Laser Technol. **126**, 106071 (2020)
5. Shatokhin A.N., Kolesnikov A.O., Sasorov P.V., Vishnyakov E.A., Ragozin E.N.: Opt. Express **26**, 19009 (2018)
6. Yin K., Hsiang E.-L., Zou J., Li Y., Yang Z., Yang Q., Lai P.-C., Lin C.-L., Wu S.-T.: Light Sci. Appl. **11**, 161 (2012)
7. Lai M., Sridharan G.M., Parish G., Bhattacharya S., Keating A.: Nanoscale Res. Lett. **7**, 645 (2012)
8. Ryckman J.D., Liscidini M., Sipe J.E., Weiss S.M.: Appl. Phys. Lett. **96**, 171103 (2010)
9. Kemling J.W., Qavi A.J., Bailey R.C., Suslick K.: J. Phys. Chem. Lett. **17**, 2934 (2011)
10. Chung H., Boriskina S.: Opt. Express **29**, 421656 (2021)
11. Zhu H., Zhang Z., Xu J., Ren Y., Zhu Z., Xu K., Wang Z., Wang C.: J. Manufact. Process. **69**, 351 (2021)
12. Zhu X., Li S., Sun A., Pan Y., Liu W., Wu Y., Zhang G., Shi Y.: Beilstein J. Nanotechnol. **14**, 478 (2023)
13. Zhou Z., Liu W., Guo Y., Huang H., Ding X.: Coatings **12**, 1653 (2022)
14. Cavalcoli D., Fazio M.A.: Mater. Sci. Semicon. Proc. **92**, 28 (2019)
15. Song J., Yuan S., Cui C., Wang Y., Li Z., Wang A.X., Zeng C., Xia J.: Nanophotonics **10**, 1081 (2021)
16. Zhang Y., Cao X., Ding Y., Xue Z., Liu X., Li S., Sun J., Jin Y., Wu A.: IEEE Photon. J. **14**, 464506 (2022)
17. Wang K., Zhang Y., Chen J., Li Q., Tang F., Ye X., Zheng W.: Coatings **14**, 262 (2024)
18. Weiss S.M., Reckman J.D., Liscidini M., Sipe J.E. Direct imprinting of porous substrates. US Patent No. 9352543B2, 2016.
19. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Рогов А.М., Воробьев В.В.: Формирование слоёв пористого кремния и германия с металлическими наночастицами, Казань: ФИЦПРЕСС, 2019.
20. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Галютдинов М.Ф., Валеев В.Ф., Курбатова Н.В., Воробьев В.В.: Известия РАН. Серия физическая. **82**, 149 (2018)
21. Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Галютдинов М.Ф., Степанов А.Л.: Квантовая электроника **48**, 1 (2018)
22. Banyasz I., Fried M., Duesco C., Vertesy Z., Hajdu C.: Proc. SPIE **3291**, 55 (1988)
23. Wang G., Wang J., Dai H., Liu C.: Opt. Comm. **482**, 126689 (2021)
24. Каветцкий Т.С., Галютдинов М.Ф., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Евлюхин А.Б., Степанов А.Л.: Письма ЖТФ **39**, 17 (2013)
25. Dresvyanskiy V.P., Paperny V.L., Chernykh A.A., Rakevich A.L., Martynovich E.F.: AIP Conf. Proc. **2392**, 40007 (2021)
26. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф.: Дифракционная периодическая микроструктура на основе пористого кремния. Патент РФ № 2597801, 2015.
27. Kudriavtsev Y., Asomoza R., Hernandez A., Kazantsev D.Y., Ber B.Y., Gorokhov A.N.: J. Vac. Sci. Technol. A **38**, 53203 (2020)
28. Tolstoguzov A., Ieshkin A.E., Kultusurin I.N., Mazarov P.: Results Surf. Interfaces **19**, 100491 (2025)
29. Bottger R., Heining K.-H., Bischoff L., Liedke B., Facko S.: Appl. Phys. A **53**, 113 (2013)
30. Stepanov A.L., Rogov A.M.: Opt. Comm. **474**, 126052 (2020)
31. Stepanov A.L., Faizrakhmanov I.A., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Rogov A.M., Kononov D.A.: Appl. Phys. A **131**, 647 (2025)

Квазиоднородное распределение намагниченности в планарных микрочастицах никеля квадратной формы, обусловленное вогнутостью сторон

Д. А. Бизяев, Н. И. Нургазизов, А. П. Чукланов, А. А. Бухараев

Лаборатория физики и химии поверхности

Методом компьютерного моделирования локального распределения намагниченности исследована магнитная структура планарных частиц Ni квадратной формы с различной степенью вогнутости сторон. Показано, что за счёт анизотропии формы квазиоднородная намагниченность в таких частицах может сохраняться при латеральных размерах до 9 мкм. Методами магнитно-силовой микроскопии экспериментально подтверждено сохранение квазиоднородной намагниченности в частицах Ni с латеральными размерами до 6.6 мкм.

Quasi-uniform state of magnetization in planar square-shaped Ni microparticles caused by concavity of sides

D. A. Bizyaev, N. I. Nurgazizov, A. P. Chuklanov, A. A. Bukharaev

Laboratory of Surface Physics and Chemistry

Using computer modeling of the local magnetization distribution, the magnetic structure of planar square Ni particles with the set of degrees of side concavity was studied. Due to shape anisotropy, the quasi-uniform magnetization in such particles can be maintained at lateral dimensions of up to 9 μm . Magnetic force microscopy experimentally confirmed that quasi-uniform magnetization in Ni particles can be stable with lateral dimensions of up to 6.6 μm .

Введение

Одинокные ферромагнитные микро- и наночастицы могут быть использованы для создания элементов энергонезависимой памяти и устройств для выполнения логических операций [1]. Для этого хорошо подходят частицы, имеющие в свободном состоянии однородную или близкую к ней, так называемую “квазиоднородную” намагниченность. В этом случае направление намагниченности такой частицы может быть отождествлено с информацией: одно состояние намагниченности будет соответствовать 0, второе 1 и т. д. При стандартном подходе используются два противоположных направления намагниченности, и одна частица может хранить один бит информации. Для его стабильного хранения частица должна обладать высокой коэрцитивной силой, и поэтому изменение направления её намагниченности (т.е. запись информации) требует использования внешнего магнитного поля достаточно большой величины [1–6]. Снижение коэрцитивного поля частицы на время записи информации или использование других подходов для изменения направления её намагниченности могут существенно увеличить энергоэффективность создаваемых устройств для хранения и обработки информации. Для повышения энергоэффективности могут использоваться

разные подходы, например, снижение коэрцитивной силы частицы за счёт её нагрева [3, 4], изменение направления её намагниченности за счёт спин-поляризованного тока [2] или за счёт наведения в ней механических напряжений [5, 6] путём создания упругой деформации. При этом два последних подхода позволяют изменять направление намагниченности частицы без внешнего магнитного поля, а использование механических напряжений, согласно теоретическим оценкам, может существенно (на несколько порядков) снизить затраты на запись одного бита информации по сравнению с традиционным подходом, использующим внешнее магнитное поле [7, 8].

Для того чтобы наводимые механические напряжения, за счёт создаваемой ими магнитоупругой анизотропии, существенно влияли на магнитные свойства частицы, необходимо, чтобы она обладала достаточно большими размерами. Когда размеры частицы малы, её магнитная энергия меньше энергии тепловых флуктуаций и частица находится в суперпарамагнитном состоянии [9, 10]. Увеличение размеров частицы до определённого критического объёма приводит к её переходу в ферромагнитное состояние. При этом магнитные моменты внутри частицы выстраиваются в одном направлении (частица становится однодоменной), её коэрцитивная сила становится максимально возможной и совпадает с полем анизотропии (петля

магнитного гистерезиса частицы имеет прямоугольную форму) [10, 11]. Для монокристаллической никелевой сферы такой критический диаметр согласно теоретическим оценкам составляет при комнатной температуре 27 нм. Дальнейшее увеличение размеров приводит к тому, что однородно намагниченное состояние перестаёт быть энергетически выгодным. Простые расчёты [9–11] показывают, что максимальный диаметр однородно намагниченной никелевой сферы составляет 65 нм. При больших размерах распределение магнитных моментов частицы может лежать в очень широком диапазоне конфигураций. При этом наводимые механические напряжения могут существенно на него влиять, однако при их отсутствии общий магнитный момент частицы, как правило, становится близок к нулю, что делает невозможным её использование в качестве носителя информации. Но за счёт подбора формы частицы (размер которой больше, чем диаметр однодоменного состояния) можно реализовать квазиоднородное состояние намагниченности, при котором магнитные моменты не направлены строго параллельно, как в случае однодоменной частицы, но имеют общее преимущественное направление. Как следствие, такая частица может иметь заметно отличный от нуля внешний магнитный момент, который можно зарегистрировать экспериментально и её потенциально можно использовать как носитель информации.

Одна из легко реализуемых на практике геометрических форм частицы – это планарная форма, когда один из её размеров существенно меньше двух других. В планарных частицах удобно создавать контролируемые механические напряжения за счёт изменения размеров подложки, на которой они расположены. Локальные магнитные моменты в таких частицах обычно ориентируются перпендикулярно меньшему размеру, и для них остаётся подобрать только двумерную (2D) форму для сохранения квазиоднородной намагниченности. В этом случае наиболее перспективными для создания элементов памяти могут стать планарные частицы с высоким порядком симметрии (треугольные, квадратные и т. д.). При этом порядок симметрии сформировавшейся в частице намагниченности будет таким же, как и у симметрии её формы [12–14]. Это накладывает ограничения на возможные формы частиц при их практическом использовании. У многоугольных частиц может оказаться слишком много состояний, в которых направление намагниченности повернуто относительно соседнего на небольшой угол, что может сильно затруднить идентификацию каждого состояния в реальных условиях и привести к ошибкам при записи и считывании информации. Поэтому основной интерес исследователей сосредоточен на треугольных и квадратных частицах. Для них проведён теоретический анализ [15–17] процесса изменения направления квазиоднородной намагниченности под действием механических напряжений, наводимых деформацией подложки. Продемонстрирована возможность разворота намагниченности на 180° для квадратных частиц за счёт последовательного переключения механическими напряжениями направления

намагниченности через промежуточные состояния [15, 17]. При этом исследованные с помощью компьютерного моделирования частицы имеют относительно малые латеральные размеры в диапазоне от 50 до 500 нм, что требует создания в них достаточно больших одноосных напряжений даже при использовании материалов с большой магнитострикцией [18].

Увеличение латеральных размеров частиц с одновременным сохранением однородной намагниченности помогло бы существенно снизить величину создаваемого напряжения или позволило использовать более доступные материалы с меньшей магнитострикцией. Понятно, что использование таких частиц приведёт к уменьшению плотности записи информации, однако выигрыш в энергозатратах может оказаться настолько существенным, что устройства на их основе могут найти применение в отраслях, где критически важно сверхнизкое энергопотребление, например, носимые устройства, исследование сверхглубокого космоса и т. п. Также такие большие частицы могут представлять потенциальный интерес при создании стрейнтронных логических элементов [7, 8] или сверхпроводящего спинового клапана [19], где намагниченность одного из слоёв гетероструктуры должна легко поворачиваться под внешним воздействием, в то время как другой слой должен сохранять исходную намагниченность. Поэтому интересной представляется задача по определению максимальных размеров планарных ферромагнитных частиц, при которых в них сохраняется квазиоднородная намагниченность. В данной работе такие исследования были выполнены для планарных частиц Ni, представляющих собой квадрат со скруглёнными углами и вогнутыми к центру сторонами.

Моделирование локального распределения намагниченности

На первом этапе исследований было проведено моделирование локального распределения намагниченности в планарных никелевых частицах различной формы. Для моделирования использовалась программа OOMMF [20]. Основной задачей было определить диапазон латеральных размеров, в котором за счёт анизотропии формы в частице энергетически выгодным является квазиоднородное состояние. Методами компьютерного моделирования исследовались планарные частицы Ni, имеющие форму квадрата с различной степенью вогнутости сторон (рис. 1). Форма частиц задавалась с помощью масок, нарисованных в графическом редакторе. Для большего соответствия созданной маски реальной частице её углы имели скругление (рис. 1), радиус которого составлял 2% от длины стороны квадрата. Также скругление было сделано для снижения вероятности появления артефактов при моделировании. В качестве параметра, характеризующего латеральный размер частицы, принималась длина стороны исходного квадрата (обозначена буквой L на рис. 1в). Ещё одним параметром, характеризующим ча-

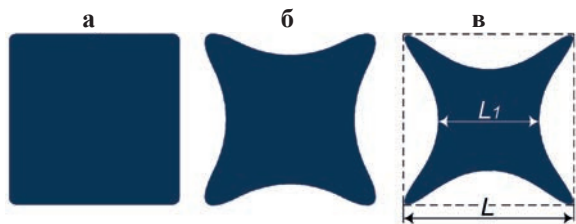


Рис. 1. Графические маски для моделирования частиц с разной степенью вогнутости сторон: 0% – квадратная частица (а), 32% – (б), 40% – (в). Контурной линией показан периметр квадрата, в которую вписана частица с латеральным размером L . L_1 – размер частицы в центре вдоль оси симметрии (в самой узкой части).

стицу и варьируемым при моделировании, была степень вогнутости сторон. Под степенью вогнутости понималось взятое в обратных процентах отношение размера частицы в самой узкой части к её латеральному размеру (рис. 1в, $(1 - L_1/L) \cdot 100\%$). Изображения нескольких из использованных масок представлены на рис. 1. Нулевая степень вогнутости была приписана простой квадратной частице (рис. 1а).

При моделировании исследуемая частица разбивалась на элементарные ячейки размером $5 \times 5 \times 30$ нм³, где последний размер соответствовал высоте. Каждая ячейка рассматривалась как единичный диполь, задавалось их начальное угловое распределение в веществе, и в результате ООММФ-расчётов диполи выстраивались в конфигурацию, при которой энергия магнитной подсистемы была минимальна. Полученное распределение намагниченности считалось равновесным для данного начального состояния, и для него находилась плотность полной энергии. Расчёты проводились для двух начальных состояний намагниченности: однородного и четырёхдоменного (так называемая структура Ландау). Стабильным и реализованным в частице считалось состояние с наименьшей плотностью энергии.

При проведении расчётов использовались следующие параметры: намагниченность насыщения $Ni M_s = 490$ кА/м, константа обменного взаимодействия $A = 9 \cdot 10^{-12}$ А/м. Считалось, что константа магнитной кристаллической анизотропии K_1 равна нулю, т.е. моделируемые частицы имеют поликристаллическую структуру аналогично экспериментально получаемым. Шаг увеличения латерального размера составлял 100 нм, но в области, близкой к переходной, для увеличения точности определения критического размера частиц он снижался до 10 нм.

Поведение плотности магнитной энергии частицы в зависимости от её латеральных размеров и двух начальных состояний (однородно намагниченного и четырёхдоменного) представлено на рис. 2. Можно заметить, что при малых латеральных размерах плотность магнитной энергии для начального четырёхдоменного состояния всегда больше таковой для однодоменного состояния, поскольку превалирует обменное взаимодействие. В обоих случаях увеличение латеральных размеров приводит к уменьшению плотности магнитной энергии, однако в случае четырёхдоменного состояния она уменьшается

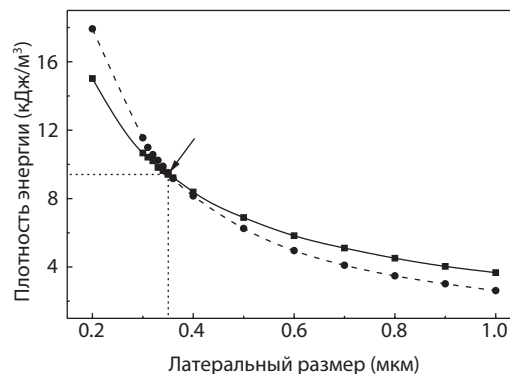


Рис. 2. Зависимость плотности энергии для однодоменного (сплошная кривая) и четырёхдоменного (пунктирная кривая) состояния частицы от её латеральных размеров. Степень вогнутости частицы – 24%. Стрелкой обозначено место пересечения кривых, означающее переход из однодоменного состояния в четырёхдоменное при изменении латеральных размеров.

быстрее. В результате при определённых размерах это состояние становится энергетически выгодным, и частица теряет квазиоднородную структуру намагниченности (на рис. 2 этот размер обозначен стрелкой). Для частиц истинно квадратной формы (рис. 1а) квазиоднородная намагниченность сохраняется до латеральных размеров 0.08 мкм, что хорошо согласуется с результатами, полученными другими авторами [21]. При размере 0.09 мкм энергетически выгодным становится четырёхдоменное состояние. Вогнутость сторон приводит к тому, что состояние квазиоднородной намагниченности остаётся энергетически выгодным при больших размерах частицы. Например, для вогнутости 24% этот размер составляет 0.35 мкм (рис. 2).

Все полученные при моделировании результаты представлены в виде графика на рис. 3, который в определённом смысле является диаграммой магнитного состояния. В представленных координатах “степень

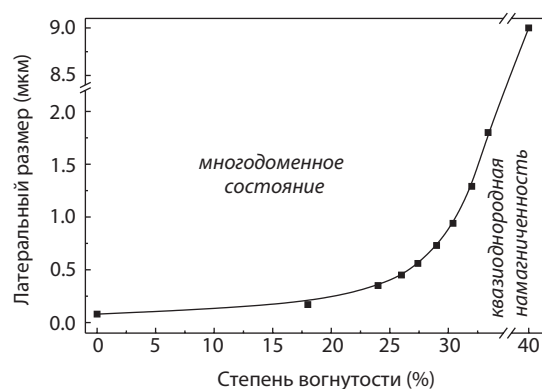


Рис. 3. Диаграмма магнитного состояния частицы Ni в зависимости от латерального размера и степени вогнутости сторон, полученная в результате компьютерного моделирования. Сплошной линией показана граница перехода: левее энергетически выгодным является многодоменное состояние (а именно, четырёхдоменная структура Ландау), правее – квазиоднородное состояние. Точки – расчётные размер и степень вогнутости сторон, в которых наблюдается переход.

вогнутости – латеральный размер” левее сплошной линии энергетически выгодным является многодоменное состояние намагниченности (а именно, четырёхдоменная структура Ландау), правее же энергетически более выгодно квазиоднородное состояние намагниченности. Согласно полученным данным при большой вогнутости сторон (т.е. за счёт анизотропии формы) квазиоднородное состояние намагниченности остаётся энергетически выгодным при латеральном размере планарных частиц Ni в несколько микрон.

Магнитно-силовая микроскопия планарных никелевых частиц с анизотропией формы

На втором этапе исследований магнитная структура планарных Ni частиц была исследована экспериментально методами магнитно-силовой микроскопии. Для этого было изготовлено 12 образцов с частицами, имеющими две разные степени вогнутости сторон. Первые шесть образцов со степенью вогнутости сторон 32% содержали в себе массивы частиц с латеральными размерами: 0.9, 1.2, 1.5, 2.4, 3.3, 5.5 мкм. Оставшиеся шесть образцов со степенью вогнутости 40% содержали в себе массивы частиц с латеральными размерами 2.2, 3.3, 4.8, 6.0, 6.6, 9.4 мкм. Количество частиц в массиве варьировалось от 8 до 30 шт, в зависимости от размеров. Расстояние между соседними частицами внутри массива как минимум в три раза превышало их латеральные размеры. Это было сделано для того, чтобы свести к минимуму влияние магнитного поля частицы на соседние. Некоторые массивы были продублированы на разных образцах. Выбор такой степени вогнутости для экспериментальных исследований был обусловлен тем, что, согласно расчётам, квазиоднородная намагниченность наблюдается в них при латеральных размерах вплоть до нескольких микрон (рис. 3).

Для создания частиц Ni использовалось напыление металла через маску и lift-off методика. Маска формировалась на поверхности оптически полированной подложки из монокристаллического кремния (Si). В качестве материала маски использовался полиметилметакрилат (ПММА) толщиной около 100 нм. Для обеспечения равномерности слоя ПММА он наносился на поверхность непрерывно вращающейся подложки в виде капли раствора в хлороформе (0.55%) и сушился при комнатных условиях. Далее подложка с плёнкой ПММА высушивалась на воздухе при температуре около 100 °C в течении 1.5 ч. Полученная полимерная плёнка экспонировалась по маске с помощью электронно-лучевого литографа (литографическая приставка Nanomaker к сканирующему электронному микроскопу Carl Zeiss EVO 50 XVP). Экспонированный ПММА растворялся в смеси метилизобутилкетона с изопропиловым спиртом в соотношении 1:3. После промывки дистиллированной водой подложка с маской высушивалась в течении 30 мин и проводился контроль её качества с помощью атомно-

силового микроскопа (АСМ). Маска представляла собой заготовку для создания нескольких массивов частиц, имеющих разные размеры и степень вогнутости сторон. Затем на поверхность напылялся слой Ni методом распыления электронным лучом твердотельной мишени. Напыление проводилось в условиях сверхвысокого вакуума (порядка 10^{-8} мбар) на установке Multiprobe P (Omicron). Площадь напыления Ni существенно превышала размеры сформированной маски и поэтому все полученные частицы имели одинаковую толщину. Далее излишки металла с поверхности подложки удалялись при растворении ПММА в хлорбензоле в ультразвуковой ванне. После этого образец промывался дистиллированной водой и высушивался. Перед проведением измерений образец отжигался в условиях вакуума при температуре 300 °C в течении двух часов. Такого отжига обычно достаточно для того, чтобы существенно снизить влияние дефектов, возникающих при напылении частиц, на их магнитную структуру. Перед проведением измерений образцы однородно намагничивались в течении 2 мин во внешнем магнитном поле, направленном вдоль одной из сторон частицы.

Для контроля качества получаемых полимерных масок, формы и геометрических размеров частиц Ni использовался АСМ Ntegra. Для АСМ-измерений использовались кремниевые зонды “Tap150-AI” (BudgetSensor). Размер области, занимаемой частицами на каждом образце, составлял приблизительно 130×130 мкм², что сопоставимо с максимальным полем сканирования АСМ (100×100 мкм²). АСМ-изображения одного из шести образцов с частицами со степенью вогнутости 32% представлены на рис. 4. Можно заметить, что некоторые из наблюдаемых частиц имеют неправильную геометрию, поэтому при проведении магнитно-силовых измерений они были исключены из рассмотрения.

Измерения в режиме магнитно-силового микроскопа (МСМ) были выполнены низкомоментными магнитными зондами “PPP-LM-MCMR” (Nanosensor). Все МСМ-измерения проводились в однопроводном режиме для снижения влияния МСМ-зонда на распределение намагниченности в частицах. МСМ-изображения, полученные на частицах Ni со степенью вогнутости сторон 32%, показали хорошее совпадение расчётных и экспериментальных данных. Для частиц размером 0.9 мкм наблюдались МСМ-изображения со слабым контрастом и низким соотношением полезного сигнала к шуму. Это согласуется с литературными данными [21, 22] и накопленным опытом, и, по всей видимости, связано с низким магнитным моментом небольших по размерам частиц. Несмотря на это, полученные МСМ-изображения можно было интерпретировать как сигнал от частицы в состоянии с квазиоднородной намагниченностью. При увеличении латерального размера до 1.2 мкм наблюдаемое МСМ-изображение имело гораздо лучшее соотношение полезного сигнала к шуму и позволяло сделать выводы о том, что частица находится в состоянии с квазиоднородной намагниченностью (рис. 5а, в). Для частиц

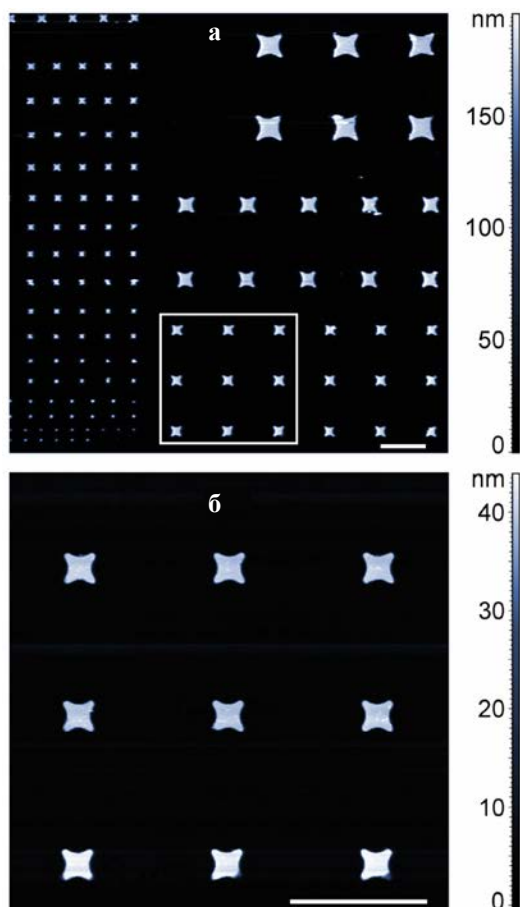


Рис. 4. АСМ-изображение участка образца с частицами со степенью вогнутости сторон 32% и разными латеральными размерами – (а). АСМ-изображение выделенной области с частицами с латеральным размером 2.4 мкм – (б). Размерный бар – 10 мкм.

с латеральными размерами 1.5 мкм наблюдаемое МСМ-изображение соответствовало уже четырёхдоменному состоянию (рис. 5б, г).

При МСМ-исследовании образца регистрируется сигнал, пропорциональный сдвигу фазы колебаний магнитного зонда на резонансной частоте, который пропорционален градиенту силы взаимодействия МСМ-зонда с магнитным полем образца в данной точке [23]. По полученному МСМ-изображению нельзя однозначно восстановить распределение намагниченности в исследуемом образце. Поэтому обычно решают обратную задачу, когда по рассчитанному распределению намагниченности моделируется виртуальное МСМ-изображение частицы, которое сравнивается с экспериментальным. Совпадение этих изображений позволяет сделать вывод о том, что модельное распределение намагниченности соответствует экспериментально наблюдаемому. В нашем случае модельное распределение намагниченности рассчитывалось с помощью ООММФ, а для построения виртуальных МСМ-изображений использовалась разработанная ранее программа “Виртуальный микроскоп” [24].

Экспериментальные МСМ-изображения (рис. 5), наблюдаемые на частицах со степенью вогнутости сто-

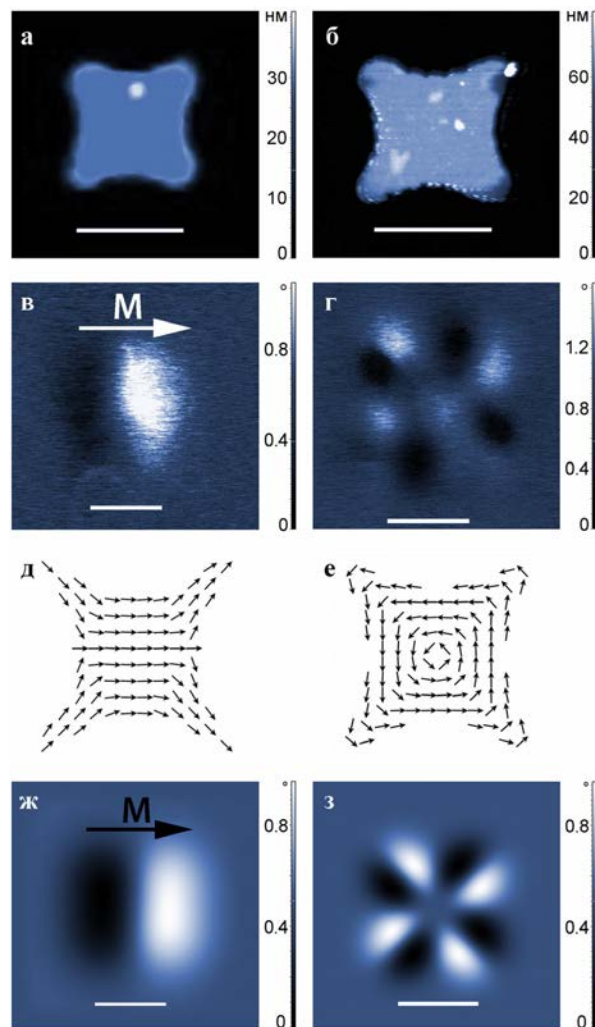


Рис. 5. АСМ-изображения частицы Ni со степенью вогнутости 32% и латеральным размером: 1.2 мкм – (а), 1.5 мкм – (б), и их МСМ-изображения (в, г соответственно). Смоделированное программой ООММФ распределение намагниченности в таких частицах (д, е соответственно) и построенные по данным распределениям виртуальные МСМ-изображения (ж, з соответственно). Большой стрелкой показано направление среднего магнитного момента (**М**) частицы. Размерный бар – 1 мкм.

рон 32%, хорошо совпадают с данными моделирования (рис. 3), согласно которым квазиоднородное состояние намагниченности перестаёт быть энергетически выгодным при латеральных размерах частицы 1.3 мкм и более. Экспериментальное МСМ-изображение частицы размером 1.2 мкм (рис. 5в) хорошо согласуется с виртуальным изображением такой частицы (рис. 5ж), находящейся в состоянии квазиоднородной намагниченности (рис. 5д). В обоих случаях у частицы наблюдаются два полюса, один из которых соответствует тёмной, а другой светлой областям на изображении. На экспериментальных и модельных МСМ-изображениях частиц размером 1.5 мкм наблюдается состояние, характерное для четырёхдоменного состояния намагниченности (рис. 5г, з). На частицах большего размера 2.4 и 3.3 мкм, полученные МСМ-изображения также соответствуют четырёхдоменному

состоянию намагниченности. МСМ-изображения, полученные на частицах с латеральными размерами 5.5 мкм имели более сложную структуру и, по всей видимости, соответствовали многодоменному состоянию, которое плохо поддаётся корректной расшифровке (пример такой структуры для частиц со степенью вогнутости 40% приводится далее).

У планарных частиц Ni со степенью вогнутости сторон 40% и размерами до 6.6 мкм включительно (2.2, 3.3, 4.8, 6.0, 6.6 мкм) на МСМ-изображениях наблюдалась квазиоднородная структура намагниченности (рис. 6а, в). За счёт того, что экспериментальные МСМ-изображения получались для частиц с размерами более 2 мкм, они имели хороший контраст и содержали больше деталей. Это позволило легко сопоставлять их с модельными МСМ-изображениями (рис. 6ж). У частиц размером 9.4 мкм

на МСМ-изображениях наблюдалась сложная магнитная структура, по всей видимости, состоящая из нескольких магнитных доменов (рис. 6б). Смоделировать распределение намагниченности, точно соответствующее такому МСМ-изображению, не представляется возможным из-за влияния множества факторов. Поэтому на рис. 6з представлено подобное многодоменное распределение намагниченности, которое отражает характерные особенности получаемого изображения. Ещё раз отметим, что экспериментально наблюдается сохранение квазиоднородной структуры намагниченности в частицах Ni при латеральных размерах 6.6 мкм. За счёт чётко выраженного внешнего магнитного момента даже такие большие частицы могут использоваться при создании устройств для записи и хранения информации. При этом достаточно большие размеры частиц, сохраняющих квазиоднородную намагниченность, могут позволить управлять её направлением с помощью наводимых одноосных механических напряжений.

Заключение

Методами компьютерного моделирования и магнитно-силовой микроскопии было показано, что в планарных частицах Ni квазиоднородная (близкая к однородной) структура намагниченности может сохраняться при достаточно больших размерах за счёт анизотропии формы. На примере квадратных частиц Ni высотой 30 нм с вогнутыми к центру стенками было показано, что, согласно компьютерному моделированию, квазиоднородная структура намагниченности может наблюдаться у частиц с латеральными размерами до 9.0 мкм в случае вогнутости в 40%. Согласно экспериментальным данным, квазиоднородная структура намагниченности наблюдается МСМ-методами у подобных частиц при латеральных размерах до 6.6 мкм. При этом наблюдаемое с помощью МСМ состояние квазиоднородной намагниченности является стабильным и не разрушается под действием магнитного поля зонда. Это позволяет использовать такие частицы для разработки устройств хранения информации или логических элементов стрейнтроники, в которых управление намагниченностью осуществляется за счёт создания одноосных механических напряжений.

Авторы благодарны Н. М. Лядову за помощь в изготовлении литографических масок для создания частиц.

Литература

1. Nikonov D.E., Young I.A.: Proc. IEEE **101**, 2498 (2013)
2. Kawahara T., Ito K., Takemura R., Ohno H.: Microelectron. Reliab. **52**, 613 (2012)
3. Vogler C., Abert C., Bruckner F., Suess D., Praetorius D.: Appl. Phys. Lett. **108**, 102406 (2016)
4. Hsu W.-H., Victora R.H.: JMMM **563**, 169973 (2022)
5. Liu Y., Zhan Q., Wang B., Li H., Wu Y., Chen B., Sun D., Mao S., Li R.-W.: IEEE Transactions on Magnetics **51**, 2501404 (2015)
6. Бизяев Д.А., Чукланов А.П., Нургазизов Н.И., Бухараев А.А.: Письма в ЖЭТФ **118**, № 7–8, 602–608 (2023)

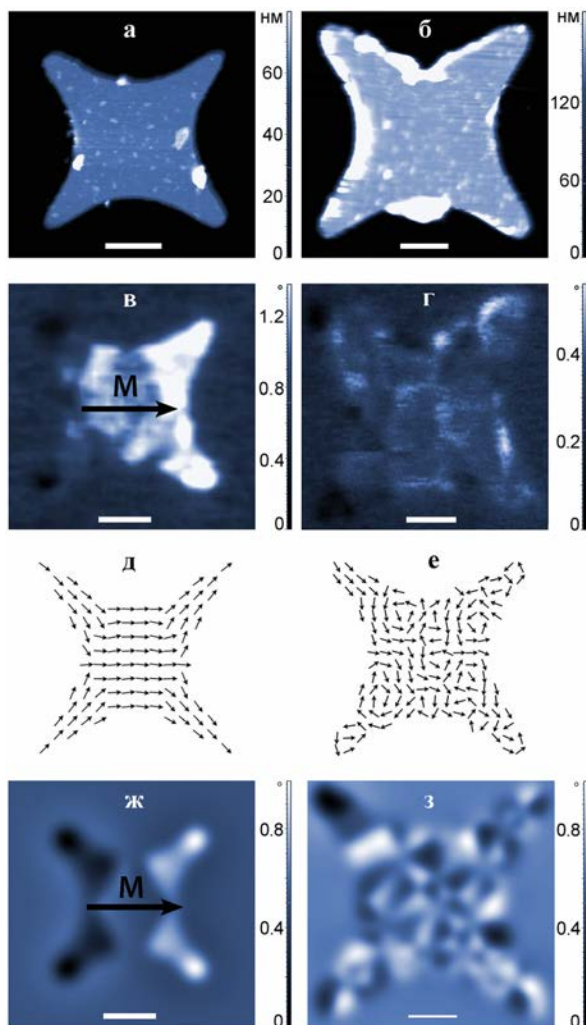


Рис. 6. АСМ-изображения Частицы Ni с вогнутостью 40% с латеральными размерами: 6.6 мкм – (а), 9.4 мкм – (б), и соответствующие МСМ-изображения (в, г). Смоделированное программой OOMMF распределение намагниченности в таких частицах (д, е соответственно) и построенные по данным распределениям виртуальные МСМ-изображения (ж, з соответственно). Большой стрелкой показано направление среднего магнитного момента (M) частицы. Размерный бар – 2 мкм.

7. Бухараев А.А., Звездин А.К., Пятаков А.П., Фетисов Ю.К.: УФН **188**, 1288–1330 (2018)
8. Bandyopadhyay S., Atulasimha J., Barman A.: Appl. Phys. Rev. **8**, 041323 (2021)
9. Фролов Г.И., Бачина О.И., Завьялова М.М., Равочкин С.И.: ЖТФ **53**, № 8, 101–105 (2008)
10. Frei E.H., Shtrikman S., Treves D.: Phys. Rev. **106**, 446 (1957)
11. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма: магнитные характеристики и практические применения (Под ред. Р. В. Писарева). Москва: Мир, 1987. 419 с.
12. Cowburn R.P.: J. Phys. D: Appl. Phys. **33**, R1 (2000)
13. Lambson B., Gu Zh., Monroe M., Dhuey S., Scholl A., Bokor J.: Appl. Phys. A **111**, 413 (2013)
14. Mehmood N., Song X., Tian G., Hou Z., Chen D., Fan Z., Qin M., Gao X., Liu J.-M.: J. Phys.: Condens. Matter. **31**, No. 29, 295802 (2019)
15. Peng R.-C., Wang J.J., Hu J.-M., Chen L.-Q., Nan C.-W.: Appl. Phys. Lett. **106**, 142901 (2015)
16. Salehi-Fashami M., D'Souza N.: JMMM **438**, 76 (2017)
17. Wang J.J., Hu J.M., Ma J., Zhang J.X., Chen L.Q., Nan C.W.: Sci. Rep. **4**, 7507 (2014)
18. Goiriena M., Xiao Z., Steinhardt R., Estrada V., Tamura N., Chop-dekar R.V., N'Diaye A.T., Sepúlveda A., Schlom D.G., Candler R.N., Bokor J.: Nanoscale **16**, 9021 (2024)
19. Leksin P.V., Garif'yanov N.N., Kamashev A.A., Fominov Ya.V., Schumann J., Hess C., Kataev V., Büchner B., Garifullin I.A.: Phys. Rev. B **91**, 214508 (2015)
20. Donahue M.J., Porter D.G.: OOMMF User's Guide, Version 1.0 Interagency Report NISTIR 6376, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg 1999.
21. Горев Р.В., Удалов О.Г.: ФТТ **61**, № 9, 1614–1622 (2019)
22. Ермолаева О.Л., Гусев Н.С., Скороходов Е.В., Рогов В.В., Удалов О.Г.: ФТТ **61**, № 9, 1623–1627 (2019)
23. Hartmann U.: Annu. Rev. Mater. Sci. **29**, 53 (1999)
24. Овчинников Д.В., Бухараев А.А.: ЖТФ **71**, № 8, 85–91 (2001)

Эффект магнитоэлектрической невязимости в субмиллиметровой ЭПР-спектроскопии примесных ионов $^{166}\text{Er}^{3+}$ в монокристалле $^7\text{LiYF}_4$

В. Ф. Тарасов, М. В. Еремин¹

Лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков

¹ Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет

В монокристалле LiYF_4 , моноизотопно легированном ионами ^{166}Er , обнаружен эффект магнитоэлектрической невязимости, выражающийся в изменении вероятности резонансного взаимодействия микроволнового излучения с электронными спинами ионов эрбия при инверсии направления магнитного поля. Эффект объясняется квантовой интерференцией амплитуд вероятностей магнитного дипольного и электрического дипольного резонансных переходов, возбуждаемых между основным и первым возбуждённым электронными дублетами ионов эрбия микроволновым излучением субмиллиметрового диапазона. Полученные зависимости эффекта интерференции от направления внешнего магнитного поля хорошо воспроизводятся квантово-механическим расчётом.

Effect of magnetoelectric nonreciprocity in the submillimeter EPR spectroscopy of LiYF_4 doped by $^{166}\text{Er}^{3+}$ ions

V. F. Tarasov, M. V. Eremin¹

Laboratory of radiospectroscopy of dielectrics

¹ Institute of Physics, Kazan Federal University

In a LiYF_4 single crystal monoisotopically doped with ^{166}Er ions, the effect of magneto-electric nonreciprocity was found, which is expressed as a change in the probability of resonant interaction of microwave radiation with the electron spins of erbium ions when the direction of the magnetic field is inverted. The effect is explained by quantum interference of the probability amplitudes of magnetic dipole and electric dipole resonance transitions excited by submillimeter microwave radiation between the ground and the first excited electron doublets of erbium ions. The observed dependences of the interference effect on the direction of the external magnetic field are well reproduced by quantum mechanical calculation.

Введение

Природа взаимосвязи магнитных и электрических свойств твёрдых тел и влияние этой взаимосвязи на свойства материалов являются предметом активных научных исследований. Это вызвано большим интересом к фундаментальным проблемам взаимодействия магнитных и электрических полей в веществе и с возможными практическими применениями таких материалов для создания твердотельных устройств с управляемыми магнитными и электрическими свойствами.

Исследования магнитоэлектрической связи в редкоземельных парамагнетиках начались сравнительно недавно. Большей частью они были нацелены на выяснение особенностей статической магнитоэлектрической связи, когда постоянное магнитное поле $\mathbf{H}$ создаёт электрическую поляризацию $\mathbf{P}$, а электрическое поле $\mathbf{E}$ создаёт намагниченность $\mathbf{M}$ [1]. Большой интерес вызывает также динамический магнитоэлектрический эффект, при котором осциллирующее магнитное поле электромагнит-

ной волны $\mathbf{H}_1$ создаёт осциллирующую поляризацию $\mathbf{P}_1$, а осциллирующее электрическое поле $\mathbf{E}_1$ создаёт осциллирующую намагниченность $\mathbf{M}_1$. Проявляется этот эффект в виде магнитоэлектрической невязимости, когда характеристики взаимодействия электромагнитной волны с веществом изменяются при инверсии направления магнитного поля [2–7].

Интересные проявления оптической невязимости были обнаружены при исследовании влияния внешнего магнитного поля на сигналы фотонного эха примесных ионов $^{166}\text{Er}^{3+}$ в монокристаллах LiYF_4 и LiLuF_4 [8, 9]. Сигналы эха наблюдались на резонансном переходе между электронными уровнями основного мультиплета Er^{3+} $^4\text{I}_{15/2}$ и возбуждённого мультиплета $^4\text{F}_{9/2}$. При этом были обнаружены эффект памяти – гистерезис в зависимости интенсивности фотонного эха от величины и направления внешнего магнитного поля, и эффект оптической невязимости, при котором интенсивность сигналов эха зависела от направления магнитного поля. Оптическая невязимость предположительно связывалась с квантовой

интерференцией амплитуд вероятностей магнитных и электрических дипольных переходов. В данной работе мы экспериментально и теоретически показали, что для примесных ионов $^{166}\text{Er}^{3+}$ в LiYF_4 эффект динамической магнитоэлектрической невязимности существует и для резонансных переходов между двумя нижними электронными дублетами основного мультиплета $^4I_{15/2}$.

Образец и методика измерения

Образец моноизотопного состава $^7\text{LiYF}_4:^{166}\text{Er}^{3+}$ с концентрацией эрбия 0.0015 ат.% был выращен методом Бриджмена-Стокбаргера с градиентным распределением температуры вдоль оси a . Форма образца была близка к параллелепипеду с размерами $6 \times 8 \times 10 \text{ мм}^3$. Кристаллическое поле LiYF_4 расщепляет основной мультиплет $^4I_{15/2}$ иона Er^{3+} с электронной конфигурацией $4f^{11}$ на восемь крамеровских дублетов. Энергия первого возбуждённого дублета $\Delta = 17 \text{ см}^{-1}$ (510 ГГц) была ранее измерена методами оптической спектроскопии [10] и перестраиваемой по частоте ЭПР-спектроскопии [11].

Резонансные переходы между электронными уровнями основного и первого возбуждённого дублетов основного мультиплета, схематически (без сохранения масштаба) показаны на рис. 1. Измерения проводились с использованием высокочастотного перестраиваемого по частоте спектрометра [12] при температуре образца 4.2 К в малых магнитных полях с прохождением через нулевое значение поля. Микроволновое излучение подводилось к исследуемому образцу квазиоптическим трактом и фокусировалось на образце с углом схождения лучей $\pm 4^\circ$.

Экспериментальные результаты

При частоте микроволнового излучения $f = 510.4 \text{ ГГц}$ для обоих резонансных переходов, показанных стрелками

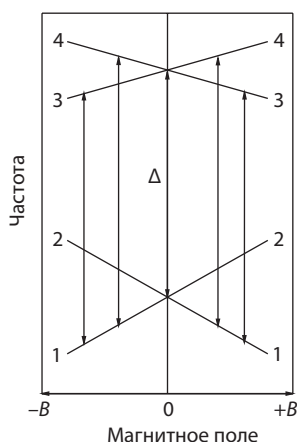


Рис. 1. Схема электронных уровней основного и первого возбуждённого дублетов ионов Er^{3+} в LiYF_4 для $\mathbf{H} \perp \mathbf{c}$. Стрелками показаны наблюдавшиеся резонансные переходы.

на рис. 1, была измерена зависимость амплитуды резонансных линий от ориентации постоянного магнитного поля $\mathbf{H}$ относительно кристаллографических осей. При этом ось вращения совпадала с направлением волнового вектора $\mathbf{k}$, а кристаллографическая ось c была отклонена от оси вращения и направления $\mathbf{k}$ на угол $\theta = 10^\circ$ в направлении оси a . Это связано тем, что в статье [8] магнитоэлектрические эффекты в формировании фотонного эха на оптических переходах примесных ионов $^{166}\text{Er}^{3+}$ в LiYF_4 проявлялись только при отклонении кристаллографической оси c от направления $\mathbf{k}$. Поляризация магнитной компоненты микроволнового излучения $\mathbf{H}_1$ была перпендикулярна плоскости векторов $(\mathbf{k}, \mathbf{H})$. Для обоих резонансных переходов (1–3 и 1–4 на рис. 1) наблюдалась представленная на рис. 2 сильная зависимость амплитуды резонансных линий (от пика до пика производной) от угла φ , который отсчитывается от направления $\mathbf{H}_1$. Кружки представляют экспериментальные результаты. Результаты расчёта показаны линиями. Видно, что имеется качественное согласие экспериментальных и расчётных результатов. Отсутствие количественного согласия объясняется специфическими особенностями конструкции спектрометра и методики измерений. В используемом нами спектрометре для подвода микроволнового излучения к образцу и далее на детектор используется квазиоптический тракт, в котором поперечный размер микроволнового луча, размеры оптических элементов тракта и размеры исследуемого образца сравнимы с длиной волны микроволнового излучения. Поэтому в тракте происходят искажения фронта луча за счёт дифракции и множественной интерференции лучей, отражённых от элементов тракта и от поверхностей образца. При вращении образца интерференционная картина изменяется, что приводит к изменению интенсивности электромагнитной волны, проходящей через образец и возбуждающей резонансные переходы. В таких условиях при сравнении амплитуд резонансных линий единственным достоверным физическим эффектом является разность амплитуд сигналов, записанных на одном спектре при противоположных направлениях магнитного поля. На рис. 2а и б видно, что амплитуды линий ЭПР при противоположных значениях магнитного поля, немного отличаются. Визуально эта разница лучше видна на рис. 2в и г, где представлены отношения разницы амплитуд линий, записанных для противоположных направлений магнитного поля, к средней амплитуде линий.

На рис. 3 приведены примеры экспериментальных спектров, записанных для переходов 1–3 при двух взаимно противоположных направлениях магнитного поля. Видно, что амплитуды линий зависят от направления магнитного поля, причём, соотношение амплитуд изменяется при повороте образца на 180° . Зависимость амплитуды резонансных линий от направления магнитного поля мы объясняем эффектом магнитоэлектрической невязимности. Известно, что для примесных ионов Er^{3+} в LiYF_4 между двумя электронными уровнями, принад-

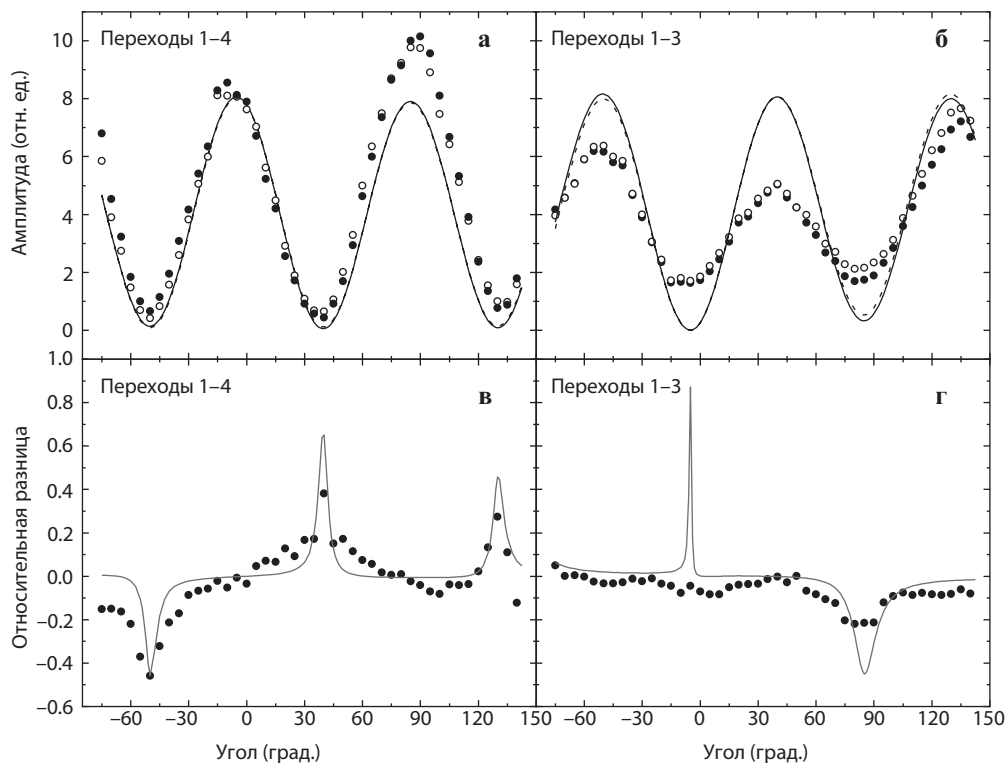


Рис. 2. Ориентационные зависимости амплитуд резонансных линий на спектрах ЭПР ионов $^{166}\text{Er}^{3+}$ в LiYF_4 . Значки – эксперимент, линии – расчёт. а и б – амплитуда резонансных линий для переходов 1–4 и 1–3, соответственно. Сплошные кружки и линии соответствуют положительному магнитному полю +4 мТл и +14 мТл для переходов 1–4 и 1–3, соответственно, пустые кружки и штриховые линии соответствуют магнитному полю обратного направления; в и г – относительная разница амплитуд линий в положительном и отрицательном поле.

лежащими различным мультиплетам, разрешены как магнитные дипольные, так и электрические дипольные резонансные переходы [13]. Оптическая невзаимность возникает вследствие квантовой интерференции амплитуд вероятностей электрических и магнитных дипольных резонансных переходов [2–7]. Квантово-механические расчёты подтверждают это предположение.

Схема квантово-механического расчёта и обсуждение результатов

Как уже отмечалось, кристаллическое поле расщепляет основной мультиплет $\text{Er}^{3+}(4f^{11})^4I_{15/2}$ на восемь кramerсов дублетов. Для расчёта уровней энергии и волновых функций этих дублетов использовался оператор кристаллического поля

$$\mathcal{H}_{\text{cf}} = B_2^0 O_2^0 + B_4^0 O_4^0 + B_6^0 O_6^0 + B_4^4 O_4^4 + B_4^{-4} O_4^{-4} + B_6^4 O_6^4 + B_6^{-4} O_6^{-4}. \quad (1)$$

Значения параметров B_k^q были приняты такими же, как в работе [14], O_k^q – стандартные эффективные операторы Стивенса. Как и в работах [10, 13, 14], предполагалось, что электрические дипольные переходы обусловлены перемешиванием электронных конфигураций $4f^{11}$ и $4f^{10}5d^1$ иона Er^{3+} нечётным кристаллическим полем. Операторы компонент индуцированного электрического дипольного момента учитывались методом эффективных операторов. Так, в частности, оператор электрического дипольного момента вдоль оси x имеет вид

$$d_x = b_2^1 O_2^1 + b_4^1 O_4^1 + b_6^1 O_6^1 + b_4^3 O_4^3 + b_6^3 O_6^3 + b_6^5 O_6^5 + b_2^{-1} O_2^{-1} + b_4^{-1} O_4^{-1} + b_6^{-1} O_6^{-1} + b_4^{-3} O_4^{-3} + b_6^{-3} O_6^{-3} + b_6^{-5} O_6^{-5}. \quad (2)$$

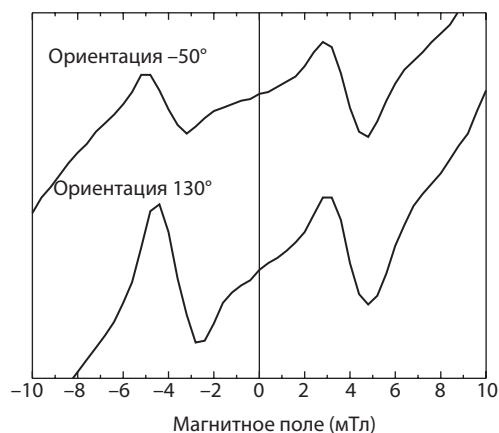


Рис. 3. Спектры ЭПР переходов 1–4 иона $^{166}\text{Er}^{3+}$, в монокристалле $^{166}\text{LiYF}_4$, записанные при двух ориентациях магнитного поля. Угол φ отсчитывается от направления $\mathbf{H}_1$, как и на рис. 2. Частота спектрометра $f = 510.4$ ГГц.

Значения параметров b_k^q брались из работы [13]. Относительные интенсивности поглощения суммарных электрических и магнитных дипольных переходов рассчитывались по формуле

$$\left| \langle \psi_i | d_\alpha \left(\frac{n^2 + 2}{3n} \right) E_{1\alpha} + \mu_B \Lambda J_\beta H_{1\beta} | \psi_i \rangle \right|^2, \quad (3)$$

где n – показатель преломления [15], $\Lambda = 5/6$ – фактор Ланде. Суммирование по индексам α и β подразумевается. Формула (3) отличается от обычно принятой для редкоземельных ионов (см. например работу [13]) тем, что в ней учитываются эффекты интерференции магнитных и электрических дипольных переходов. Они обусловлены слагаемыми, пропорциональными произведениям $E_\alpha H_\beta$.

Расчёт волновых функций, фигурирующих в (3), проводился путём численной диагонализации суммы оператора (1) со стандартным оператором энергии взаимодействия с резонансным магнитным полем. Процедура расчёта вероятностей переходов по формуле (3) осуществлялась для каждой ориентации образца. При вращении образца компоненты внешнего магнитного поля в системе осей образца меняются. Как следствие этого, меняются и коэффициенты в волновых функциях, фигурирующих в формуле (3). Результаты расчёта показаны линиями на рис. 2. Видно, что поведённый расчёт хорошо воспроизводит трехпиковую особенность на рис. 2в и правый (несколько размытый) пик на рис. 2г. Причину отсутствия центрального пика на панели 3г мы связываем с особенностями микроволнового тракта спектрометра. Дело в том, что микроволновое излучение подаётся на образец в виде сфокусированного сходящегося луча, в котором имеется некоторое распределение направлений волнового вектора $\mathbf{k}$ по углу, которое, вероятно, и приводит к “размазыванию” узкого пика, который получается в расчёте для плоской волны.

Следует отметить, что кристаллическая решётка LiYF_4 характеризуется пространственной группой симметрии $I4_1/a$ (88). Исходная пространственная решётка была центросимметричной. В элементарной ячейке имеются четыре возможных позиции ионов Er^{3+} . Локальная симметрия всех позиций S_4 . Две позиции (1 и 3) переходят в другую пару (2 и 4) трансляцией. Между позициями 1–3 и 2–4 имеется центр инверсии. Волновые функции ионов эрбия во всех четырёх позициях одинаковы, так как они определяются диагонализацией чётного оператора (оператор (1) плюс оператор энергии взаимодействия с постоянным магнитным полем). В этих условиях магнитоэлектрический эффект и связанная с ним магнитоэлектрическая невязанность должны отсутствовать. Существование эффекта говорит о том, что инверсионная симметрия четырёх примесных ионов Er^{3+} в элементарной ячейке нарушена. Причина может быть в том, что позиции ионов Y^{3+} в элементарной ячейке замещаются ионами Er^{3+} не равномерно.

Выводы

Методом высокочастотной ЭПР-спектроскопии проведены исследования резонансных переходов между электронными уровнями основного и первого возбуждённого дублетов в монокристалле $^7\text{LiYF}_4$, легированном ионами $^{166}\text{Er}^{3+}$. Экспериментальные результаты и квантово-механические расчёты показали наличие магнитоэлектрической невязанности, обусловленной квантовой интерференцией амплитуд вероятностей магнитных и электрических дипольных переходов. При изменении направления магнитного поля происходит смена характера интерференции между конструктивной и деструктивной, что приводит к изменению величины резонансного поглощения. В качестве одного из возможных обобщений отметим, что обнаруженная нами интерференция магнитных и электрических дипольных переходов в ЭПР-спектроскопии вполне может проявиться и в оптическом диапазоне частот, в частности, при исследованиях зависимостей люминесценции от направления внешнего магнитного поля.

Благодарности

Авторы выражают признательность С. Л. Кораблевой и О. А. Морозову за предоставление образца для исследования и В. А. Шустову за рентгенографические исследования образца. Работа В.Ф.Т. проводилась в рамках выполнения гос. задания Федерального исследовательского центра “Казанский научный центр Российской академии наук”. Работа М.В.Е. выполнена при частичной поддержке Гос. программы научных исследований в К(П)ФУ номер FZSM-2024-0010.

Литература

1. Пятаков А.П., Звездин А.К.: УФН **182**, 593–620 (2012)
2. Shimada Y., Matsubara M., Kaneko Y., He J.P., Tokur Y.: Applied Physics Letters **89**, 101112 (2006)
3. Toyoda S., Abe N., Kimura S., Matsuda Y.H., Nomura T., Ikeda A., Takeyama S., Arima T.: Phys. Rev. Lett. **115**, 267207 (2015)
4. Нурмухаметов А.Р., Еремин М.В.: ЖЭТФ **162**, 390–397 (2022)
5. Васин К.В., Еремин М.В., Нурмухаметов А.Р.: Письма в ЖЭТФ **115**, 420–423 (2022)
6. Boldyrev K.N., Molchanova A.D., Nurmukhametov A.R., Eremin M.V., Pisarev R.V., Popova M.N.: Magnetochemistry **9**, 95 (2023)
7. Vasin K.V., Strinić A., Schilberth F., Reschke S., Prodan L., Tsurkan V., Nurmukhametov A.R., Eremin M.V., Késmárki I., Deisenhofer J.: Phys. Rev. B **110**, 054401 (2004)
8. Шереда А.М., Кораблева С.Л., Морозов О.А., Лисин В.Н., Соловаров Н.К., Тарасов В.Ф.: Письма в ЖЭТФ **117**, 264–272 (2023)
9. Шереда А.М., Кораблева С.Л., Морозов О.А., Лисин В.Н., Соловаров Н.К., Тарасов В.Ф.: Проявление памяти и бабочка в фотонном эхо на ионах эрбия в LuLiF_4 и YLiF_4 . Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского. Ежегодник **23**, 69 (2024)
10. Popova M.N., Chukalina E.P., Malkin B.Z., Saikin S.K.: Phys. Rev. B **61**, 7421–7427 (2000)
11. Шакуров Г.С., Малкин Б.З., Ванюнин М.В., Кораблева С.Л.: ФТТ **50**, 1559–1564 (2008)
12. Tarasov V.F., Shakurov G.S.: Appl. Magn. Reson. **2**, 571–576 (1991)
13. Gerasimov K.I., Minnegaliev M.M., Malkin B.Z., Baibekov E.I., Moiseev S.A.: Phys. Rev. B **94**, 054429 (2016)
14. Shakurov G.S., Korableva S.L., Malkin B.Z.: Magn. Reson. Solids **21**, 19204 (2019)
15. Castleberry D.E., Linz A.: Appl. Opt. **14**, 2056 (1975)

Центры ионов Ho^{3+} в кристалле $\text{LaF}_3\text{:Ho}^{3+}$

Г. С. Шакуров, В. В. Семашко, О. А. Морозов

Лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков, лаборатория функциональных материалов и технологий фотоники

В кристаллах LaF_3 зарегистрированы и изучены спектры ЭПР иона Ho^{3+} , замещающего ион La^{3+} в позиции симметрии C_2 , в субтерагерцовом диапазоне частот. Определены параметры расщепления в нулевом поле, постоянная сверхтонкой структуры и значение g-фактора.

High-frequency EPR of Ho^{3+} ion in the LaF_3

G. S. Shakurov, V. V. Semashko, O. A. Morozov

Laboratory of radiospectroscopy of dielectrics, Laboratory of functional materials and photonics technologies

In LaF_3 crystals the EPR spectra of Ho^{3+} ion replacing La^{3+} ion in a C_2 symmetry position were recorded and studied in the subterahertz frequency range. The parameters of splitting in the zero field, hyperfine structure constant and the value of g-factor are determined.

Введение

Нанокристаллы, активированные ионами Ho^{3+} , представляют интерес для создания на их основе визуализаторов суб- и терагерцового излучения благодаря расщеплению основного состояния 5I_8 на штарковские подуровни с энергетическими щелями, попадающими в эти диапазоны, а также интенсивной температурно-зависимой люминесценции, наблюдаемой даже при высоких концентрациях примесных ионов [1, 2]. Применение внешнего магнитного поля и переход к криогенным температурам позволяют плавно настраивать частоту резонансного межштарковского перехода и обеспечивают высокий коэффициент поглощения. Особый интерес представляют трифторидные кристаллы со структурой фторида иттрия (YF_3) и тисонита (LaF_3), которые позволяют активировать их ионами Ho^{3+} .

Кристаллическая решётка кристалла LaF_3 (пространственная группа $R\bar{3}c1$) представляет собой два различных типа слоёв атомов фтора, расположенных перпендикулярно оси симметрии, разделённых слоем, содержащим атомы фтора и лантана. Локальная симметрия позиции лантана C_2 . Поскольку трифторид лантана представляет интерес для различных применений, он стал предметом многочисленных исследований. Недавно были изучены спектры ЭПР различных дефектов, образующихся при облучении и при формировании наночастиц [3, 4]. Однако спектры ЭПР большинства ионов редкоземельных элементов в

кристалле LaF_3 изучались более 60 лет назад [5, 6]. Было установлено, что, несмотря на изовалентный характер замещения, внедрение примеси в решётку приводит к орторомбическому искажению позиции. Предполагалось, что искажение вызвано выходом атомов лантана из слоя [4]. При сохранении симметрии решётки положения лантанидов стали магнитно неэквивалентными, и число сопряжённых спектров ЭПР увеличилось с трёх до шести. Следует отметить, что для иона Gd^{3+} симметрия позиции не изменилась, и наблюдались три магнитно неэквивалентных спектра ЭПР. Ранее изучались только крамерсовы редкоземельные ионы. Из-за низкой симметрии позиции для некрамерсовых ионов, электронные состояния оказывались синглетами, и наблюдение спектров ЭПР на стандартных спектрометрах было невозможно. С развитием субтерагерцовой техники стало возможным изучать в трифторидах и некрамерсовые ионы. В частности, мы недавно зарегистрировали спектры ЭПР в кристалле трифторида иттрия с примесью тулия [7].

Результаты и обсуждение

В данной работе исследовались кристаллы $\text{LaF}_3\text{:Ho}^{3+}$. Концентрация гольмия составляла 1%, 0.3% и 0.1%. Кристаллы выращивали из расплава методом Бриджмена в многоканальном графитовом тигле. Использовали шихту LaF_3 и HoF_3 чистотой 99.99%. Камеру печи для выращи-

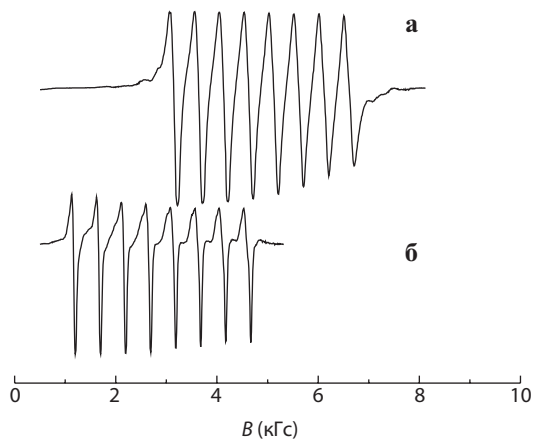


Рис. 1. Вид спектров ЭПР в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Ho}^{3+}$. Ориентация $\mathbf{B}||\mathbf{c}$. **а** Частота 170 ГГц, концентрация гольмия 1%; **б** частота 144 ГГц, концентрация гольмия 0.3%.

вания предварительно вакуумировали до 10^{-4} – 10^{-5} мбар, а шихту сушили в вакууме при 150 °С в течение 6 ч. Выращивание проводилось в атмосфере аргона особой чистоты (99.998%) с дополнительным фторированием путём сжигания тефлона. Кристаллы вытягивали со скоростью 1 мм/час.

Измерения проводились на перестраиваемом (37–850 ГГц) спектрометре ЭПР при температуре жидкого гелия в магнитных полях до 0.9 Т [8]. Спектры ЭПР иона Ho^{3+} регистрировались в диапазоне частот 130–210 ГГц. На рис. 1 показаны спектры для ориентации $\mathbf{B}||\mathbf{c}$, полученные на частотах 170 ГГц (Ho, 1%) и 144 ГГц (Ho, 0.3%). Идентификация иона Ho^{3+} ($I = 7/2$, 100%) основана на характерной сверхтонкой структуре (СТС), состоящей из 8 линий. Электронная конфигурация иона $\text{Ho}^{3+} - 4f^{10}$, основное состояние свободного иона – 5I_8 ($L = 6$, $S = 2$, $J = 8$). Согласно оптическим данным, основной и первый возбуждённый уровни гольмия в LaF_3 представляют собой синглеты с интервалом 4.5 см^{-1} между ними, а следующий возбуждённый синглет отделён от основного на 42 см^{-1} [9]. Наблюдаемые нами спектры обусловлены резонансными переходами между основным и первым

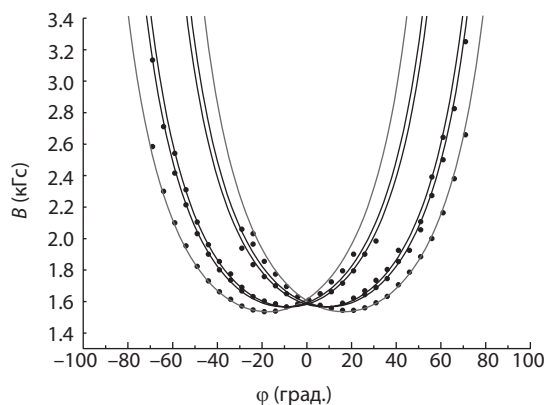


Рис. 2. Угловая зависимость спектров ЭПР кристалла $\text{LaF}_3:\text{Ho}^{3+}$ при вращении в плоскости (1120). Частота 150 ГГц. Точки – эксперимент, линии – аппроксимация функцией обратного косинуса.

возбуждённым синглетами. В таких случаях спектры ЭПР регистрируются в параллельных магнитных полях ($\mathbf{B}_1||\mathbf{B}_0$) [10]. Сигналы от шести магнитно неэквивалентных положений гольмия наблюдались в произвольной ориентации. На рис. 2 показана угловая зависимость спектров ЭПР, полученных вращением кристалла в плоскости (1120). Поскольку линии СТС перекрывались, что не позволяло точно определить положения всех линий СТС, график показывает поведение только низкополевой компоненты СТС. В этом случае из-за небольшого отклонения плоскости вращения от кристаллографической плоскости линии, которые должны были слиться, оказались слегка раздвоенными. С учётом удалённости второго возбуждённого синглета систему приближённо можно считать двухуровневой. Угловая зависимость описывается функцией обратного косинуса. Угол отклонения направления с максимальным g-фактором от оси симметрии составил $\sim 16^\circ$. Это направление далее будет называться z-осью центра. Для направления $\mathbf{B}||\mathbf{c}$, т.е. когда линии от всех шести центров сливаются, построена частотно-полевая зависимость (рис. 3) спектров ЭПР. Значения параметров спектра были получены с использованием эффективного спинового гамильтониана ($S = 1/2$) в форме

$$\mathcal{H} = \Delta S_x + A I_z S_z + g_z \mu_B B_z S_z, \quad (1)$$

где первый член описывает расщепление электронно-ядерных подуровней в нулевом магнитном поле, второй – сверхтонкое взаимодействие, а третий член – энергия Зеемана. Подгоняя экспериментальные точки частотно-полевой зависимости спектров ЭПР (рис. 3) к аналитическому выражению

$$\nu = [(g\beta B \cos(\alpha) \pm m A)^2 + \Delta^2]^{1/2} / h, \quad (2)$$

где ν – частота, β – магнетон Бора, m – проекция ядерного спина, Δ – расщепление в нулевом поле (РНП), α – угол отклонения z-оси от кристаллографической оси, A – постоянная СТС, мы получили следующие значения: $g = 17.2$, $\Delta = 127.35 \text{ ГГц}$, $A = 11.9 \text{ ГГц}$. Используя полученные параметры, были построены расчётные кривые.

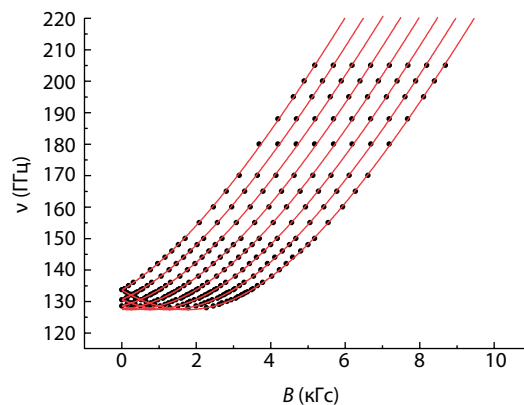


Рис. 3. Частотно-полевая зависимость спектров ЭПР в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Ho}^{3+}$. Ориентация $\mathbf{B}||\mathbf{c}$. Точки – эксперимент, линии – расчёт.

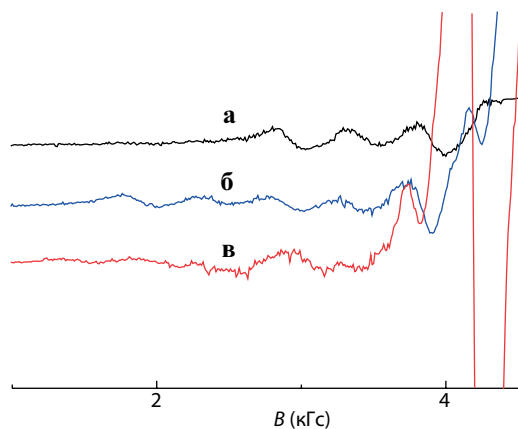


Рис. 4. Сателлитные линии в спектре ЭПР в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Ho}^{3+}$. Ориентация $\mathbf{B}||\mathbf{c}$. **а** 205 ГГц, **б** 195 ГГц, **в** 188 ГГц.

Для образца с концентрацией гольмия 1% помимо линий изолированного центра наблюдались сателлитные линии (рис. 1). Эти линии, вероятно, принадлежат парным центрам $\text{Ho}^{3+}-\text{Ho}^{3+}$. Из-за малого отношения сигнал/шум и перекрытия спектра димера со спектром изолированного иона их изучение было невозможно. Однако следует отметить, что на частотах около 195 ГГц сателлиты регистрируются в более слабых магнитных полях, чем спектр изолированного иона (рис. 4). В нашем случае для димера ожидается четыре нижних электронных состояния, между которыми по чётности разрешены два резонансных перехода. Можно предположить, что одно из расщеплений между уровнями димера практически

совпадает со штарковским расщеплением изолированного иона, поэтому линии димера накладываются на линии изолированного иона. В то время как второй резонансный переход димера происходит между состояниями, разделёнными интервалом ~ 180 ГГц.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Госзадания ФИЦ КазНЦ РАН.

Литература

1. Semashko V.V., Shakurov G.S., Nizamutdinov A.S., Pudovkin M.S., Kharintsev S.S., Morozov O.A., Korableva S.L., Dokudovskaja A.K., Gazizov A.R.: Book of abstracts of the 30th International Conference on Advanced Laser Technologies, September 18–21, 2023. Samara, Russia, p. 222, N-I-3.
2. Колесникова В.И., Шакуров Г.С., Морозов О.А., Кorableва С.Л., Семашко В.В.: Программа и материалы 20-й Международной научной конференции-школы, 24–21 сентября 2024, г. Саранск (ред. кол.: Н. С. Аверкиев и др.), с. 200.
3. Thoma E.D., Shields H., Zhang Y., McCollum B.C. Williams R.T.: J. Lumin. **71**, 93 (1997)
4. Rakhmatullin R.M., Pudovkin M.S., Semashko V.V.: Magnetic Resonance in Solids. Electronic Journal **21**, 19411 (2019)
5. Baker J.M., Rubins R.S.: Proc. Phys. Soc. **78**, 1353 (1961)
6. Jones D.A., Baker J.M., Pope D.F.D.: Proc. Phys. Soc. **74**, 249 (1959)
7. Savinkov A.V., Shakurov G.S., Mumdzhi I.E., Malkin B.Z., Nikitin S.I., Korableva S.L., Tagirov M.S.: Magnetic Resonance in Solids. Electronic Journal **19**, 17202 (2017)
8. Tarasov V.F., Shakurov G.S.: Appl. Magn. Reson. **2**, 571 (1991)
9. Caspers H.H., Rast H.E., Fry J.L.: J. Chem. Phys. **53**, 3208 (1970)
10. Malkin B.Z., Tarasov V.F., Shakurov G.S.: JETP Lett. **62**, 811 (1995)

Влияние термического и термобарического отжига на магнитные свойства слоистых перовскитов $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4\pm\delta}$

Д. В. Мамедов, Ю. А. Деева¹, В. В. Бажал¹, Т. И. Чупахина¹, М. А. Черосов², Р. Г. Батулин², Т. П. Гаврилова

Лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков

¹ Институт химии твёрдого тела Уральского отделения РАН, Екатеринбург

² Институт физики, Казанский федеральный университет, Казань

Благодаря квазидвумерной структуре перовскиты со структурой фазы Раддлсдена-Поппера стали важным объектом исследований для применения в оптоэлектронных устройствах, таких как солнечные элементы, светодиоды и фотодетекторы. В данной работе изучены магнитные свойства перовскитных оксидных соединений $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4\pm\delta}$ со структурой фазы Раддлсдена-Поппера в исходном состоянии, после отжига при температуре 1473 К и после термобарической обработки при температуре 1473 К и давлении 2.5 ГПа. В частности, исследованы возможные изменения магнитных свойств $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4\pm\delta}$, включая валентные состояния магнитных ионов, эффективный магнитный момент и возможные структурные изменения. Отжиг, вероятно, изменяет валентное состояние магнитных ионов ($\text{Ni}^{2+} \rightarrow \text{Ni}^{3+}$), что приводит к изменению эффективного магнитного момента, тогда как структурные искажения минимальны. Вероятный тип магнитного упорядочения – скошенное антиферромагнитное или ферримагнитное состояние. Термобарическая обработка $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4\pm\delta}$ не изменяет валентные состояния магнитных ионов по сравнению с отожжённым состоянием, но вызывает значительные искажения кристаллической структуры. Эти искажения изменяют межатомные расстояния и углы, влияя на величину магнитных взаимодействий. Полученные результаты углубляют понимание влияния пост-обработки на магнитные свойства и дают возможность оптимизировать магнитные и электронные свойства слоистых перовскитных оксидов для различных технологических применений.

Thermal and thermobaric effects on magnetic properties of $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4\pm\delta}$ layered perovskites

D. V. Mamedov, Yu. A. Deeva¹, V. V. Bazhal¹, T. I. Chupakhina¹, M. A. Cherosov², R. G. Batulin², T. P. Gavrilova

Laboratory of radiospectroscopy of dielectrics

¹ Institute of Solid State Chemistry, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg

² Institute of Physics, Kazan Federal University

The Ruddlesden-Popper phase perovskites, with their quasi-2D structure, have become a significant subject of study for their potential use in optoelectronic devices, including solar cells, light-emitting diodes, and photodetectors. In this work, we study the magnetic properties of perovskite oxide compounds $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4\pm\delta}$ with the Ruddlesden-Popper phase structure in their initial state, after annealing at 1473 K, and after thermobaric treatment at 1473 K and 2.5 GPa. Specifically, we investigate possible changes in the magnetic properties of $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4\pm\delta}$, including the valence states of magnetic ions, the effective magnetic moment, and potential structural changes. Annealing likely alters the valence state of magnetic ions ($\text{Ni}^{2+} \rightarrow \text{Ni}^{3+}$), leading to a change in the effective magnetic moment, while structural distortions are minimal. The probable type of magnetic ordering is a canted antiferromagnetic or ferrimagnetic state. Thermobaric treatment of $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4\pm\delta}$ does not change the valence states of magnetic ions compared to the annealed state but induces significant distortions in the crystal structure. These distortions alter interatomic distances and angles, affecting the strength of magnetic interactions. The obtained results deepen the understanding of the influence of post-synthesis processing on magnetic properties and provide an opportunity to optimize the magnetic and electronic properties of layered perovskite oxides for various technological applications.

Введение

Слоистые перовскитные оксиды, известные как материалы со структурой фазы Раддлсдена-Поппера (RP) с общей формулой $\text{A}_{n+1}\text{B}_n\text{O}_{3n+1}$, широко изучены в контексте их потенциального применения в энергетических и электронных устройствах, включая солнечные элементы, твердооксидные топливные элементы, оптоэлектронику и электрокатализ

[1–8]. К этой группе относится структура A_2BO_4 ($n = 1$), которая недавно привлекла внимание благодаря разнообразию наблюдаемых в ней свойств [3, 9, 10]. В таких материалах катионы редкоземельных или щёлочноземельных металлов занимают А-позицию ($\text{A} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Sr}$ и т. д.), в то время как катионы переходных металлов или другие двухвалентные катионы занимают В-позицию ($\text{B} = \text{Cu}, \text{Co}, \text{Fe}$ и т. д.) [11]. В недавних исследованиях изучались

подходы к легированию для улучшения свойств этих слоистых перовскитов, причём упорядочение катионов как на А-позиции, так и на В-позиции является важной областью изучения [4, 12]. Атомное упорядочение в перовскитах ABO_3 открывает возможности для управления магнитными, оптическими, электронными и другими свойствами [13, 14]. Радиусы ионов, разница их зарядов и электростатические взаимодействия между катионами играют первостепенную роль в формировании упорядоченного состояния. В то же время сходные ионные размеры, одинаковые заряды, а также увеличение конфигурационной энтропии, связанное с неупорядоченным расположением катионов, могут способствовать образованию однофазных твёрдых растворов [15]. Большинство исследований посвящено упорядочению катионов на А-позиции в фазе $RP A_2BO_4$ [4, 12], тогда как влияние упорядочения на В-позиции изучено в меньшей степени [16]. Высокий практический интерес и широкий спектр наблюдаемых свойств делают эти материалы перспективным объектом для интенсивных исследований.

В данной работе исследуются магнитные свойства соединения со структурой фазы Раддлсдена–Поппера (типа A_2BO_4) состава $La_{1.8}Ca_{0.2}Ni_{0.8}Cu_{0.2}O_{4\pm\delta}$. Из предыдущих исследований известно, что керамический образец $La_{1.8}Ca_{0.2}Ni_{0.8}Cu_{0.2}O_{4\pm\delta}$ обладает гигантской диэлектрической проницаемостью при низких температурах и является полупроводником при комнатной температуре. После отжига он остаётся диэлектриком вплоть до комнатной температуры. Это означает, что фазовый переход “диэлектрик–полупроводник” смещается в область более высоких температур, что потенциально интересно для практических применений. Например, это открывает возможность создания конденсаторов, стабильно работающих в широком температурном диапазоне – от отрицательных до комнатных значений. Такие компоненты необходимы для создания устройств, работающих в условиях Крайнего Севера и на космических станциях, так как должны сохранять работоспособность во всём диапазоне эксплуатационных температур. В данной работе исследованы магнитные свойства соединения $La_{1.8}Ca_{0.2}Ni_{0.8}Cu_{0.2}O_{4\pm\delta}$ в трёх состояниях: исходном, после отжига при 1473 К, а также после термобарической обработки (ТБО) при 1473 К и давлении 2.5 ГПа. Целью работы являлось исследование влияния термической и термобарической обработок на валентные состояния магнитных ионов (Ni, Cu), эффективный магнитный момент и кристаллическую структуру материала. Полученные данные важны для управления его свойствами в практических приложениях, например, при создании высокоёмких конденсаторов.

Методика синтеза и структурные параметры

Синтез соединений $La_{1.8}Ca_{0.2}Ni_{0.8}Cu_{0.2}O_{4\pm\delta}$ проводили методом цитратных прекурсоров с использованием N,N-диметилцитрата аммония ($C_6H_{14}N_2O_7$) [6]. Кристаллическая структура исследуемых образцов относится к простран-

Таблица 1. Значения параметров элементарной ячейки кристаллической решётки соединения $La_{1.8}Ca_{0.2}Ni_{0.8}Cu_{0.2}O_{4\pm\delta}$ (пространственная группа I4/mmm) в исходном состоянии и после различных видов обработки

Параметры	Исходный	Отожжённый	ТБО
$a = b$ (Å)	3.824(4)	3.825(1)	3.828(3)
c (Å)	12.715(6)	12.716(9)	12.706(3)
V (Å ³)	185.931(15)	186.146(13)	186.188(29)

ственной группе I4/mmm. В таблице 1 представлены параметры элементарной ячейки для образцов в исходном состоянии, после отжига и после термобарической обработки (ТБО) [17, 18]. Параметры элементарной ячейки были рассчитаны в предположении двухвалентного состояния ионов никеля и меди. Образцы синтезировали по данной методике многократно; разброс параметров кристаллической структуры не превышал погрешности определения во втором знаке после запятой. Следует отметить, что после термобарической обработки происходит взаимное искажение координационных полиэдров: октаэдр $Ni(Cu)O_6$ вытягивается, а антипризма $La(Ca)O_9$ сжимается вдоль оси c . Данное структурное изменение является непосредственной причиной вариации параметра c элементарной ячейки.

Магнитные свойства и их анализ

Магнитные свойства сложных оксидов остаются активной областью исследований, поскольку новые соединения, особенно многокатионные системы, могут проявлять уникальные свойства, которые трудно предсказать теоретически и требуют экспериментального изучения [19]. Исследования методом вибрационной магнитометрии были проведены на трёх образцах состава $La_{1.8}Ca_{0.2}Ni_{0.8}Cu_{0.2}O_{4\pm\delta}$: исходном, отожжённом при 1473 К и подвергнутом термобарической обработке (ТБО). Измерения выполнялись на коммерческой платформе PPMS-9 (Quantum Design) в температурном диапазоне от 5 до 305 К в режимах охлаждения в нулевом поле (ZFC) и в поле (FC) для значений внешнего магнитного поля $B = 10$ мТл и 0.1 Тл. Петли магнитного гистерезиса измерялись в диапазоне магнитных полей до 2 Тл при температурах 5, 10, 50, 100 и 300 К.

В данной работе детальный анализ магнитных свойств соединений $La_{1.8}Ca_{0.2}Ni_{0.8}Cu_{0.2}O_{4\pm\delta}$ начали с измерения температурной зависимости намагниченности в режиме FC. На рис. 1 представлены температурные зависимости намагниченности для всех исследуемых образцов, измеренные в поле $B = 0.1$ Тл. Из графиков видно, что обработка исходного материала существенно влияет на магнитные свойства. Для количественной оценки этого влияния экспериментальные данные в парамагнитной (высокотемпературной) области аппроксимировали законом Кюри-Вейсса, где зависимость обратной намагниченности ($1/M$) от температуры линейна. Следует отметить, что ли-

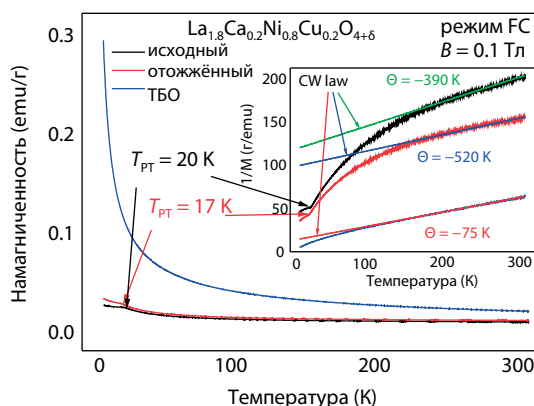


Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности и обратной намагниченности (вставка) образцов $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4+\delta}$ измеренные в магнитном поле $B = 0.1$ Тл в режиме FC.

нейное поведение зависимости $1/M(T)$ для образца после термобарической обработки наблюдается в более широком диапазоне температур (от 100 К до комнатной) по сравнению с другими образцами. Прямые линии на вставке к рис. 1 соответствуют аппроксимации экспериментальных данных законом Кюри-Вейсса $\chi = M/H = C/(T - \Theta)$, где χ – магнитная восприимчивость, M – намагниченность, H – магнитное поле, C – константа Кюри, T – температура, а Θ – постоянная Кюри-Вейсса. Аппроксимация обратной намагниченности $1/M$ (вставка на рис. 1) выполнялась с использованием выражения $(T - \Theta)/(C \cdot H)$. Параметры аппроксимации Θ и C приведены в табл. 2. Наибольший интерес представляет константа Кюри C , так как она связана с эффективным магнитным моментом образца, который определяется валентным состоянием, спином и концентрацией магнитных ионов. Оценим эффективный магнитный момент исследуемых образцов. Его значение на формульную единицу рассчитывается из экспериментальной константы Кюри по формуле:

$$\mu_{\text{eff}} = \sqrt{3k_B C / N_A},$$

где μ_{eff} – эффективный магнитный момент, k_B – постоянная Больцмана, N_A – число Авогадро, C – константа Кюри в единицах $\text{emu} \cdot \text{K} / (\text{Э} \cdot \text{моль})$. Рассчитанные значения эффективного магнитного момента μ_{eff} в единицах магнетонов Бора (μ_B) приведены в таблице 2.

Перейдём к детальному рассмотрению магнитных свойств. Уменьшение произведения $M \cdot T$ (пропорционального квадрату эффективного магнитного момента) при снижении температуры свидетельствует о наличии

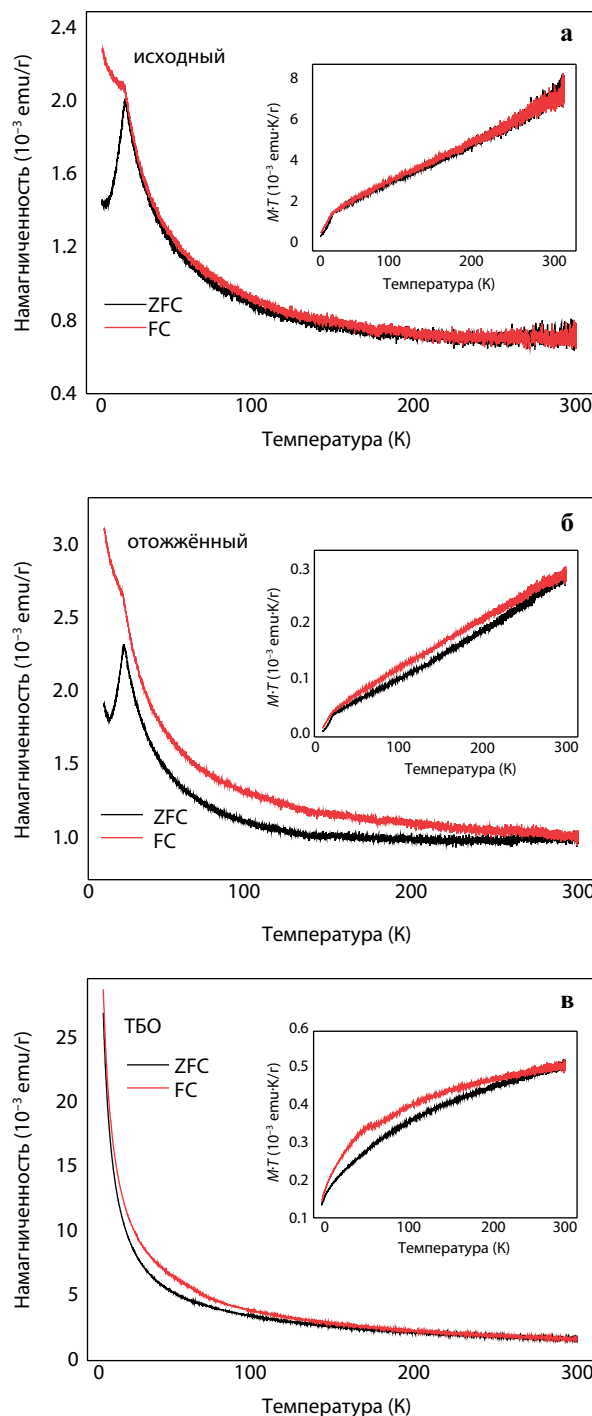


Рис. 2. Температурные зависимости намагниченности образцов $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4+\delta}$ измеренные в магнитном поле $B = 10$ мТл в режимах ZFC и FC: **а** исходный образец, **б** отожжённый образец, **в** образец, подвергнутый термобарической обработке. Вставка демонстрирует данные в представлении $M \times T$ от T .

Таблица 2. Магнитные параметры системы $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4+\delta}$.

Образец	Θ (K)	C ($\text{K} \cdot \text{emu} \cdot \text{Э}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$)	$\mu_{\text{eff}} (\mu_B)$
Исходный	-420	1.356	3.298
Отожжённый	-520	2.023	4.030
ТБО	-75	2.309	4.305

антиферромагнитных взаимодействий (рис. 2). Данный вывод подтверждается дополнительными фактами: отрицательными значениями постоянной Кюри-Вейсса (табл. 2), расщеплением ZFC- и FC-кривых (рис. 2) и наличием петель гистерезиса (рис. 3). Наблюдаемый

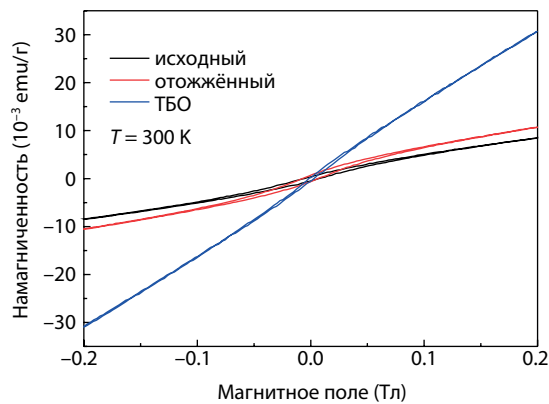


Рис. 3. Зависимости намагниченности образцов от внешнего магнитного поля, измеренный при комнатной температуре.

комплекс признаков характерен для скошенного антиферромагнитного или ферримагнитного упорядочения.

Однако экспериментальные значения эффективного магнитного момента (табл. 2, колонка 4) превышают теоретическую оценку для парамагнетика с двухвалентными ионами Ni^{2+} и Cu^{2+} (подробности расчёта – в табл. 4 работы [20]). Это позволяет предположить, что возникающий магнитный порядок приводит не к уменьшению магнитного момента (как в антиферромагнетике), а к его увеличению (как в ферромагнетике). Учитывая данное противоречие, увеличение наблюдаемого эффективного магнитного момента по сравнению с расчётным, вероятно, вызвано иной причиной, а не установлением магнитного порядка. В частности, причиной может быть изменение степени окисления магнитных ионов. Как следует из расчётов, приведённых в работе [20], значимое увеличение магнитного момента возможно лишь за счёт наличия в образце ионов Ni^{3+} в высокоспиновом состоянии ($S = 3/2$), поскольку только они способны вносить существенный вклад в суммарный магнитный момент. Все прочие состояния ионов никеля (с иной валентностью или спином) приводят либо к уменьшению эффективного момента, либо к его незначительному росту.

Отжиг в воздушной атмосфере, наиболее вероятно, приводит к изменению стехиометрии, в частности, к изменению содержания кислорода в элементарной ячейке. Это, в свою очередь, должно вызывать изменение степеней окисления других ионов. Экспериментальное значение эффективного магнитного момента для образца после отжига увеличилось по сравнению с исходным, что свидетельствует о возросшем содержании высокоспиновых ионов Ni^{3+} ($S = 3/2$). Согласно оценкам, приведённым в работе [20], концентрация ионов Ni^{3+} должна увеличиться более чем в три раза. Изменение спинового состояния магнитных ионов неизбежно скажется на величине магнитного взаимодействия. Экспериментально это проявляется в следующих наблюдениях: наблюдается значительное расхождение между ZFC- и FC-зависимостями (рис. 2б), а петли гистерезиса демонстрируют повышенное значение коэрцитивной силы по сравнению с исходным образцом (рис. 3). В совокупности с увеличением абсо-

лютного значения константы Кюри-Вейсса (табл. 2) эти наблюдения указывают на усиление антиферромагнитных взаимодействий между магнитными ионами.

Методом термобарической обработки исходного образца был получен третий исследуемый образец. Согласно предположению авторов работ [17, 18], в ходе такой обработки могут изменяться межатомные расстояния, тогда как степени окисления остаются такими же, как после отжига при атмосферном давлении. Следовательно, концентрация ионов Ni^{3+} должна сохраняться неизменной, что согласуется с расчётами, приведёнными в работе [20]. Однако изменение межатомных расстояний может приводить к изменению характера и величины магнитных взаимодействий, что, в свою очередь, должно сказываться на поведении намагниченности. На рис. 2в и 3 представлены следующие экспериментальные результаты: (i) разница между кривыми ZFC и FC уменьшается и (ii) коэрцитивная сила петли гистерезиса снижается для образца, подвергнутого термобарической обработке (ТБО), по сравнению с отожжённым. Значительное уменьшение абсолютного значения постоянной Кюри-Вейсса (Θ), рассматриваемое совместно с вышеуказанными наблюдениями, позволяет заключить, что в образце после ТБО магнитные взаимодействия ослабевают. Вероятной причиной этого является структурная деформация, такая как изменение длин связей и углов, согласно данным работы [17].

Зависимость намагниченности от магнитного поля даёт более полную информацию о магнитных взаимодействиях в исследованных образцах $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4\pm\delta}$. Для образцов, подвергнутых ТБО, петли гистерезиса не обнаружены (рис. 3). Это подтверждает вывод о существенном ослаблении магнитных взаимодействий в этих образцах, сделанный ранее на основе анализа температурных зависимостей намагниченности. Уменьшение намагниченности насыщения и коэрцитивного поля в образце после ТБО при сохранении концентрации ионов Ni^{3+} может быть связано с двумя факторами. Во-первых, термобарическая обработка может приводить к более равномерному распределению ионов Ni^{3+} и разрушению магнитно-коррелированных областей. Во-вторых, и это представляется более вероятным, ослабление обменных взаимодействий может быть обусловлено структурными изменениями: сжатием вдоль кристаллографической оси c и одновременным увеличением межатомных расстояний между атомами кислорода, окружающими магнитный ион.

Выводы

В результате исследований магнитных свойств образцов $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4\pm\delta}$ было установлено, что отжиг образца вызывает переход никеля из состояния Ni^{2+} в состояние Ni^{3+} , что приводит к увеличению эффективного магнитного момента, при этом тип магнитного упорядочения (скошенный антиферромагнетизм/ферримагнетизм) сохраняется. Термобарическая обработка не изменяет валентность ио-

нов, но вызывает значительные структурные искажения, приводящие к ослаблению магнитных взаимодействий. Это находит отражение в уменьшении константы Кюри-Вейсса и исчезновении признаков дальнего магнитного порядка в образцах после ТБО. Полученные магнитные характеристики хорошо согласуются с известными изменениями диэлектрических свойств данных материалов после обработок, что подтверждает комплексное влияние термических и барических воздействий на функциональные свойства слоистых перовскитов. Полученные результаты исследования важны для направленного синтеза материалов с заданными магнитными и диэлектрическими характеристиками, перспективных для применения в устройствах накопления энергии и высокотемпературной электронике.

Литература

1. Ruddlesden S.N., Popper P.: *Acta Crystallogr.* **11**, 54 (1958)
2. Sharma I.B., Singh D.: *Bull. Mater. Sci.* **21**, 363 (1998)
3. Nirala G., Yadav D., Upadhyay S.: *J. Adv. Ceram.* **9**, 129 (2020)
4. Ding P., Li W., Zhao H., Wu C., Zhao L., Dong B., Wang S.: *J. Phys.: Mater.* **4**, 022002 (2021)
5. Liang C., Zhao D., Li Y., Li X., Peng S., Shao G., Xing G.: *Energy Environ. Mater.* **1**, 221 (2018)
6. Xu X., Pan Y., Zhong Y., Ran R., Shao Z.: *Mater. Horiz.* **7**, 2519 (2020)
7. Chen Y., Sun Y., Peng J., Tang J., Zheng K., Liang Z.: *Adv. Mater.* **30**, 1703487 (2018)
8. Gao X., Zhang X., Yin W., Wang H., Hu Y., Zhang Q., Shi Z., Colvin V.L., Yu W.W., Zhang Y.: *Adv. Sci.* **6**, 1900941 (2019)
9. Gavrilova T.P., Yagfarova A.R., Deeva Yu.A., Yatsyk I.V., Gilmudinov I.F., Cherosov M.A., Vagizov F.G., Chupakhina T.I., Eremina R.M.: *J. Phys. Chem. Solid.* **153**, 109994 (2021)
10. Chupakhina T.I., Melnikova N.V., Kadyrova N.I., Deeva Yu.A., Mirzorakhimov A.A., Gavrilova T.P., Gilmudinov I.F., Eremina R.M.: *J. Solid State Chem.* **292**, 121687 (2020)
11. Song J., Ning D., Boukamp B., Bassat J.-M., Bouwmeester H.J.M.: *J. Mater. Chem. A* **8**, 22206 (2020)
12. Musicó B.L., Wright Q., Delzer C., Ward T.Z., Rawn C.J., Mandrus D.G., Keppens V.: *J. Am. Ceram. Soc.* **104**, 3750 (2021)
13. Rawl R., Lee M., Choi E.S., Li G., Chen K.W., Baumbach R., Cruz C.R.D., Ma J., Zhou H.D.: *Phys. Rev. B* **95**, 174438 (2017)
14. Bu Y., Gwon O., Nam G., Jang H., Kim S., Zhong Q., Cho J., Kim G.: *ACS Nano* **11**, 11594 (2017)
15. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Gan J.-Y., Chin T.-S., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y.: *Adv. Eng. Mater.* **6**, 299 (2004)
16. Rodgers J.A., Battle P.D., Dupré N., Grey C.P., Sloan J.: *Chem. Mater.* **16**, 4257 (2004)
17. Deeva Yu.A., Mirzorakhimov A.A., Suntsov A.Yu., Kadyrova N.I., Melnikova N.V., Chupakhina T.I.: *Chim. Tech. Acta* **9**, 20229410 (2022)
18. Деева Ю.А. Разработка новых керамических и композиционных материалов с высокой диэлектрической проницаемостью на основе слоистых перовскитоподобных оксидов: автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.17.11 / Уральский федеральный университет. – 2023. – 21 с. – <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=5309>.
19. Гаврилова Т.П., Ягфарова А.Р., Гильмутдинов И.Ф., Еремина Р.М.: Метамагнитные переходы в твёрдом растворе $\text{CaCu}_{3-x}\text{Ti}_{4-y}\text{Fe}_{x+y}\text{O}_{12}$ (3%Fe). Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завайского. Ежегодник **22**, 77 (2023)
20. Mamedov D.V., Deeva Yu.A., Bazhal V.V., Chupakhina T.I., Cherosov M.A., Batulin R.G., Gavrilova T.P.: *J. Alloys Compd.* **1042**, 183877 (2025)

Почему эффект обменного сужения спектра ЭПР в разбавленных растворах парамагнитных частиц может не наблюдаться в эксперименте?

К. М. Салихов

Отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Показано, что высокая скорость спинового обмена при бимолекулярных столкновениях радикалов в разбавленных растворах и атомов щелочных металлов в газах является необходимым, но ещё недостаточным условием для наблюдения эффекта обменного сужения исходно неоднородно уширенного спектра ЭПР. Для проявления обменного сужения, когда быстрый спиновый обмен практически перестаёт вносить вклад в обменное уширение наблюдаемой однородно уширенной линии (спектра) ЭПР, спиновый обмен должен быть эквивалентным. Это означает, что при расчёте эффективных радиусов столкновения для расфазировки спинов (spin dephasing, spin decoherence) и для эффекта отдачи квантовой когерентности от партнёра по взаимодействию (coherence transfer) должны быть выполнены условия, которые позволяют в момент столкновения учитывать только большое гейзенберговское обменное взаимодействие и пренебречь всеми остальными взаимодействиями типа спин-орбитальное и сверхтонкое взаимодействие.

Why can the effect of exchange narrowing of the EPR spectrum in dilute solutions of paramagnetic particles not be observed experimentally?

К. М. Salikhov

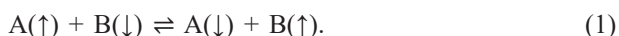
Department of chemical physics, Laboratory of spin physics and spin chemistry

It is shown that a high spin exchange rate during bimolecular collisions of radicals in dilute solutions and alkali metal atoms in gases is a necessary but still insufficient condition for observing the effect of exchange narrowing of the initially inhomogeneously broadened EPR spectrum. For the exchange narrowing to occur, when the rapid spin exchange practically ceases to contribute to the exchange broadening of the observed uniformly broadened EPR line (spectrum), the spin exchange must be equivalent. This means that when calculating effective collision radii for spin dephasing (spin dephasing, spin decoherence) and for the effect of quantum coherence recoil from an interaction partner (coherence transfer), conditions must be met that allow only the large Heisenberg exchange interaction to be taken into account at the time of the collision and neglect all other interactions such as spin-orbital and hyperfine interaction.

Постановка задачи

Одним из эффективных механизмов парамагнитной релаксации спинов электронов в разбавленных растворах является спиновый обмен при случайных бимолекулярных столкновениях парамагнитных частиц.

Схема спинового обмена в простейшем случае одного неспаренного электрона у сталкивающихся частиц, например, радикалов, в ходе бимолекулярного столкновения радикалов представляется как взаимный переворот спинов



Стрелками показаны состояния спина неспаренного электрона радикалов.

Спиновый обмен происходит за счёт обменного взаимодействия в момент случайного столкновения двух частиц А и В

$$\mathcal{H}_{\text{ex}} = \hbar J(r) S_A S_B, \quad (2)$$

где $J(r)$ – обменный интеграл, r – расстояние между двумя сталкивающимися радикалами.

Скорость спинового обмена задаётся кинетической теорией бимолекулярных процессов, и её можно представить в виде [1]

$$\begin{aligned} V_{\text{ex}} &= 4\pi r_{\text{ex}} D C, \\ K_{\text{ex}} &= 4\pi r_{\text{ex}} D, \end{aligned} \quad (3)$$

где r_{ex} – эффективный радиус спинового обмена при столкновении (1), K_{ex} – константа скорости спинового обмена, D – коэффициент взаимной диффузии двух сталкивающихся радикалов, C – концентрация радикалов.

Скорость спинового обмена можно варьировать, изменяя концентрацию парамагнитных частиц (3). Во

многих случаях в разбавленных растворах и в газах в качестве парамагнитных частиц выступают свободные радикалы или атомы щелочных металлов с одним неспаренным электроном. В этой работе мы будем в качестве примера рассматривать свободные радикалы со спином неспаренного электрона $S = 1/2$.

Спиновый обмен представляет интерес с разных точек зрения [2]. В настоящее время интерес к спиновому обмену связан с тем, что измерение скорости спинового обмена (3) позволяет получить информацию о коэффициенте поступательной диффузии молекул в полимерных растворах, биологических средах. Например, можно определить скорость бимолекулярных столкновений субстрата с ферментами.

Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) представляет наилучший метод для измерения скорости спинового обмена. Действительно, спиновый обмен проявляется в ЭПР-спектрах весьма характерным образом. Эксперименты показывают, что в области сравнительно медленного спинового обмена резонансные линии неоднородно-уширенного спектра ЭПР с ростом скорости спинового обмена уширяются пропорционально V_{ex} (3), а при достаточно высокой скорости спинового обмена с ростом V_{ex} (3) весь спектр превращается в одну однородно уширенную резонансную линию, причём вклад спинового обмена в эту однородную ширину спектра асимптотически стремится к нулю как $1/V_{\text{ex}}$ [2].

Говоря о трансформациях спектра ЭПР с ростом скорости спинового обмена, надо ещё отметить сдвиг резонансных частот линий к усреднённой частоте всех спинов ансамбля.

Приведённые трансформации спектра ЭПР многократно наблюдались в эксперименте [2, 3]. Они также получили теоретическое описание в распространённой модели (парадигме) спинового обмена и его проявлении в форме спектра ЭПР [3, 4]. Кратко распространённое представление о трансформациях спектра ЭПР с ростом скорости спинового обмена можно суммировать следующим образом.

Спиновый обмен при случайных столкновениях изменяет состояния столкнувшихся частиц, то есть спиновый обмен сокращает время жизни спина электрона в заданном состоянии. Поэтому в соответствии с соотношением неопределённости в квантовой механике резонансные линии в спектре ЭПР должны уширяться. И такое обменное уширение линий спектра ЭПР наблюдается в эксперименте [2–4].

Исходя из приведённых соображений, можно ожидать, что с ростом концентрации радикалов каждая сверхтонкая компонента спектра ЭПР должна уширяться. Но в действительности происходят удивительные изменения формы спектра. С ростом концентрации радикалов (с ростом скорости спинового обмена) спектр ЭПР может превратиться практически в одну однородно-уширенную резонансную линию, ширина которой не увеличивается, а уменьшается с ростом скорости спинового обмена. Наблюдается так называемое явление обменного суже-

ния спектра при больших скоростях спинового обмена. Вместо спектра, который состоял, например, из набора сверхтонких компонент, каждая из которых имела свою резонансную частоту, в области обменного сужения мы видим единственную узкую однородно уширенную линию!

Для интерпретации эффекта обменного сужения спектра привлекают теорему о среднем [5].

В результате обменного взаимодействия при столкновении двух радикалов практически скачком (“внезапно”) электрон может перейти из одного подансамбля радикалов с резонансной частотой ω_{0m} в другой с частотой резонанса ω_{0k} . Таким образом, спиновый обмен индуцирует спектральную диффузию. Спин электрона в каждом подансамбле радикалов имеет конкретную частоту перехода, которая скачком меняется при случайных столкновениях с другими радикалами. Если скорость спинового обмена достаточно высокая, то по теореме о среднем можно усреднить по времени частоту резонансного перехода. Для электронов во всех подансамблях радикалов усреднённая за достаточно большой интервал времени частота перехода должна стремиться к среднестатистическому значению. Таким образом, следуя теореме о среднем получаем, что спины всех электронов в системе будут демонстрировать одинаковую резонансную частоту.

Распространённый подход с использованием теоремы о среднем не позволяет рассчитывать форму спектра ЭПР при произвольных скоростях спинового обмена и не даёт убедительного объяснения сдвигу резонансных частот с ростом скорости спинового обмена в области сравнительно медленного обмена.

Уже с самых ранних работ по изучению спинового обмена были получены результаты, которые не совсем вписывались в приведённую выше картину трансформаций формы спектра ЭПР с ростом скорости спинового обмена. В работе [6] при изучении влияния перескоков фотовозбуждённых триплетных экситонов в молекулярном кристалле для нахождения скорости спинового обмена были использованы экспериментальные данные по ширине резонансных линий, по сдвигу резонансных частот и по ширине обменно-суженного спектра. Найденные из анализа экспериментальных данных для этих трёх параметров спектра ЭПР скорости спинового обмена не совпали, как ожидалось [6]. Конечно, это нельзя объяснить в рамках приведённых аргументов влияния скорости спинового обмена на форму спектра ЭПР. В качестве ещё одного примера, когда экспериментальные данные не вписываются в распространённую парадигму трансформаций формы спектра ЭПР с ростом скорости спинового обмена, можно отметить работу [7]. В этой работе были приведены экспериментальные данные, когда обменное уширение проявляется, а сдвиг резонансных частот и эффект обменного сужения не проявляются. Отсюда можно предположить, что высокая скорость спинового обмена может ещё не гарантировать наблюдение эффекта обменного сужения спектра ЭПР, высокая скорость спинового обмена необходимое, но недостаточное условие для проявления эффекта обменного сужения в эксперименте.

Последовательное описание эффекта обменного сужения спектра ЭПР в разбавленных растворах даёт новая парадигма спинового обмена [8–11]. Согласно новой парадигме, интерпретация эффекта обменного сужения на основе теоремы о среднем даёт качественно правильное описание только в далёкой асимптотике, только при очень больших скоростях спинового обмена.

Таким образом, с эффектом обменного сужения спектров сложилась противоречивая ситуация. С одной стороны, распространённая парадигма спинового обмена (теоретическая модель спинового обмена) предсказывает эффект обменного сужения спектра ЭПР при достаточно высоких скоростях спинового обмена. С другой стороны, в эксперименте не всегда наблюдается эффект обменного сужения при больших скоростях спинового обмена. Выход из этой противоречивой ситуации стал возможным благодаря новой парадигме спинового обмена [11].

В этой работе для простейшей модельной ситуации показано, как такое становится возможным, что эффект обменного сужения спектра не будет наблюдаться, хотя скорость спектральной диффузии (скорость спинового обмена) высокая и, согласно распространённой модели спинового обмена, должен наблюдаться эффект обменного сужения спектра. Оказывается, что такое заключение верно только в случае эквивалентного спинового обмена (см. ниже).

Эквивалентный и неэквивалентный спиновый обмен. Эффект “бабочки”

Обменное взаимодействие при бимолекулярных столкновениях парамагнитных частиц вызывает несколько физических процессов, каждый из которых характеризуется своим эффективным радиусом r_{ex} и эффективной константой скорости $K_{\text{ex}} = 4\pi r_{\text{ex}} D$:

- декогеренция спинов со скоростью $W_{\text{ex,sd}} \equiv K_{\text{ex,sd}} C$ (C – концентрация радикалов, $K_{\text{ex,sd}}$ – константа скорости декогеренции;
- перенос квантовой когерентности (отдача) от партнёра по столкновению со скоростью $W_{\text{ex,set}} = K_{\text{ex,set}} C$;
- перенос зеемановской энергии спина со скоростью $W_{\text{ex,set}} = K_{\text{ex,set}} C$.

Если эти процессы происходят с одинаковой скоростью, то спиновый обмен называют эквивалентным. Это возможно, если в момент столкновения можно пренебречь всеми спиновыми взаимодействиями, спин-гамильтониан которых не коммутирует с гамильтонианом обменного взаимодействия (2). В общем случае, спиновый обмен может быть неэквивалентным (см. [9, 11]).

Широко распространённая парадигма спинового обмена предполагает, что спиновый обмен между парамагнитными частицами при их случайных бимолекулярных столкновениях является эквивалентным. На первый взгляд, это предположение кажется обоснованным. Действительно, например, в случае столкновения нитроксильных радикалов, которые обычно используют в качестве спиновых

зондов, на радиусе столкновения, равном сумме ван-дер-ваальсовых радиусов двух встретившихся радикалов, обменный интеграл (2) оценивается как 10^{12} – 10^{13} рад/с [2]. Сверхтонкое взаимодействие электронов с магнитными ядрами атомов водорода в тысячи раз меньше, чем приведённая оценка обменного взаимодействия двух радикалов. Кажется можно уверенно пренебречь сверхтонким взаимодействием. Но для того, чтобы пренебречь сверхтонким взаимодействием (I – спин ядра)

$$\mathcal{H}_{\text{hf}} = \hbar a \mathbf{S} \mathbf{I} \quad (4)$$

в интервале времени столкновения τ_{col} , должно выполняться условие малости действия этого взаимодействия в сравнении с постоянной Планка, то есть должно выполняться условие (a – константа изотропного сверхтонкого взаимодействия)

$$a \tau_{\text{col}} \ll \hbar. \quad (5)$$

В противном случае необходимо учитывать вклад сверхтонкого взаимодействия в динамику движения спинов пары радикалов при их столкновении [9].

Когда условие (5) не выполняется, то скорости декогеренции спинов электронов, переноса когерентности от партнёра по взаимодействию и переноса зеемановской энергии не совпадают (см. рис. 2.5 в [9]). При этом оказывается, что $K_{\text{ex,sd}}$ увеличивается по сравнению с ситуацией эквивалентного спинового обмена, а $K_{\text{ex,set}}$ уменьшается с ростом параметра $a \tau_{\text{col}}$. Таким образом, даже слабые по сравнению с обменным взаимодействием могут привести к неэквивалентному спиновому обмену, причём

$$K_{\text{ex,sd}} > K_{\text{ex,set}}. \quad (6)$$

Эта ситуация может служить примером проявления эффект “бабочки”.

Иллюстрация отсутствия эффекта обменного сужения спектра ЭПР в случае неэквивалентного спинового обмена в простейшей модельной системе

В распространённой парадигме совершенно необоснованно спиновый обмен считается эквивалентным [4]. Согласно новой парадигме, спиновый обмен не обязательно является эквивалентным, движение спинов и форма их спектров ЭПР должны существенно различаться в зависимости от того, является ли “спиновый обмен” эквивалентным или неэквивалентным [11]. Для подтверждения этого мы провели анализ влияния неэквивалентности спинового обмена на форму спектра ЭПР. Алгоритм расчёта стационарного спектра ЭПР с учётом спинового обмена изложен в [9, 12].

Рассмотрим простейшую систему: раствор радикалов с одним магнитным ядром со спином $I = 1/2$. В области бесконечно малых концентраций радикалов C спектр ЭПР

состоит из двух сверхтонких компонент с расщеплением, равным константе сверхтонкого взаимодействия a .

Спиновый обмен даёт вклад в движение, например, поперечных компонент намагниченностей, M_{k-} , спинов электронов, локализованных на радикалах с разными проекциями спина ядра, который описывается кинетическими уравнениями (7)

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial M_{1-}}{\partial t} \right)_{\text{ex}} &= -W_{\text{ex,sd}} M_{1-} + W_{\text{ex,sc}} M_{2-}, \\ \left(\frac{\partial M_{2-}}{\partial t} \right)_{\text{ex}} &= -W_{\text{ex,sd}} M_{2-} + W_{\text{ex,sc}} M_{1-}. \end{aligned} \quad (7)$$

В этих уравнениях $M_{k-} = M_{kx} - iM_{ky}$, $k = 1, 2$, $W_{\text{ex,sd}}$ – скорость декогеренции спинов за счёт спинового обмена, $W_{\text{ex,sc}}$ – скорость переноса когерентности от партнёра по взаимодействию.

В случае эквивалентного спинового обмена радикалов со спином $1/2$ имеем $W_{\text{ex,sd}} = W_{\text{ex,sc}} = (1/2)K_{\text{ex}}C$, где K_{ex} – константа скорости взаимного переворота двух спинов (флип-флоп процесса), C – концентрация радикалов (3). Появление коэффициента $1/2$ связано с тем, что обменное взаимодействие не изменяет состояние двух магнитно-эквивалентных радикалов, относящихся к одному и тому подансамблю радикалов.

Чтобы проиллюстрировать влияние неэквивалентности спинового обмена на наблюдаемый спектр ЭПР, приведём результаты расчётов ЭПР магнитно-резонансных параметров простейшей модельной системы-радикалы с одним магнитным ядром со спином $1/2$ (см. (7)). Для этого надо записать кинетические уравнения для намагниченности системы.

При малых мощностях микроволнового поля движение поперечных компонент намагниченности спинов в ЭПР экспериментах описываются обобщёнными уравнениями Блоха и имеют следующий вид (см. (3)), если перейти в

систему координат, вращающуюся с частотой циркулярно-поляризованного микроволнового поля ω ,

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_{1-}}{\partial t} &= \left[-i \left(\omega_0 + \frac{a}{2} - \omega \right) - \frac{1}{T_2} \right] M_{1-} - W_{\text{ex,sd}} M_{1-} + \\ &\quad W_{\text{ex,sc}} M_{2-} - i \left(\frac{1}{2} \right) \omega_1 M_0, \\ \frac{\partial M_{2-}}{\partial t} &= \left[-i \left(\omega_0 - \frac{a}{2} - \omega \right) - \frac{1}{T_2} \right] M_{2-} - W_{\text{ex,sd}} M_{2-} + \\ &\quad W_{\text{ex,sc}} M_{1-} - i \left(\frac{1}{2} \right) \omega_1 M_0. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь ω_0 – зеемановская частота электрона в постоянном магнитном поле $\mathbf{B}_0$, $(\mathbf{B}_0 \parallel z)$, ω_1 – частота Раби циркулярно-поляризованного микроволнового поля $\mathbf{B}_1$, M_0 – равновесная намагниченность всех спинов.

Эти уравнения показывают, что благодаря отдаче квантовой когерентности от партнёра по взаимодействию намагниченности разных подансамблей спинов радикалов “зацепляются” и поэтому формируются согласованные (коллективные) моды движения спинов. Резонансные частоты коллективных мод в случае (8) равны

$$\begin{aligned} \omega_{\text{res1}} &= \omega_0 + (1/2)\text{Re}[(a^2 - 4W_{\text{ex,sc}}^2)^{1/2}], \\ \omega_{\text{res2}} &= \omega_0 - (1/2)\text{Re}[(a^2 - 4W_{\text{ex,sc}}^2)^{1/2}]. \end{aligned}$$

Уширение резонансных линий этих коллективных мод равны

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= 1/T_2 + W_{\text{ex,sd}} + (1/2)\text{Im}[(a^2 - 4W_{\text{ex,sc}}^2)^{1/2}], \\ \Omega_2 &= 1/T_2 + W_{\text{ex,sd}} - (1/2)\text{Im}[(a^2 - 4W_{\text{ex,sc}}^2)^{1/2}]. \end{aligned} \quad (10)$$

Для наглядности на рис. 1 приведены зависимости резонансных частот и их ширина для коллективных мод, которые даются (9) и (10).

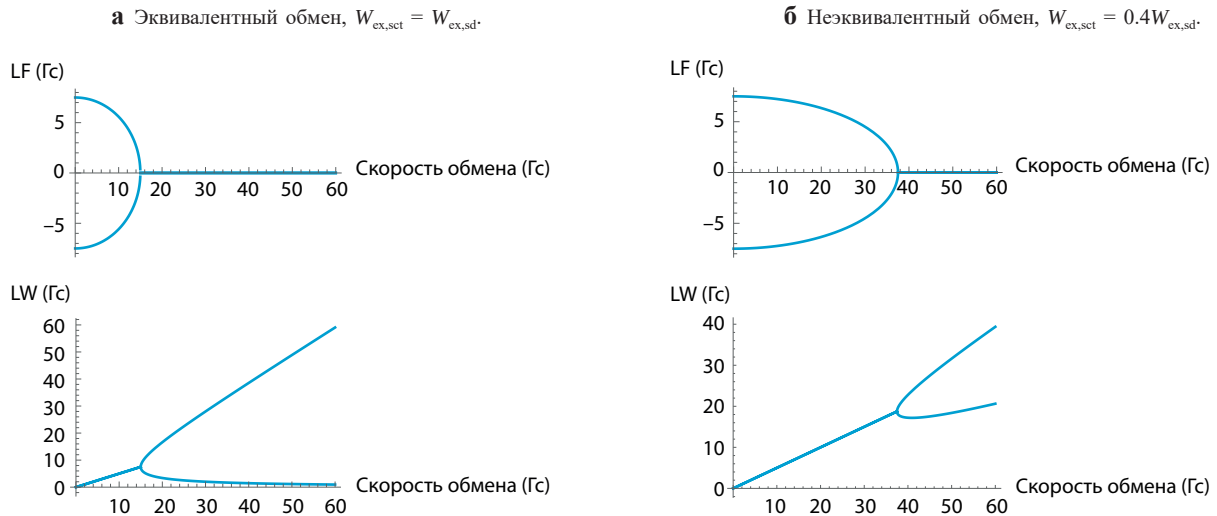


Рис. 1. Зависимость от скорости спинового обмена $V_{\text{ex}} = (1/2)K_{\text{ex}}C$ резонансных частот (на рисунках они отложены по оси ординат и обозначены как $LF = \omega_{\text{res},k}$, см. (9)) и уширения линий $LW \equiv \Omega_k$ (см. (10)). Расчёты проведены для $a = 15$ Гс, $1/T_2 = 0.02$ Гс. Все параметры даны в гауссах, единицах индукции магнитного поля. Для перевода в единицы $1/\text{с}$ их нужно умножить на гиромагнитную постоянную $1.76 \cdot 10^8$ для электрона.

Из этого рисунка можно сделать следующие заключения:

- Коллапс линий спектра определяется скоростью отдачи квантовой когерентности.
- В случае неэквивалентного спинового обмена, эффекта обменного сужения, то есть уменьшения уширения резонансных линий с ростом скорости спинового обмена, может и не происходить. Например, на рис. 1б видно, что и в условиях коллапса всего спектра сохраняются две резонансные линии, причём с ростом скорости спинового обмена уширение обеих линий растёт в отличие от ситуации эквивалентного обмена, когда в условиях коллапса одна из резонансных линий не уширяется, а сужается с ростом скорости спинового обмена. В то же время заслуживает внимания, что в случае неэквивалентного спинового обмена в условиях коллапса спектра, когда обе линии имеют одинаковую резонансную частоту, одна из линий уширяется с меньшим наклоном, а другая с большим наклоном. Отметим, что согласно (10) ожидается одинаковый наклон концентрационного уширения обеих линий в области сравнительно медленного спинового обмена (ср. уширения линий на рис.1б).

Из рис. 1 наглядно видно, что удивительные трансформации формы спектра ЭПР с ростом скорости спинового обмена непосредственно связаны с переносом когерентности от партнёра по обменному взаимодействию (отдачи квантовой когерентности), то есть со скоростью $W_{\text{ex,scf}}$. Действительно, рисунок показывает, что коллапс спектра определяется скоростью отдачи когерентности от партнёра по взаимодействию. Условием коллапса является равенство скорости отдачи когерентности расщеплению линий спектра (в рассматриваемом примере, расщепление двух сверхтонких компонент спектра)

$$W_{\text{ex,scf}} = a. \quad (11)$$

Заключение

Спиновый обмен при случайных столкновениях частиц не единственный механизм релаксации, вызванной спектральной диффузией, которая приводит к уширению линий и сдвигу их частоты в области сравнительно медленной спектральной диффузии и эффекту сужения спектра в случае достаточно быстрой спектральной диффузии. Интересным примером является химический обмен, случайные изменения частоты спинов, вызванные обратимыми химическими реакциями.

Эффект сужения спектров, вызванный спектральной диффузией, довольно часто встречается в ЭПР- и ЯМР-спектроскопии. Похоже, этот эффект не распространён в других областях спектроскопии, когда речь идёт о движении частиц не в спиновом подпространстве. И, возможно, поэтому трудно реализовать ситуацию эквивалентного спинового обмена.

Создаётся впечатление, что существует некоторая недооценка эффекта обменного сужения спектра в раз-

бавленных растворах парамагнитных частиц. Возможно это связано с тем, что теорема о среднем вроде бы всё объясняет. Всё усредняется при быстром спиновом обмене, экспериментально полученный спектр даёт среднюю статистическую частоту. Это как средняя температура пациентов в поликлинике. На самом деле, форма спектра в области быстрого спинового обмена даёт много удивительного. Некоторые примеры приведены в работах [13–16].

Очень интересно, что результаты исследования эффекта обменного сужения спектров ЭПР в разбавленных растворах радикалов могут оказаться весьма полезными в других научных дисциплинах. Оказалось, что в условиях обменного сужения мы имеем бозе-газ идентичных квазичастиц-элементарных возбуждений с максимальной симметрией в пространстве частот. Это может найти применение для получения конденсатов этих квазичастиц [17]. При разработке магнитометров исключительно высокой точности используется эффект, при котором спиновый обмен не даёт никакого вклада в обменное уширение, в декогеренцию. Этот эффект приписывается случаю спинового обмена без релаксации (spin exchange relaxation free, SERF effect). Этот эффект интерпретируется в рамках распространённой модели спинового обмена, используя теорему о среднем [18]. Фактически этот SERF эффект означает, что мы имеем дело с эквивалентным спиновым обменом.

Благодарности

Я очень благодарен моим коллегам в КФТИ им. Е. К. Завойского в Казани, в ИХФ им. Н. Н. Семёнова в Москве, в Академгородке (Новосибирск), проф. Б. Бейлзу и проф. М. Боуману (США) за многочисленные дискуссии и сотрудничество. Работа выполнена в рамках госзадания нашего института.

Литература

1. Smoluchowski M.V.: *Z. Phys. Chem.* **92** 129–168 (1917)
2. Замаараев К.И., Молин Ю.Н., Салихов К.М.: Спиновый обмен. Новосибирск: Наука, 1977.
3. Bales B.L. in: *Biological magnetic resonance*, vol. 8 (Berliner L.J., Reuben J., eds.). New York: Plenum Publish. Corp., p. 77, 1989.
4. Salikhov K.M.: *Appl. Magn. Reson.* **56**, 1077–1097 (2025)
5. Крылов Н.М., Боголюбов Н.Н.: Введение в нелинейную механику. Киев: Изд-во АН УССР, 1937.
6. Jones M.T., Chesnut D.B.: *J. Chem. Phys.* **38**, 1311–1317 (1963)
7. Скубневская Г.И., Салихов К.М., Смирнова Л.М., Молин Ю.Н.: *Кинетика и катализ* **9**, 888–892 (1970)
8. Салихов К.М.: *УФН* **189**, 1017–1043 (2019)
9. Salikhov K.M.: *Fundamentals of spin exchange: story of a paradigm shift*. Springer, 2019.
10. Salikhov K.M.: *Appl. Magn. Reson.* **51**, 297–325 (2020)
11. Salikhov K.M.: *Appl. Magn. Reson.* **56**, 1099–1130 (2025)
12. Salikhov K.M.: *Appl. Magn. Reson.* **47**, 1207–1228 (2016)
13. Bales B.L., Peric M., Dragutan I., Bowman M.K., Bakirov M.M.: *J. Phys. Chem. Lett.* **13**, 110952–110957 (2022)

14. Salikhov K.M., Bakirov M.M., Zaripov R.B., Khairutdinov I.T.: PCCP **25**, 17966 (2023)
15. Salikhov K.M., Bakirov M.M., Khairutdinov I.T., Zaripov R.B.: J. Magn. Reson. **363**, 107703 (2024)
16. Салихов К.М.: Известия РАН, сер. физическая **89**, 1555–1565 (2025)
17. Салихов К.М.: Новый подход к получению бозе-эйнштейновского конденсата. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского Ежегодник **24**, 45–50 (2025)
18. Seltzer S.J.: Development in Alkali-Vetal Atomic Magnetometry. Ph.D. Dissertation. Princeton University, 2008.

Как создать эффективные органические светоизлучатели: изучение фотофизических особенностей донорно-акцепторных диад, в которых реализуется процесс термически активированной замедленной флуоресценции (TADF)

А. А. Суханов, А. Е. Мамбетов, В. К. Воронкова

Отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Соединения на основе донорно-акцепторных (Д-А) диад, в которых возможен процесс термически активированной замедленной флуоресценции (TADF), являются перспективными для создания нового поколения OLED. Знания о механизмах TADF в эмиттерах такого типа необходимы для повышения их эффективности, в частности важным является вопрос о роли фотоиндуцированного локализованного триплетного состояния ^3LE в реализации TADF. В 2025 году методами времязерешённого (ВР) и импульсного ЭПР выполнено детальное исследование ряда новых компактных Д-А диад. Исследование большого ряда TADF излучателей типа Д-А показало, что спектры ВРЭПР являются суммой спектров двух триплетов (^3CS и ^3LE) и увеличение вклада от ^3LE коррелирует с эффективностью TADF. Впервые наблюдаемая инверсия поляризации электронных спинов (ПЭС) состояния ^3CS на больших временах и зависимость эффекта от температуры являются убедительными и прямыми экспериментальными доказательствами механизма спин-вибронной связи TADF. Также представлены результаты изучения влияния тяжёлого атома на эффективность TADF излучателей.

How to create efficient organic light emitters: studying the photophysical properties of donor-acceptor thermally activated delayed fluorescence emitters

A. A. Sukhanov, A. E. Mambetov, V. K. Voronkova

Department of chemical physics, Laboratory of spin physics and spin chemistry

Compounds based on donor-acceptor (D-A) thermally activated delayed fluorescence (TADF) emitters, hold promise for the creation of a new generation of OLEDs. Knowledge of the mechanisms of TADF in emitters of this type is essential for improving their efficiency. In particular, the role of the photoinduced localized triplet state ^3LE in TADF is crucial. In 2025, a detailed study of a number of new compact D-A dyads was performed using time-resolved (TR) and pulsed EPR techniques. A study of a large number of TADF emitters of the D-A type revealed that the TREPR spectra are the sum of the spectra of two triplets (^3CS and ^3LE), and an increase in the contribution from ^3LE correlates with the TADF efficiency. The first observed electron spin polarization inversion (ESP) of the ^3CS state at long times and the temperature dependence of this effect provide compelling and direct experimental evidence for the spin-vibronic coupling mechanism in TADF. The results of a study of the influence of a heavy atom on the efficiency of TADF emitters are also presented.

Введение

Термически активированная задержанная флуоресценция (thermally activated delayed fluorescence, TADF) – это процесс, в котором молекулярные частицы, находящиеся в неизлучающем возбуждённом состоянии, используя окружающую тепловую энергию изменяют состояние и после этого испускают свет. Наряду с флуоресцентными и фосфоресцентными соединениями, соединения TADF являются одними из трёх основных светоизлучающих материалов, используемых в органических светодиодах (organic light-emitting diode, OLED), при этом соединения на основе донорно-акцепторных (Д-А) диад, в которых возможен процесс TADF, являются наиболее

перспективными для создания нового поколения OLED [1–4]. Знания о механизмах TADF, интеркомбинационной конверсии (intersystem crossing, ISC) и обратной ISC (reverse intersystem crossing, RISC) в эмиттерах такого типа необходимы для повышения их эффективности, в частности важным является вопрос о роли фотоиндуцированного локализованного триплетного состояния ^3LE в реализации TADF. Изначально была предложена модель с двумя состояниями для объяснения RISC и наблюдения задержанной флуоресценции [2]. Согласно этой модели, для наблюдения TADF состояния T_1 (первое возбуждённое триплетное состояние) и S_1 (первое возбуждённое синглетное состояние) должны иметь одинаковую энергию, небольшая величина ΔE выгодна как для ISC, так и для

RISC, однако электронная конфигурация состояний S_1 и T_1 , участвующих в этом механизме, однозначно не была выяснена. В большинстве случаев предполагается, что эти два состояния являются состояниями с разделёнными зарядами (charge separated, CS). Однако поскольку переход между состояниями 3CS (триплетное состояние с разделённым зарядом) $\rightarrow$ 1CS (синглетное состояние с разделённым зарядом) является запрещённым, модель двух состояний недостаточна для обоснования наблюдения задержанной флуоресценции. В 2016 году было предложено, что для реализации TADF в Д-А диадах необходимо участие трёх состояний: излучательного состояния 1CS , тёмного состояния 3CS и локализованного на хромофоре состояния 3LE (LE: локально возбуждённое), которое необходимо для опосредования перехода из состояния 3CS в излучательное состояние 1CS [5, 6]. В большинстве случаев TADF-эмиттеры изучались только с помощью стационарной и разрешённой во времени фотолюминесцентной спектроскопии, которая не могла дать прямых экспериментальных доказательств существования тёмных состояний, таких как состояние 3CS и состояние 3LE . Метод ВРЭПР позволяет наблюдать спектры триплетных состояний, и наблюдение одновременно спектров от двух триплетов (3CS и 3LE) подтверждает эту модель. Мы первые в 2019 году наблюдали одновременно спектры от двух триплетов в TADF-диадах [7]. В 2025 году было выполнено детальное исследование фотофизических свойств большого ряда Д-А диад (рис. 1) [8–10]. Здесь мы представляем результаты исследования методами времязрешённого (ВР) и импульсного ЭПР триплетных состояний в TADF-диадах, хотя исследование носило более широкий характер. Так данные о проявлении TADF в этих диадах получены методами наносекундной и фемтосекундной оптической спектроскопии с временным разрешением.

Для эффективных материалов TADF необходимо соблюдение нескольких требований, таких как обеспечение малого энергетического расщепления между синглетным и триплетным возбуждёнными состояниями (ΔE) при сохранении высокого квантового выхода фотолюминесценции. Основным параметром TADF является скорость RISC, поэтому в данной работе также представлены результаты

изучения влияния тяжёлого атома на скорость RISC и, следовательно, на эффективность TADF излучателей.

Результаты

На рис. 1 приведены химические структуры некоторых исследованных нами Д-А диад: на основе фенотиазина (донора электронов) и нафталимида (акцептора электронов) (слева) и фенотиазина и дибензотиофен-S,S-диоксида (справа). Все образцы синтезированы и исследованы методами оптической спектроскопии с фемтосекундным и наносекундным временным разрешением под руководством профессора J. Zhao (Даляньский технологический университет, Китай). Исследования методом ВРЭПР и импульсного ЭПР выполнены на замороженных растворах при 80 K на Elexsys E-580 в X-диапазоне. Образцы возбуждались лазерным импульсом на длине волны 355 нм, используя параметрический осциллятор (LP603 SOLAR Laser Systems) и лазер Nd:YAG (LQ629 SOLAR Laser Systems). Времязрешённый эксперимент представляет собой построение двухмерной спектрально-временной зависимости за счёт суммирования временных спадов в заданных временных диапазонах для разных значений магнитного поля. ЭПР-спектры были согласованы с теоретическими, рассчитанными с использованием пакета программ EasySpin на языке программирования Matlab [11] и программы, написанной А. Мамбетовым [12].

Исследование двух классов Д-А диад показало, что все TADF-диады (будем так называть диады, для которых наблюдается TADF) проявляют схожие ЭПР-свойства. Рассмотрим эти свойства подробно на примере NI-PTZ диады, которая является TADF-диадой. Результаты ЭПР-исследования диады NI-PTZ представлены на рис. 2 и 3. Анализ экспериментального спектра ВРЭПР для NI-PTZ показывает, что спектр является суммой спектров от двух триплетных состояний (рис. 2а, б). Один спектр имеет значительно больший параметр $|D|$, равный 2250 МГц, и параметр E , равный 150 МГц, с поляризацией электронных спинов (ПЭС) e,e,a,e,a,a, что характерно для триплетного состояния, заселяемого по механизму SOCT-ISC (spin-orbit charge transfer intersystem crossing). Основываясь

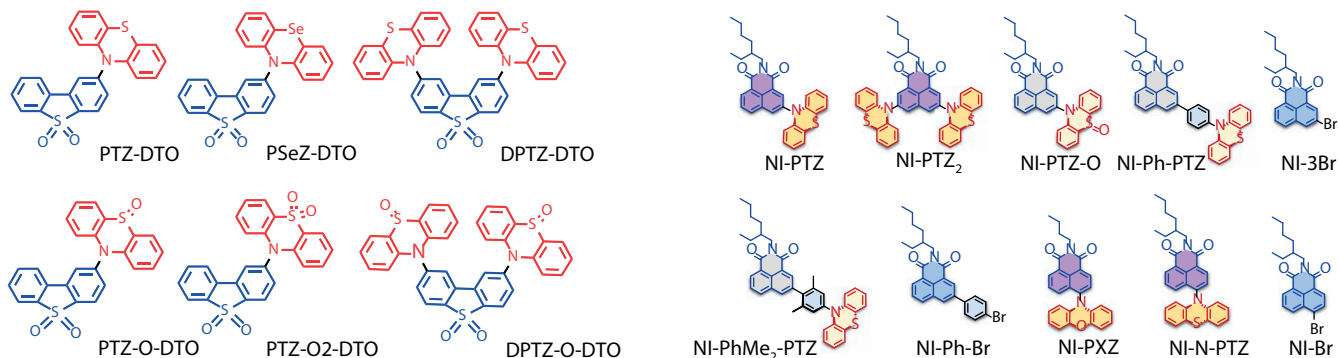


Рис. 1. Химические структуры донорно-акцепторных диад на основе фенотиазина и нафталимида (слева) и фенотиазин-дибензотиофен-S,S-диоксид (справа).

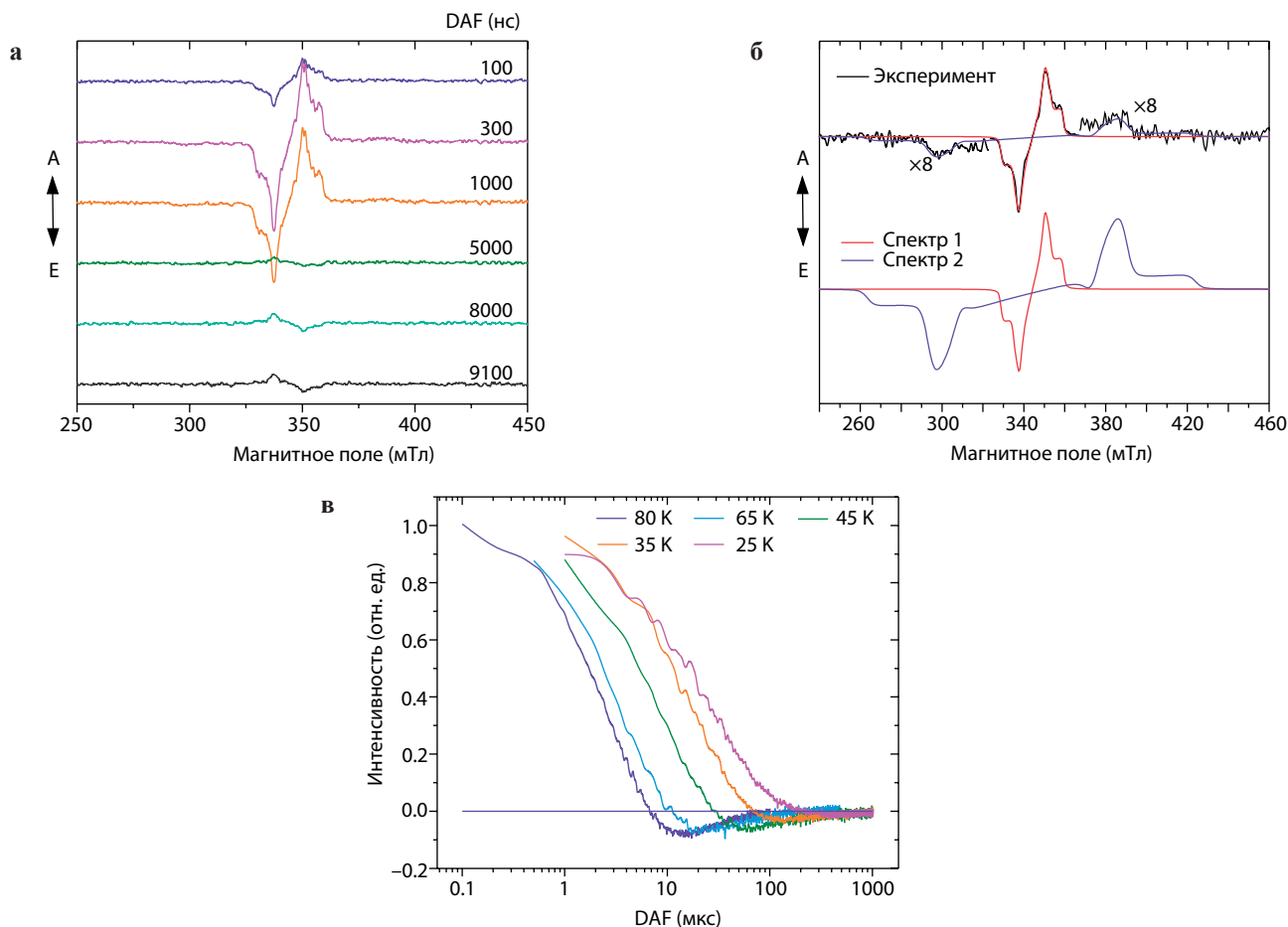


Рис. 2. а Временная эволюция ВРЭПР-спектра для NI-PTZ; б описание наблюдаемого ВРЭПР-спектра для NI-PTZ как суммы двух спектров; в временная эволюция сигнала спинового эха от задержки после лазерного импульса (DAF) для NI-PTZ. Сигнал эха регистрировался с помощью двухимпульсной последовательности в магнитном поле 350 мТл.

на величинах $|D|$ и E , мы относим это триплетное состояние к состоянию 3LE . Хотя интенсивность спектра 2, соответствующего состоянию 3LE , мала, этот сигнал можно отличить от фонового шума. Второй спектр, обозначенный как 1, более интенсивный, описывается гораздо меньшими параметрами тонкой структуры $|D|$ и E , равными 430 и 0 МГц, соответственно и имеет eee/aaa поляризацию электронных спинов. Этот спектр отнесли с большой достоверностью к триплету 3CS . Интересно, что ПЭС эволюционирует в картину a,a,a,e,e,e при больших задержках после лазерной вспышки, т.е. наблюдалась инверсия наблюдаемой картины ПЭС состояния 3CS . Мы наблюдали это явление также для диады NI-N-PTZ [7].

Временная эволюция сигнала спинового эха от задержки после лазерного импульса (delay after flash, DAF) для NI-PTZ и температурная зависимость интенсивности электронного спинового эха как функции от DAF показана на рис. 2в. Она отчётливо отображает инверсию ПЭС и показывает существенное изменение динамики населённостей состояния 3CS с понижением температуры. Этот экспериментальный факт подтверждает роль спин-вибронного взаимодействия в инверсии населённостей состояния 3CS . Начальная картина ПЭС спектра

соответствует перенаселённости T_x состояния 3CS . Экспериментальные спектры ВРЭПР были смоделированы с помощью программы, учитывающей анизотропию

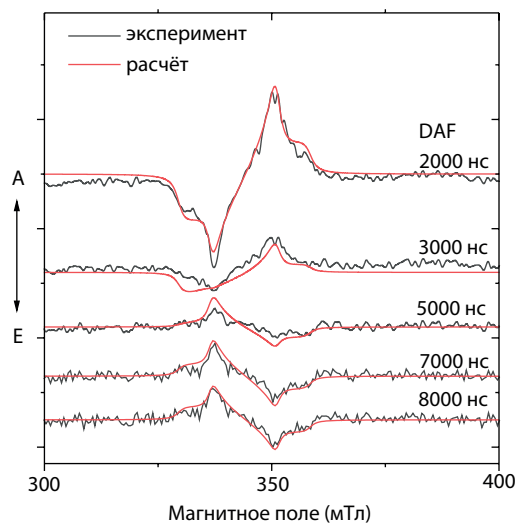


Рис. 3. Экспериментальная и рассчитанная (красная линия) эволюция ВРЭПР-спектров для 3CS NI-PTZ диады.

скоростей распада подуровней триплетного состояния, а также спин-решёточную и спин-спиновую релаксацию [12]. Спектры, представленные на рис. 3, смоделированы с $t(T_x) = t(T_y) = 5$ мс и $t(T_z) = 50$ мс, и зависящая от времени эволюция хорошо воспроизводится. Стоит отметить, что температура измерения ВРЭПР слишком низкая, чтобы связать её с RISC. Однако при комнатной температуре эту возможность нельзя исключить.

В ряду соединений, представленных на рис. 1 слева, только NI-PTZ и NI-PTZ₂ являются TADF-диадами. Надо отметить, что для NI-PTZ₂, хотя доля состояний ³CS превышает таковую для NI-PTZ, эффект TADF слабее, чем для NI-PTZ. Это связано с тем, что NI-PTZ₂ отличается от упомянутых излучателей TADF, поскольку его низколежащее триплетное состояние является состоянием ³CS. Следовательно вывод о том, что эффективный излучатель TADF демонстрирует более значительный вес состояния ³CS в спектрах ВРЭПР, применим только к случаю, когда состояние ³LE является низколежащим триплетным состоянием.

Для описания спектров ВРЭПР диады NI-PTZ-O также требуется наличие двух видов спектров, причём вклад от состояния ³LE становится более значительным, чем для NI-PTZ. Это согласуется с оптическими спектральными исследованиями [13]. Интересно, что инверсия ПЭС также наблюдалась для NI-PTZ-O. Однако разница в энергии между состояниями ³LE и ¹CS относительно велика, поэтому она не вызывает RISC.

Для не окисленных фенотиазин-дибензотиафен-S,S-диоксид диад (рис. 1, справа) наносекундная спектроскопия с разрешением во времени также демонстрирует сосуществование триплетных состояний ³CS и ³LE, причём для DPTZ-DTO диады спектры ВРЭПР являются суммой трёх спектров: два спектра с параметрами D , равными 2700 и 3400 МГц соответственно, отнесены к двум разным триплетным состояниям, вероятно локализованным или на фрагменте PTZ или на одном из фрагментов DTO. Третий спектр описан как спектр спин-коррелированной радикальной пары, рождённой из триплетного состояния. Следует подчеркнуть, что одновременное наблюдение спектров от разных состояний молекулы указывает на близость энергий этих состояний. Итак, результаты исследования DPTZ-DTO диады дают ещё один пример доказывающий, что локализованное триплетное состояние вблизи состояния с разделёнными зарядами повышает эффективность TADF [9].

Учитывая, что скорость обратной интеркомбинационной конверсии с триплетного на синглетное состояние является важным параметром для TADF-диад, мы изучили влияние тяжёлого атома на скорость RISC, заменив атом серы в PTZ-DTO на атом Se (PSeZ-DTO). Известно, что введение тяжёлых атомов в хромофоры усиливают ISC,

поэтому можно было ожидать, что такой же эффект характерен и для RISC, что должно привести к увеличению скорости RISC в PSeZ-DTO по сравнению с PTZ-DTO. Однако заметного изменения скорости RISC в этих двух диадах не наблюдалось. Аналогичный результат был получен при изучении влияния тяжёлого атома в ряду TADF-диад: NI-PTZ, NI-PTZ-2Br и NI-PSeZ [10]. Результаты демонстрируют отсутствие влияния тяжёлого атома на RISC в изученных диадах.

Заключение

Исследование большого ряда TADF излучателей типа Д-А показало, что спектры ВРЭПР являются суммой спектров двух триплетов (³CS и ³LE) и увеличение вклада от ³LE коррелирует с изменением эффективности TADF. Эти результаты экспериментально доказывают, что локализованное триплетное состояние, индуцированное рекомбинацией зарядов в донорно-акцепторных диадах вблизи триплета с разделёнными зарядами, повышает эффективность термически активированной задержанной флюоресценции (TADF). Впервые наблюдаемая инверсия поляризации электронных спинов (ПЭС) состояния ³CS на больших временах и зависимость эффекта от температуры являются убедительными и прямыми экспериментальными доказательствами механизма спин-вибронной связи TADF.

Литература

1. Uoyama H., Goushi K., Shizu K., Nomura H., Adachi Ch.: *Nature* **492**, No. 7428, 234–238 (2012)
2. Tanaka H., Shizu K., Miyazaki H., Adachi Ch.: *Chem. Commun.* **48**, No. 93, 11392 (2012)
3. Zhou J., Chen P., Wang X., Wang Y., Wang Y., Li F., Yang M., Huang Y., Yu J., Lu Z.: *Chem. Commun.* **50**, No. 57, 7586–7589 (2014)
4. Yang Z., Mao Z., Xie Z., Zhang Y., Liu S., Zhao J., Xu J., Chi Z., Aldred M.P.: *Chem. Soc. Rev.* **46**, No. 3, 915–1016 (2017)
5. Gibson J., Monkman A.P., Penfold T.J.: *Chem. Phys. Chem.* **17**, No. 19, 2956–2961 (2016)
6. Etherington M.K., Gibson J., Higginbotham H.F., Penfold T.J., Monkman A.P.: *Nat. Commun.* **7**, No. 1 (2016)
7. Tang G., Sukhanov A.A., Zhao J., Yang W., Wang Z., Liu Q., Voronkova V.K., Di Donato M., Escudero D., Jacquemin D.: *J. Phys. Chem. C* **123** (50), 30171–30186 (2019)
8. Ye K., Sukhanov A.A., Pang Y., Mambetov A., Li M., Cao L., Zhao J., Voronkova V.K., Peng Q., Wan Y.: *Phys. Chem. Chem. Phys.* **27** (2), 813–823 (2025)
9. Pei Y., Bussotti L., Liu X., Sukhanov A.A., et al.: *Chem. Sci.* **16**, 19737–19751 (2025)
10. Pei Y., Sukhanov A., Chen X., Sambucari G., Bussotti L., Liu X., Zhao J., Li Y., Huo Y., Voronkova V.K., Guo H., Di Donato M.: *Chem. Eur. J* **31** (5), e202403542 (2025)
11. Stoll S., Schweiger A.: *J. Magn. Reson.* **178**, 42–55 (2006)
12. Mambetov A., Sukhanov A., Zhang X., Zhao J., Voronkova V.: *Appl. Magn. Reson.* **55**, No. 12, 1553–1567 (2024)
13. Ye K., Cao L., van Raamsdonk D.M.E., Wang Z., Zhao J., Escudero D., Jacquemin D.: *Beilstein J. Org. Chem.* **18**, 1435–1453 (2022)

Сепарабельность, скрытые параметры и квантовая коррелированность пар ЭПР (Эйнштейна-Подольского-Розена)-Бом-Белла

Н. К. Соловаров

Отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии.

Получены разложения матриц плотности пар ЭПР-Бом-Белла в виде сумм четырёх равновероятных пар квантово-коррелированных кубитов. Тем самым доказана справедливость предположения Эйнштейна-Подольского-Розена о возможности статистической модели составных квантовых систем со скрытыми переменными (параметрами). Скрытыми параметрами оказались относительные фазы волновых функций квантовых подсистем. Предложена визуализация полученных разложений в виде коррелированных по азимутальным фазам векторов на сферах Блоха.

Separability, hidden parameters and quantum correlations of EPR (Einstein-Podolsky-Rosen)-Bohm-Bell pairs

N. K. Solovarov

Department of chemical physics, Laboratory of spin physics and spin chemistry

The separations of the density matrices of EPR-Bohm-Bell pairs are obtained as sums of four equally probable pairs of density matrices of quantum-correlated qubits. This proves the validity of the Einstein-Podolsky-Rosen assumption about the possibility of a statistical model of composite quantum systems with hidden variables (parameters). These hidden parameters turned out to be the relative phases of the wave functions of the qubits. A visualization of the obtained separations in the form of vectors correlated by azimuthal phases on Bloch spheres is proposed.

Введение

Вопрос, поставленный знаменитой работой Эйнштейна-Подольского-Розена о полноте квантовой теории, заключается в том, существуют ли скрытые (неизвестные) переменные (параметры) составных квантовых систем, которые позволяют описать квантовые свойства этих систем статистически, аналогично статистическому описанию свойств классических многочастичных систем (см. обзоры [1–3]).

Вернер [4] проанализировал условия, при которых возможно описание многосоставных квантовых систем в модели скрытых переменных в связи с мерой их запутанности, т.е. квантовой неопределённости их состояния. На настоящее время предложено 14 определений запутанности [5]. Но исходным, математически наиболее простым, принято следующее [1–3]. Двухсоставная квантовая система, состояние которой описывается матрицей плотности $\hat{\rho}^{AB}$ в гильбертовом пространстве прямого (тензорного) произведения пространств состояний подсистем А, В с дискретным энергетическим спектром, является запутанной и несепарабельной (неразделимой), если не существует разложений вида:

$$\hat{\rho}^{AB} = \sum_{\lambda} P(\lambda) \hat{\rho}_{\lambda}^A \otimes \hat{\rho}_{\lambda}^B, \quad (1)$$

где λ – скрытые (неизвестные) квантовые переменные, $\hat{\rho}^A$, $\hat{\rho}^B$ – матрицы плотности подсистем в состояниях λ , а для вероятностей $P(\lambda)$ справедливо: $\sum_{\lambda} P(\lambda) = 1$. Вернер назвал составные квантовые системы, для которых существуют равенства вида (1), классически коррелированными, а запутанные состояния – ЭПР-коррелированными (или квантово-коррелированными). Было отмечено, что для двухсоставных квантовых систем равенства вида (1) возможны, т.е. для таких систем возможны квантовые модели со скрытыми переменными.

Алгоритм расчёта и результат разделения матрицы плотности пары ЭПР-Бом

В работе [6] получены точные выражения равенств вида (1) для двухсоставных двухуровневых квантовых систем в состояниях Белла. Как это сделано?

Матрицы плотности состояний Белла (общепринято считающихся максимально запутанными [7]) являются матрицами 4-го порядка с 16 известными матричными

элементами. Поэтому для них выражение (1) можно представить в виде 16 нелинейных алгебраических уравнений для матричных элементов:

$$(\hat{\rho}^{AB})_{kl,mn} = \sum_{\lambda}^q P(\lambda) a_{kl}^{\lambda} b_{mn}^{\lambda}, \quad (2)$$

в которых искомыми неизвестными в правой части равенств являются: вероятности $P(\lambda)$, их число q , и матричные элементы матриц плотности второго порядка для подсистем

$$\hat{\rho}_{\lambda}^A, \hat{\rho}_{\lambda}^B \leftrightarrow a_{kl}^{\lambda}, b_{mn}^{\lambda} (k, l, m, n = 1, 2)$$

$$\hat{\rho}^{(\Psi^-)} = \langle \Psi^- | \Psi^- \rangle = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} =$$

$$\frac{1}{4} \left[\begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i\phi} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-i(\phi \pm \pi)} & 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i(\phi \pm \pi)} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-i\phi} & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i(\phi \pm \pi)} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-i(\phi \pm \pi)} & 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i\phi} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-i\phi} & 1 \end{pmatrix} + \right.$$

$$\left. \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i(\phi \pm \pi/2)} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-i(\phi \pm \pi/2)} & 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i(\phi \mp \pi/2)} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-i(\phi \mp \pi/2)} & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i(\phi \mp \pi/2)} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-i(\phi \mp \pi/2)} & 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i(\phi \pm \pi/2)} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-i(\phi \pm \pi/2)} & 0 \end{pmatrix} \right], \quad (3)$$

где ϕ – начальная фаза, определённая в интервале $[0, \pi]$.

Полученные разделённые матрицы плотности подсистем имеют нестандартный вид: их диагональные матричные элементы равны 0 или 1 и одновременно не равны нулю недиагональные элементы, характеризующие наличие когерентностей кубитов и определяющие относительные начальные фазы кубитов в каждой паре и между парами.

Визуализация и обсуждение

Физический смысл полученных разложений становится понятнее при их визуализации. Мы использовали предложенное в [8] представление коррелированных кубитов с помощью двух сфер Блоха. На рис. 1 изображены последовательные разделённые слагаемые суммы (3), обозначенные греческими буквами $\lambda, \mu, \nu, \vartheta$. Каждая пара суммы представляется антисимметрично относительно центра направленными векторами на сферах Блоха. Начальный фазовый параметр ϕ определён в плоскости xu системы координат, в которой проведено квантование рассматриваемой квантовой системы, т.е. соответствует азимутальному углу сферической системы координат. В модели Боба направлению оси z соответствует направление постоянного магнитного поля, в котором происходит распад синглетной пары электронных спинов.

соответственно. Матрицы плотности подсистем должны быть унитарными и нормированными (т.е. положительно определёнными), поэтому независимыми переменными являются только по два матричных элемента каждой из этих матриц. Кроме того, мы полагали подсистемы А, В равнозначными и предположили, что число неизвестных равно числу уравнений. При таких ограничениях для всех состояний Белла равенства (2) выполняются при $q = 4$, $P(\lambda) = 1/4$. В [6] были вычислены значения искоемых матричных элементов $a_{kl}^{\lambda}, b_{mn}^{\lambda}$ для всех четырёх пар Белла.

Здесь мы приводим разложение вида (2) для Ψ^- состояния Белла (синглетной пары ЭПР-Боба):

Из полученных разложений и их визуализации можно сделать вывод об интерференционной природе разделимости и квантовой коррелированности пар Белла. Действительно, разложения выглядят как суммы пар волн с одинаковой амплитудой и компенсирующими друг друга фазами. Для одиночных квантовых объектов с дискретным спектром (электронов, атомов, молекул...) существование квантовой когерентности (недиагональных элементов матрицы плотности) в когерентной спектроскопии физически отождествляется с суперпозиционным переходным состоянием в процессе излучения или поглощения (см. Макомбер [9]). При этом протяжённый по времени процесс излучения или поглощения резонансных фотонов соответствует модели Гейзенберга, когда магнитные (или электрические) моменты перехода в каждый момент времени имеют определённую пространственную ориентацию. При полуклассическом рассмотрении (в приближении классического поля) фазы моментов перехода атомов определяются фазой внешнего резонансного поля.

В случае пар Белла начальная (опорная) фаза ϕ разделённых кубитов является свободным (неопределённым) параметром, а их квантовые когерентности и относительные фазы характеризуют начальные стационарные состояния. Следовательно, физическое содержание так определённой квантовой когерентности отличается от общепринятого. Эта квантовая когерентность характеризует волновую (квантовую) природу запутанных частиц. Поэтому

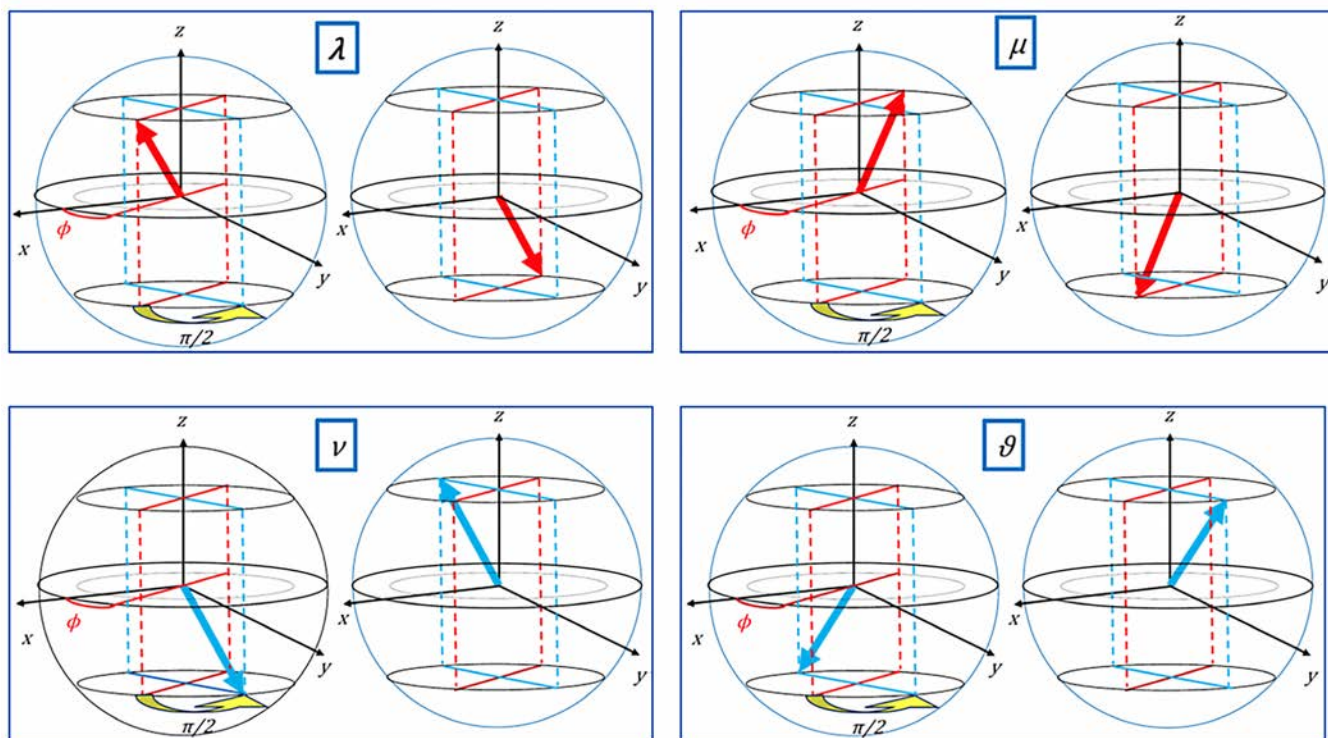


Рис. 1. Изображение синглетной пары ЭПР-Бомы, т.е. $|\Psi^-\rangle$ -состояния Белла, разделённого на четыре равновероятные пары квантово-коррелированных кубитов. Начальная фаза ϕ задаёт направление вектора опорной (красной) оси относительно координатной оси x . Синяя ось перпендикулярна опорной.

экспериментальные проявления разделимости (сепарабельности) состояний Белла в таких системах возможны при наблюдении интерференционных эффектов от разделённых кубитов. Во многих работах запутанность составных квантовых систем противопоставляется сепарабельности. Полученные в [6] разложения вида (3) противостоят такому представлению, поскольку сепарабельность и квантовая коррелированность (запутанность) сосуществуют. Таким образом, полученные разложения соответствуют выводу Вернера [5], указавшего на возможность описания квантово-коррелированных (запутанных) систем в модели скрытых переменных (параметров). Но в отличие от [5] называем такую коррелированность квантовой, поскольку коррелированными оказались принципиально квантовые характеристики кубитов – относительные фазы их волновых функций.

Выводы

1. Модельные в квантовой теории состояния пар ЭПР-Бомы-Белла разделимы, квантово коррелированы, допускают предполагаемое в рамках теории Эйнштейна-

Подольского-Розена статистическое описание в модели скрытых параметров.

2. Скрытыми параметрами для состояний ЭПР-Бомы-Белла являются принципиально квантовые фазовые характеристики подсистем.

3. Принятые в настоящее время определения запутанности составных квантовых систем и мер запутанности необходимо пересматривать с учётом фазовых характеристик составляющих подсистем.

Автор признателен В. Ф. Тарасову и А. М. Шегеду за стимулирующие замечания и обсуждения.

Литература

1. Horodecki R., Horodecki P., Horodecki M., Horodecki K.: Rev. Mod. Phys. **81**, 865–942 (2009)
2. Erhard M., Krenn M., Zeilinger A.: Nat. Rev. Phys. **2**, 365–391 (2020)
3. Килин С.Я.: УФН **169**, 507–527 (1999)
4. Werner R.F.: Phys. Rev. A **40**, 4277–4281 (1989)
5. Gnonfin H., Gouba L.: Symmetry **15**, 2089 (2023)
6. Соловаров Н.К.: ЖЭТФ **168**, 772–779 (2025)
7. Никитин Н.В.: Курс МГУ. Матрица плотности (2019), <https://teach-in.ru/course/densitymatrix>
8. Filatov S., Auzinsh M.: arXiv:quantph/2403.10587
9. Макомбер Дж.: Динамика спектроскопических переходов. Москва: Мир, 1979.

Эхо-явления в спиновой спектроскопии протонов и мюонов

Н. М. Сулейманов, С. А. Моисеев

Лаборатория физики углеродных наноструктур и композитных систем, лаборатория нелинейной оптики

75 лет назад Эрвин Хан (Erwin Hahn) открыл, что ядерные спины, прецессирующие с различными фазами в неоднородных магнитных полях, созданных локальным окружением этих спинов, могут быть снова возвращены в когерентное состояние, при котором они будут прецессировать в фазе друг с другом, путём приложения к спиновой системе определённой последовательности радиочастотных импульсов. Это восстановленное когерентное состояние приводит к возникновению ответного импульсного сигнала, которое Хан назвал спиновым эхом (spin echo). В настоящее время достигнуты впечатляющие успехи в исследовании вещества на атомном и молекулярном уровнях методами спектроскопии с использованием этого явления. На основе открытого Э. Ханом эффекта ядерного спинового эха, методы магнитно-резонансных исследований достигли современного уровня развития и повсеместного распространения. Вместе с тем, в последние годы активно развивается ядерно-физический метод исследования вещества – мюонная спиновая спектроскопия. Развитие исследований в этом направлении привело к концептуально новому подходу генерации спинового эха, когда отсутствует необходимость использования интенсивных РЧ-импульсов, а мюонное спиновое эхо возбуждается в нулевом магнитном поле путём приложения единичного $\pi(180^\circ)$ -импульса постоянного магнитного поля.

Echo phenomena in spin spectroscopy of muons and protons

N. M. Suleimanov, S. A. Moiseev

Laboratory of carbon structure physics and composite systems, Laboratory of nonlinear optics

75 years ago, Erwin Hahn discovered that nuclear spins precessing with different phases in inhomogeneous magnetic fields created by the local environment of these spins can be returned to a coherent state in which they precess in phase with each other by applying a certain sequence of radio frequency pulses to the spin system. This restored coherent state leads to the appearance of a response pulse signal, which E. Hahn called a spin echo. Currently, impressive advances have been made in the spectroscopy study of matter at the atomic and molecular levels with use of this phenomenon. Based on the nuclear spin echo effect discovered by E. Hahn, the methods of magnetic resonance research have reached a modern level of development and widespread distribution. At the same time, a nuclear physics method for studying matter, muon spin spectroscopy, has been actively developing in recent years. The development of research in this direction has led to a conceptually new approach to spin echo generation, when there is no need to use intense RF pulses, and the muon spin echo is excited in a zero magnetic field by applying a single $\pi(180^\circ)$ pulse of a constant magnetic field.

Предисловие

75 лет назад, Эрвин Хан (Erwin Hahn) открыл [1], что ядерные спины, прецессирующие с различными фазами в неоднородных магнитных полях, созданных локальным окружением этих спинов, могут быть снова возвращены в когерентное состояние, при котором они будут прецессировать в фазе друг с другом, путём приложения к спиновой системе определённой последовательности радиочастотных импульсов, и приводящих к возникновению ответного импульсного сигнала. Этот отклик получил название спиновое эхо (spin echo).

Эхо, в его классическом понимании, обычно связывают со звуковым эхо, возникающим, например, как

отражённый звук. При этом эхо существенно зависит от состояния среды, от которой происходит отражение звука. Например, если речь идёт о лесной среде, то эхо будет зависеть от расположения деревьев, расстояния между ними, динамики и многих других факторов, которые характеризуют данную среду. В этом определённая схожесть со спиновым эхо, поскольку каждый спин находится под действием локальных магнитных полей, создаваемых атомами и молекулами, из которых состоит данное вещество. Таким образом, как статические, так и динамические магнитные поля, будут оказывать влияние на сигнал эха, и эти поля с использованием определённых алгоритмов эксперимента и теоретического анализа могут быть определены с хорошей точностью.

Введение

Открытие явления спинового эха положило начало импульсному ядерному магнитному резонансу (ЯМР), а также привело впоследствии к созданию нового революционного метода диагностики в медицине, методу магнитно-резонансной томографии (МРТ). Как известно, фундаментальными параметрами спиновых систем являются времена релаксации, которые определяются как взаимодействиями внутри спиновой системы, так и взаимодействием спинов с окружающими атомами и молекулами, внешними электромагнитными полями, тепловыми колебаниями. Когда мы говорим спиновое эхо, мы подразумеваем прямой метод определения времён релаксации, что является ключевым параметром для спиновой когерентности и её стабильности в таких областях как магнитно-резонансная томография, квантовая информатика и спинтроника. В данной работе рассмотрены особенности формирования сигнала спинового эха на ядерных спинах протонов, мюонов и нейтронов, а также первое наблюдение сигнала спинового эха в нулевом магнитном поле [2].

Спад свободной индукции и спиновое эхо на протонах

Используя импульсные радиочастотные поля Э. Хан наблюдал и объяснил ряд переходных откликов ядерной спиновой системы. Такой подход имеет существенное преимущество, например, по сравнению с методом насыщения линии резонансного перехода ядерных спинов [2], поскольку спиновая система предоставляется самой себе в определённые интервалы времени, за

исключением времени действия возбуждающих радиочастотных импульсов. В этом случае уравнения Блоха, описывающие поведение ядерных спинов упрощаются, поскольку не содержат членов, включающих амплитуду импульса радиочастотного поля H_1 . Во вращающейся системе координат схема классического спинового эха, возникающего после приложения к исследуемому образцу $\pi/2$ - π (90° - 180°) последовательности радиочастотных импульсов приведена на рис. 1.

После приложения первого импульса, макроскопическая намагниченность M_0 , ориентированная в начальный момент вдоль приложенного постоянного магнитного поля по оси z , повернётся на 90° в плоскость xu при условии, что длительность импульса t_1 и его амплитуда H_1 удовлетворяют следующему условию:

$$\gamma H_1 t_1 = \pi/2 \text{ (} 90^\circ\text{-импульс)}.$$

В моменты времени А–В имеет место так называемый спад свободной индукции (free induction decay, FID), когда прецессия спинов в случайных локальных полях приводит к их разфазировке, вызывая спад макроскопической намагниченности. Распределение внутренних локальных полей в образце, возникающее вследствие существования

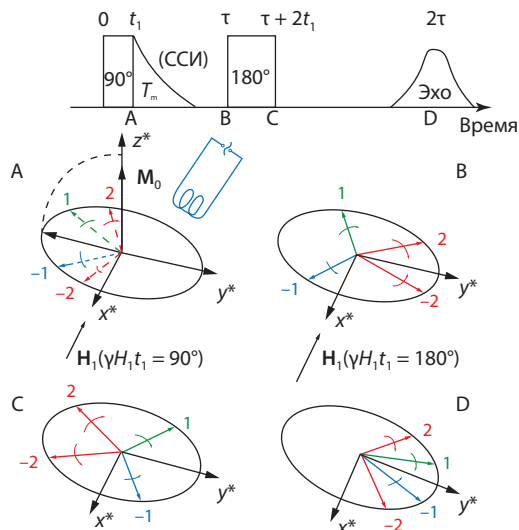


Рис. 1. Векторная диаграмма, показывающая возникновение сигнала спинового эха после приложения к исследуемому образцу $\pi/2$ - π последовательности радиочастотных импульсов во вращающейся системе координат. Отрицательные значения спинов -1 , -2 означают, что эти спины вращаются медленнее вследствие неоднородности локального поля.

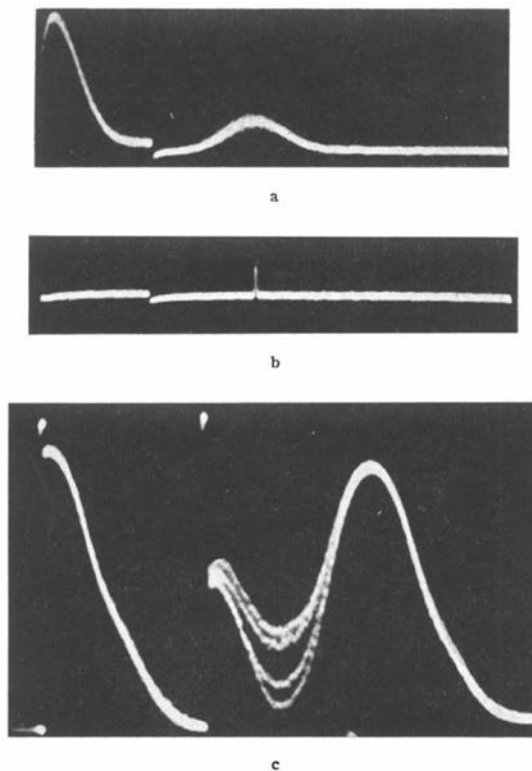


FIG. 2. Oscillographic traces for proton echoes in glycerine. The two upper photographs indicate broad and narrow signals corresponding to H_0 fields of good and poor homogeneity. The pulses, scarcely visible, are separated by 0.0005 sec. The induction decay following the first pulse in the top trace has an initial dip due to receiver saturation. The bottom photograph shows random interference of the induction decay with the echo for several exposures. The two r-f pulses are phase incoherent relative to one another.

Рис. 2. Иллюстрация из работы [1].

спин-спинового взаимодействия, также приводит к спиновой разфазировке и спаду сигнала свободной индукции. И хотя этот механизм эффективно работает в плоскости xy , намагниченность будет также затухать во времени и вдоль оси z , поскольку релаксационные процессы будут возвращать спины в равновесное состояние намагниченности, ориентированное вдоль внешнего магнитного поля $\mathbf{H}_0$.

Э. Хан установил, что облучение спиновой системы вторым радиочастотным импульсом в момент времени τ , длительность которого удовлетворяет условию:

$$\gamma H_1 t_2 = \pi \text{ (180^\circ\text{-импульс)},}$$

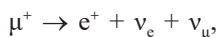
приводит к появлению в момент времени 2τ импульсного сигнала, который он соответственно назвал “спиновое эхо”.

На рис. 2 показаны осциллограммы сигналов спинового эха от протонов в глицерине, впервые наблюденных Э. Ханом [1]. Две верхние фотографии демонстрируют широкий и узкий сигналы, соответствующие приложенному внешнему магнитному полю $\mathbf{H}_0$ с хорошей и плохой однородностью. Нижняя фотография показывает интерференцию спада свободной индукции и сигнала спинового эха для нескольких выдержек.

Мюонное спиновое эхо

Мюон представляет собой элементарную частицу, обладающую массой, зарядом и спином. Спин мюона равен $1/2$. Важной особенностью мюонов является тот факт, что, подобно электрону и позитрону, мюоны существуют в положительном и отрицательном зарядовом состоянии. Мюон обладает конечным временем жизни равным в среднем 2.2 мкс, после которого он распадается с излучением позитрона, который испускается в направлении его спина в момент распада.

Схема распада мюона:



где e^+ – позитрон, ν_e , ν_μ – электронное и мюонное нейтрино, соответственно.

Масса мюона в девять раз меньше массы протона, поэтому часто положительно заряженные мюоны рассматривают как лёгкие изотопы водорода. В таблице 1 приведены основные характеристики протонов и мюонов.

Свойство мюона испускать позитрон в направлении спина нашло широкое применение в физике конденсиро-

ванного состояния, и дало начало новому направлению исследования вещества: мюонной спиновой спектроскопии. В дальнейшем при изложении материала мы будем иметь дело только с положительными мюонами. Мюонная спиновая спектроскопия по своим основополагающим подходам близка к методу ядерного магнитного резонанса, и основана на изучении поведения спина мюона, имплантированного в вещество. Интенсивные пучки мюонов, используемых в мюонных экспериментах получают на так называемых мюонных фабриках. Экспериментальные методики, основанные на использовании мюонов в физике конденсированного состояния, хорошо описаны в многочисленных книгах и монографиях, см. например [3, 4].

Мюонное спиновое эхо в его классическом варианте наблюдалось в работе [5], в которой, аналогично спиновому эхо Хана [1], формирование сигнала эха происходило в результате воздействия на среду двух радиочастотных РЧ-импульсов с импульсными площадками $\pi/2$ и π (90° и 180°).

Развитие исследований в этом направлении привело к концептуально новому подходу генерации мюонного спинового эха, который впервые был экспериментально наблюден в работе [6]. В этом методе отсутствует необходимость использования интенсивных РЧ-импульсов, и мюонное спиновое эхо возбуждается в нулевом магнитном поле путём приложения единичного $\pi(180^\circ)$ -импульса постоянного магнитного поля.

Эксперимент

На рис. 3 показана установка для проведения экспериментов по мюонной спиновой спектроскопии.

Эксперименты по наблюдению мюонного спинового эха в нулевом магнитном поле были проведены на

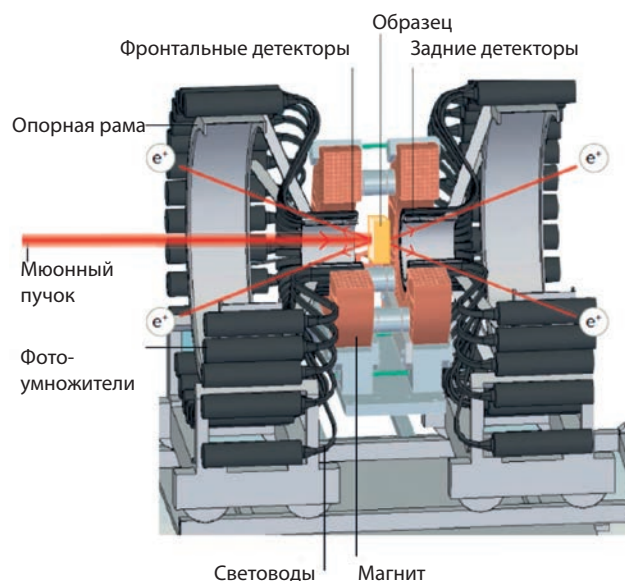


Рис. 3. Спектрометр для измерений методом мюонной спиновой спектроскопии. Детекторы позитронов расположены по ходу мюонного пучка впереди и сзади образца.

Таблица 1. Основные характеристики протонов и мюонов, здесь m_e – масса электрона, γ – гиромагнитное отношение.

Частица	Масса	Спин	γ (кГц/Гс)	Время жизни
Протон	$1836.2m_e$	$1/2$	4.2	Стабильное
Мюон	$206.8m_e$	$1/2$	13.5	$2.2 \cdot 10^{-6}$ с

боре (В), элементе 3-й группы периодической системы, и полупроводниковом соединении фосфат индия (InP) на импульсном источнике мюонов в лаборатории Резерфорда (Великобритания) (мюонный источник ISIS).

Суть этого метода состоит в том, что после каждого имплантированного мюона или ансамбля мюонов (в случае импульсного пучка) подаётся короткий импульс постоянного магнитного поля вдоль направления спина мюонов с определённым временем задержки τ , так что $\theta = \gamma H_1 t_1 = \pi$, где θ – угол поворота спиновой поляризации, H_1 – амплитуда импульса магнитного поля и t_1 – его длительность. В этом случае в момент времени 2τ будет наблюдаться сигнал спинового эха. Векторная диаграмма механизма формирования спинового эха представлена на рис. 4.

На рис. 5 приведены временные зависимости мюонной спиновой поляризации в боре (В), полученные в результате приложения единичного импульса постоянного магнитного поля при различных временах задержки. Сигнал, наблюдаемый после приложения рефокусирующего импульса магнитного поля в момент времени 2τ , представляет собой сигнал мюонного спинового эха.

На рис. 6 приведена временная зависимость мюонной спиновой поляризации в полупроводнике фосфат индия (InP) в нулевом внешнем магнитном при температуре 75 К (рис. 6а) и 175 К (рис. 6б) при приложении импульса постоянного магнитного поля со временем задержки 1.5 мкс.

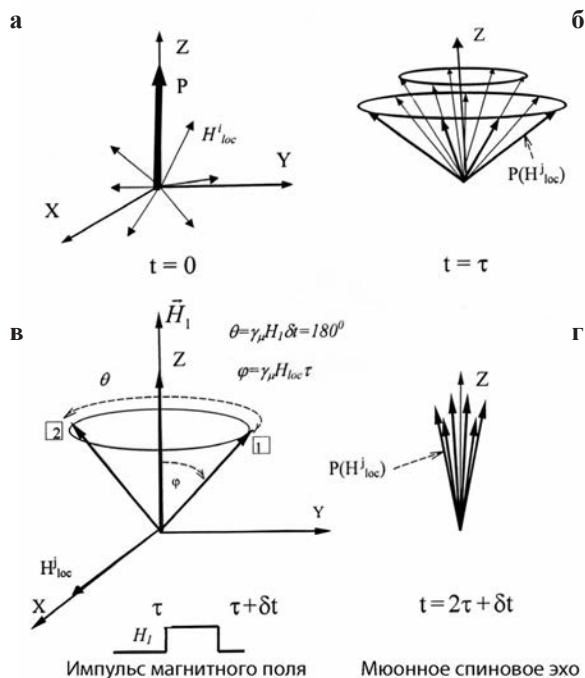


Рис. 4. Временная зависимость мюонной спиновой поляризации в нулевом внешнем магнитном поле до (а) и после приложения импульса постоянного магнитного поля с временной задержкой 0.5 (б); 3.5 (в) и 6.0 мкс (г) после имплантации мюонов в бор. Измерения проведены при комнатной температуре. H_1 и δt – соответственно амплитуда и длительность импульса постоянного магнитного поля.

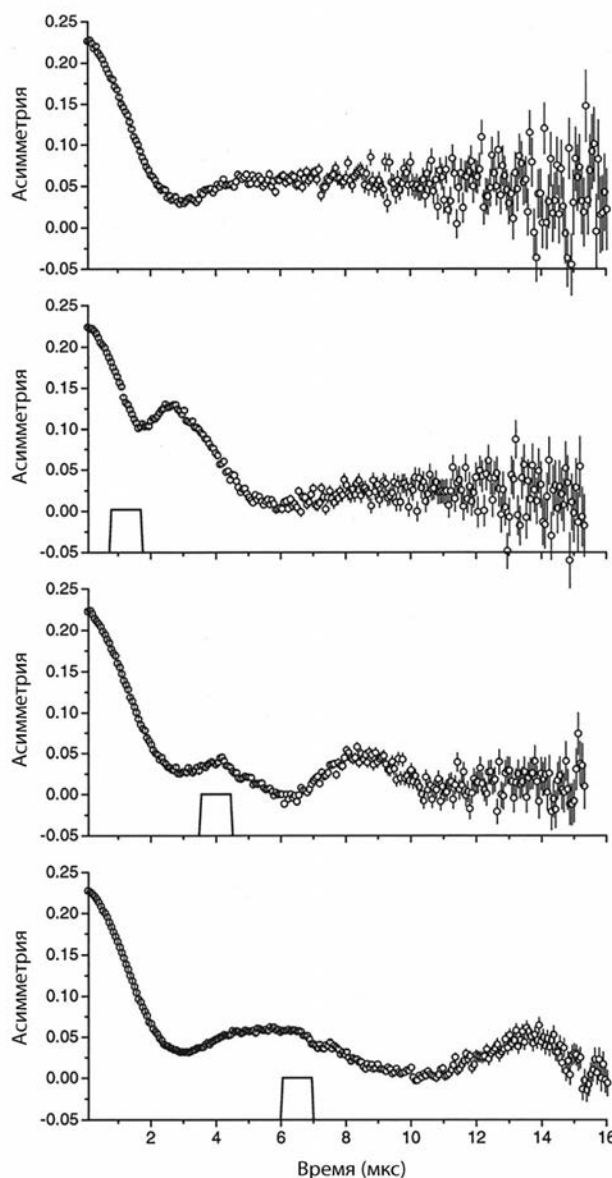


Рис. 5. Временная зависимость мюонной спиновой поляризации в боре в нулевом внешнем магнитном при различных временах задержки. Иллюстрация из работы [6].

Как видно, при температуре 175 К эхо сигнал пропадает, что связано с началом диффузии мюона в InP при этой температуре.

Таким образом, реализована принципиально новая одноимпульсная схема рефокусировки спиновой поляризации мюонов импульсом постоянного магнитного поля в отсутствии внешнего магнитного поля.

Спиновое эхо и квантовая информатика

Одним из важнейших препятствий широкого развития вычислительных технологий, основанных на квантовых алгоритмах, является декогеренция квантовых состояний, реализуемых в рабочем веществе квантового компьютера.

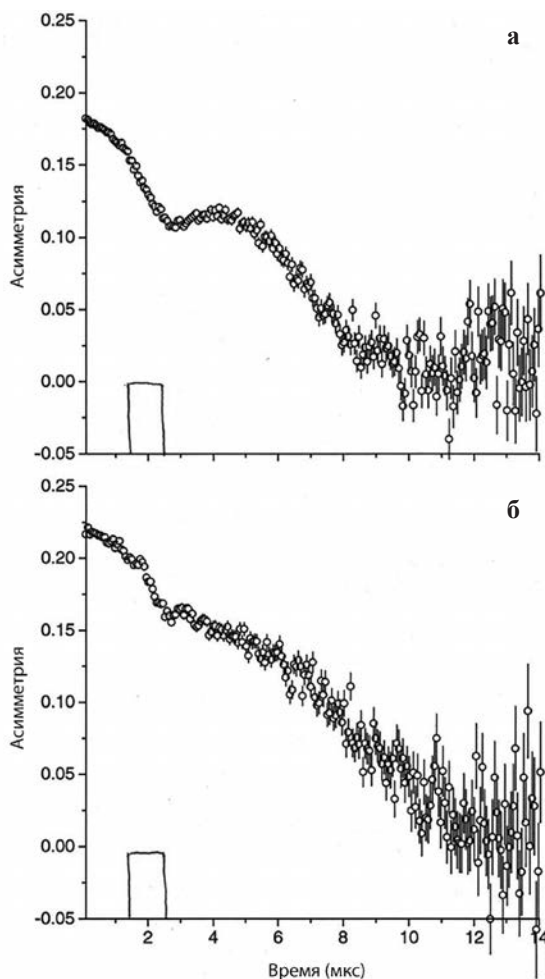


Рис. 6. Временная зависимость мюонной спиновой поляризации в полупроводнике InP в нулевом внешнем магнитном поле при температуре 75 К (а) и 175 К (б). Иллюстрация из работы [6].

Такая декогеренция возникает как в результате внешних, так и внутренних взаимодействий квантовой системы. Для исследования и понимания процессов декогеренции важное значение приобретает определение времён релаксации. Как уже отмечалось, одним из наиболее эффективных методов измерения времён релаксации является спиновое эхо. Вместе с тем, использование радиочастотных импульсов при их измерении может оказывать существенное влияние на квантовое состояние. В этой связи развитие методов исследования, оказывающих минимальное воздействие на спиновую систему, представляется крайне важным. В этом отношении измерения мюонного спинового эха в нулевом магнитном

поле представляются весьма интересными, поскольку мюоны могут быть имплантированы в любое вещество, в отличие, например, от ядерного магнитного резонанса, поскольку не на всех ядрах наблюдается сигнал ЯМР.

Невозможно в полной мере изолировать квантовую систему от внешних и внутренних воздействий, особенно от дефектов и взаимодействия с соседними спинами, но усреднить такие взаимодействия приложением определённых контрольных импульсов представляется возможным. В этом отношении весьма интересным представляется так называемый метод динамического развязывания (Dynamical Decoupling), основанный на использовании спинового эха, когда к спиновой системе прикладывается π -импульс (180°) или так называемая последовательность импульсов Карр-Парселл-Мэйбум-Гилл (Carr-Purcell-Maiboom-Gill).

Заключение

В настоящее время достигнуты впечатляющие успехи в использовании методов ядерной спиновой спектроскопии при исследовании вещества на атомном и молекулярном уровнях. Данные методы достигли современного уровня в результате плодотворного развития идей Э. Хана, открывшего эффект ядерного спинового эха. В последние годы активно развивается ядерно-физический метод исследования вещества – мюонная спиновая спектроскопия. Развитие исследований в этом направлении привело к концептуально новому подходу генерации спинового эха, который впервые был экспериментально наблюден на мюонах в работе [6]. В этом методе отсутствует необходимость использования интенсивных РЧ-импульсов, и мюонное спиновое эхо возбуждается в нулевом магнитном поле путём приложения единичного $\pi(180^\circ)$ -импульса постоянного магнитного поля

Литература

1. Hahn E.L.: Phys. Rev. **80**, 581–604 (1950)
2. Сликтер Ч.: Основы теории магнитного резонанса. Москва: Мир, 1967.
3. Schenck A.: Muon Spin Rotation, Spectroscopy, Principles and Applications to Solid State Physics. Bristol: Adam Hilger, 1985.
4. Смилга В.П., Белоусов Ю.М.: Мюонный метод исследования вещества. Москва: Наука, 1991.
5. Kreitzman S.R., Williams D.L., Kaplan N., Kempton J.R., Brewer J.H.: Phys. Rev. Lett. **61**, 25 (1988)
6. Suleimanov N.M., Moiseev S.A., Clark-Gayther M.A., Cottrell S.P., Cox S.F.J: Physica B: Cond. Matt. 676–680 (2000)

Структурные, оптические и фотоэлектрические свойства слоёв Si с внедрёнными примесными ионами индия и мышьяка

Р. И. Баталов, В. В. Базаров, Е. М. Бегишев, Н. М. Лядов, В. Ф. Валеев, Г. А. Новиков, Р. Ф. Ликеров

Отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория интенсивных радиационных воздействий, лаборатория радиационной физики, отдел химической физики, лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков

Проведена последовательная высокодозная имплантация монокристаллического Si ионами In^+ и As^+ с последующим стационарным термическим отжигом в твердофазном режиме или импульсным ионным отжигом в жидкофазном режиме. Методами сканирующей электронной микроскопии, вторичной ионной масс-спектрометрии, рентгеновской дифракции, оптической ИК-спектроскопии и фотопроводимости исследованы структурные, оптические и фотоэлектрические свойства имплантированных слоёв. Показано, что импульсный отжиг приводит к глубокой диффузии атомов As в Si до 1 мкм с образованием твёрдого раствора Si:As, а примесь In вытесняется к поверхности. Термический отжиг приводит к небольшому перераспределению примесей и образованию вторичных фаз InAs и In_2O_3 . В обоих случаях достигалась высокая концентрация электронов ($\sim 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$) и регистрировалась интенсивная полоса поглощения с максимумом при 3.6 мкм. Спектры фотоотклика меза-диодов при 300 К показывают область фоточувствительности 0.5–1.2 мкм, сравнимую с типовым Si-фотодиодом. Фотоотклик в области 1.2–2.4 мкм не обнаружен.

Structural, optical and photoelectric properties of Si layers with embedded indium and arsenic impurity ions

R. I. Batalov, V. V. Bazarov, E. M. Begishev, N. M. Lyadov, V. F. Valeev, H. A. Novikov, R. F. Likеров

Department of radiation impact on materials, Intense beam Laboratory, Radiation physics Laboratory, Department of chemical physics, Laboratory of radiospectroscopy of dielectrics

Sequential high-dose implantation of single-crystal Si with In^+ and As^+ ions was performed, followed by steady-state thermal annealing in the solid-phase mode or pulsed ion annealing in the liquid-phase mode. The structural, optical, and photoelectric properties of the implanted layers were studied using scanning electron microscopy, secondary ion mass spectrometry, X-ray diffraction, optical infrared spectroscopy and photoconductivity. It was shown that pulsed annealing leads to deep diffusion of As atoms into Si down to 1 μm , forming a Si:As solid solution, while the In impurity is displaced to the surface. Thermal annealing leads to a slight redistribution of impurities and the formation of secondary InAs and In_2O_3 phases. In both cases, a high electron concentration ($\sim 2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) was achieved, and an intense absorption band with a maximum at 3.6 μm was recorded. The photoresponse spectra of the mesa-diodes at 300 K show a photosensitivity range of 0.5–1.2 μm , comparable to a typical Si photodiode. No photoresponse was detected in the range of 1.2–2.4 μm .

Введение

Область оптического поглощения и фоточувствительности кристаллического кремния (Si) составляет $\lambda \approx 0.3\text{--}1.1$ мкм, то есть она не покрывает спектральный диапазон оптических коммуникационных систем ($\lambda = 1.31$ и 1.55 мкм), где доминируют A_3B_5 материалы, такие как InGaAs. Расширение функциональных возможностей Si на данную область длин волн возможно путём создания композитного материала, состоящего из матрицы Si со встроенными наночастицами более узкозонных A_3B_5 материалов, например, арсенида индия (InAs) с шириной запрещённой зоны $E_g = 0.35$ эВ для объёмного кристалла [1].

Практичным методом создания тонкоплёночного композитного материала может быть ионно-лучевой синтез, включающий высокодозную имплантацию примесных ионов в Si в сочетании с термическим отжигом (ТО) при температурах 800–1100 °С, протекающим в твердофазном режиме [2–4].

В качестве альтернативы отжигу в печи может быть использован импульсный отжиг наносекундной длительности (10–100 нс) лазерными или ионными пучками, протекающий в жидкофазном режиме за счёт образования расплава на поверхности. В работе [5] впервые показано применение импульсного лазерного отжига (ИЛО) слоёв Si, имплантированных ионами In^+ и As^+ . В работе [6]

нами впервые был применён импульсный ионный отжиг (ИИО) мощным пучком лёгких ионов (C^+/H^+) слоёв Si, имплантированных ионами In^+ и Sb^+ . В данной работе проведено сравнение результатов ТО и ИИО в отношении слоёв Si, последовательно имплантированных ионами In^+ и As^+ .

Детали эксперимента

Последовательная имплантация двусторонне-полированной пластины p -Si(111) ионами In^+ и As^+ была проведена на ионно-лучевом ускорителе ИЛУ-3. Энергия ионов In^+ составляла $E = 30$ кэВ, а энергия более лёгких ионов As^+ была выбрана как $E = 25$ кэВ с целью совпадения профилей ионов по глубине. Доза каждого сорта ионов составляла $D = 4 \cdot 10^{16}$ ион/см² при плотности ионного тока $j = 2$ мкА/см². Имплантация проводилась при 300 К. Для устранения аморфизации приповерхностной области Si проводилось два типа отжига. В первом случае образцы подвергались ТО в кварцевой печи в потоке азота при температурах 800 и 1000 °С в течение 30 мин. Во втором случае проводился ИИО на импульсном ускорителе ионов ТЕМП-2М, который генерировал мощный ионный пучок (C^+ , H^+) с максимальной энергией ионов $E \approx 300$ кэВ, длительностью импульса $\tau \approx 100$ нс, при плотности энергии $W \approx 1.0$ Дж/см².

Профили концентрации примесных атомов In и As в Si до и после отжига были получены методом время-пролётной вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Морфология поверхности и состав образцов изучались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Структурное состояние и фазовый состав образцов исследовались методом рентгеновской дифракции (РД).

ИК-спектры пропускания (T) и отражения (R) были измерены при 300 К в диапазоне длин волн 2–20 мкм. Поглощение образцов (A) было получено по формуле $A = 1 - R - T$. Спектральные измерения фотоотклика на вытравленных меза-структурах проводились при 300 К в диапазоне 400–2500 нм при освещении образца лампой накаливания мощностью 150 Вт и с подачей на образец обратного смещения от 0 до 5 В.

Результаты и обсуждение

Согласно данным метода СЭМ, имплантированные образцы до отжига не имели каких-либо особенностей на поверхности. После ТО в печи при 800 и 1000 °С образцы имели островковую структуру с островками размером 0.2–0.3 мкм, однородно покрывающими исследуемую поверхность (рис. 1а). ИИО в режиме расплава поверхности также приводил к образованию островковых структур, однако они были преимущественно упорядочены по границам округлых ячеек. Размер слившихся островков составлял 0.7–1.3 мкм, а диаметр ячеек составлял 1–2 мкм (рис. 1б).

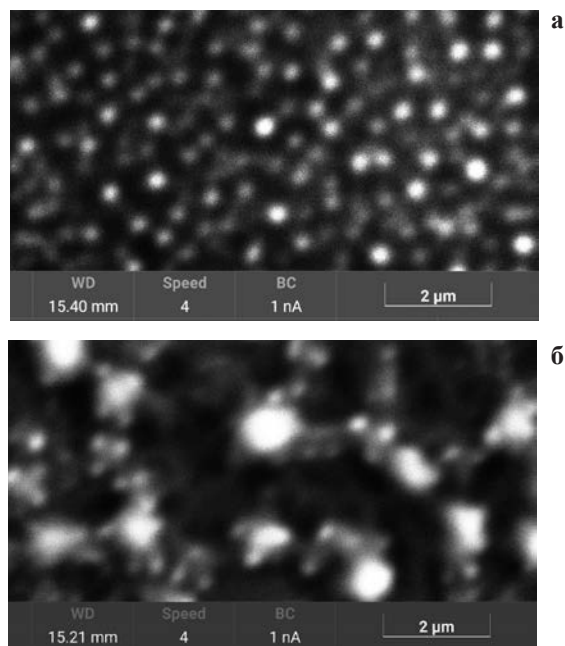


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности Si после имплантации ионами In^+ (30 кэВ, $4 \cdot 10^{16}$ ион/см²) и As^+ (25 кэВ, $4 \cdot 10^{16}$ ион/см²) с последующим ТО (1000 °С, 30 мин) (а) или ИИО (C^+/H^+ , 300 кэВ, 100 нс, 1.0 Дж/см²) (б).

Элементный анализ имплантированных образцов до и после отжига с помощью энергодисперсионной приставки на СЭМ при энергии пучка электронов 10 кэВ (глубина анализа около 0.5 мкм) показал, что после имплантации содержание примесей In и As составляло около 0.9 ат.%. Отжиг в печи при 800 и 1000 °С понижал их содержание до 0.75–0.8 ат.%. В результате ИИО содержание имплантированных примесей падало до 0.4–0.5 ат.% за счёт их испарения. Для более детального структурного анализа островков планируется привлечение метода ПЭМ.

С помощью метода ВИМС были получены экспериментальные примесные профили после ионной имплантации и последующих термических обработок. На рис. 2а приведены профили имплантированных ионов In и As до и после ИИО. В начальном состоянии пик профилей приходится на 10–20 нм, а их максимумы соответствуют концентрации около $2 \cdot 10^{22}$ ат/см³. Профиль тяжёлых атомов In более резко спадает до измеряемой концентрации 10^{18} ат/см³ на глубине 40 нм, тогда как профиль атомов As имеет хвост вглубь Si до 300 нм, вероятно, за счёт радиационно-ускоренной диффузии. Интегрирование профилей даёт величину введённой дозы около $2.5 \cdot 10^{16}$ ион/см² для каждого сорта ионов, что составляет 62.5% от номинальной, т.е. имеется потеря 37.5% примесей на распыление.

Отжиг имплантированного Si в жидкофазном режиме (ИИО), сопровождаемый быстрыми процессами плавления и кристаллизации, приводит к глубокой диффузии в расплаве атомов As вглубь Si до измеренной глубины 800 нм на уровне концентрации $1.2 \cdot 10^{20}$ ат/см³. Очевидно, что хвостовые участки профиля As превышают

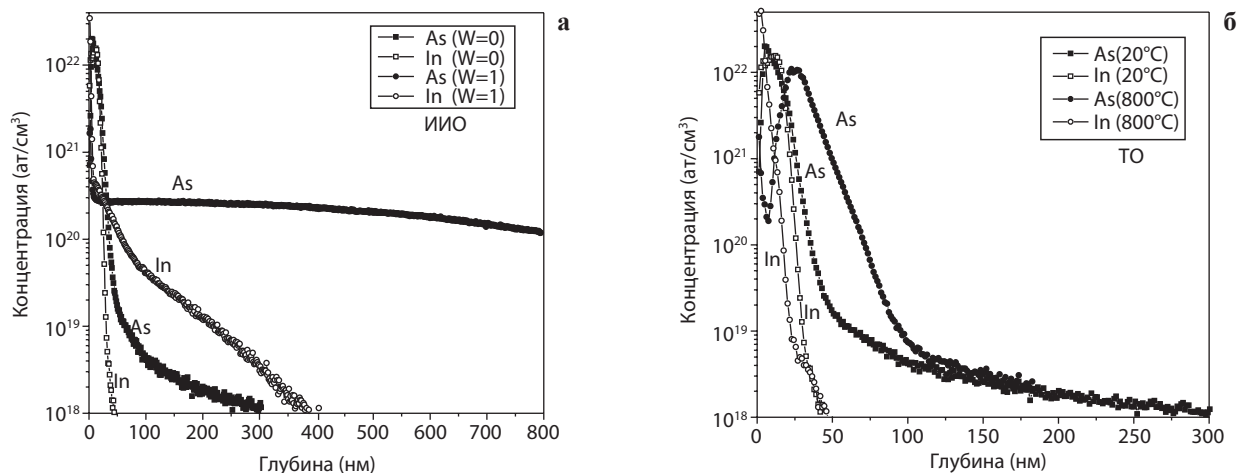


Рис. 2. ВИМС-профили ионов In⁺ и As⁺ в Si после имплантации и ИИО (1.0 Дж/см²) (а), после имплантации и ТО (800 °С, 30 мин) (б).

глубину 1 мкм, что соизмеримо с глубиной расплава Si, полученной в расчётах [7]. Наряду с диффузией, вблизи поверхности Si наблюдается узкий пик As с концентрацией $1.8 \cdot 10^{21}$ ат/см³, являющийся проявлением эффекта сегрегации [8]. Для примеси In, обладающей значительно меньшей растворимостью в Si ($6 \cdot 10^{19}$ ат/см³) по сравнению с As ($1.5 \cdot 10^{21}$ ат/см³) [9], наблюдается диффузия вглубь Si до глубины 400 нм при более выраженном вытеснении In к поверхности в узкий пик с концентрацией до $3.4 \cdot 10^{22}$ ат/см³. Таким образом, примесь As образует твёрдый раствор Si:As большой толщины, а примесь In, наряду с твёрдым раствором Si:In с сильно меняющейся концентрацией, преимущественно накапливается вблизи поверхности в слое менее 10 нм в металлической форме. Интегрирование профилей показывает значительную потерю In на испарение (до 70%) и несколько меньшую потерю As (до 50%).

В результате ТО образца в печи при 800 °С (рис. 2б) происходит вытеснение большей части примеси In к поверхности в тонкий слой с высокой концентрацией (до $5 \cdot 10^{22}$ ат/см³), а примесь As показывает небольшой сдвиг профиля вглубь Si с максимумом при 25 нм и с концентрацией 10^{22} ат/см³ в результате диффузии в твёрдой фазе. ВИМС-измерения на образце с отжигом при 1000 °С не проводились. Таким образом, в результате термических обработок происходит пространственное разделение профилей In и As, которое понижает вероятность образования фазы InAs на одинаковой глубине.

С помощью метода РД исследовалась кристаллическая структура и фазовый состав имплантированного слоя после ТО при 800 и 1000 °С (рис. 3). При данных режимах отжига вероятность образования фазы InAs, а не твёрдого раствора Si:As (Si:In) более высокая, чем при ИИО за счёт меньшей диффузии (рис. 2). Из рис. 3 видно, что в спектрах имеются пики от держателя из стекла, фазы InAs, Si подложки и фазы In₂O₃, а с ростом температуры отжига сужается ширина пиков, идущих от образца.

Рассмотрим далее оптические свойства в ИК-области синтезированных образцов. На рис. 4а–в показаны ИК-

спектры пропускания, отражения и результирующего поглощения для исходного монокристалла *p*-Si и синтезированных образцов. В спектрах пропускания видно его уменьшение с ростом температуры отжига, а для образца после ИИО пропускание падает почти до нуля для длин волн свыше 6 мкм. Полоса вблизи 9 мкм (1100 см^{-1}) обусловлена поглощением света на кремний-кислородных (Si=O) связях. Шумы на спектрах обусловлены адсорбцией паров H₂O, CO₂ и углеводородов на поверхности образца.

В спектрах отражения (рис. 4б) видно слабое изменение спектра для образца после отжига 800 °С, по сравнению с исходным Si, и сильное изменение после отжига 1000 °С. Наблюдается полоса плазменного резонанса, характерная для сильно легированных полупроводников [10], с минимумом отражения при 3.2 мкм (3100 см^{-1}) и с его ростом до 65% при 10 мкм. Аналогичная полоса видна и для образца после ИИО с минимумом при 3.4 мкм (2940 см^{-1}). Наличие такой полосы говорит об эффективном встраивании донорных атомов As в узлы решётки Si, т.е. об их электрической активации. Оценка

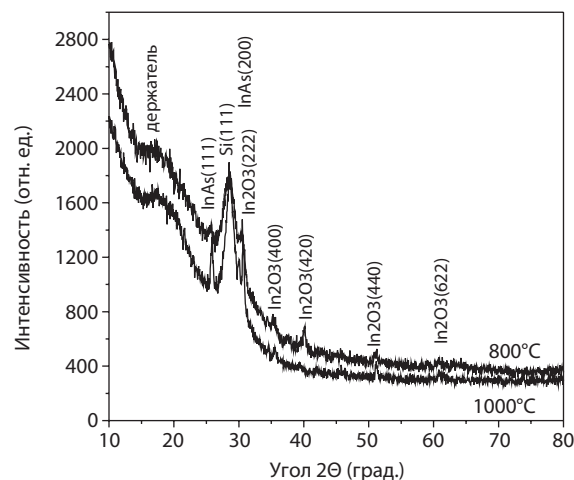


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы образцов Si после имплантации ионами In⁺ и As⁺ с последующим ТО при 800 и 1000 °С в течение 30 мин в атмосфере азота.

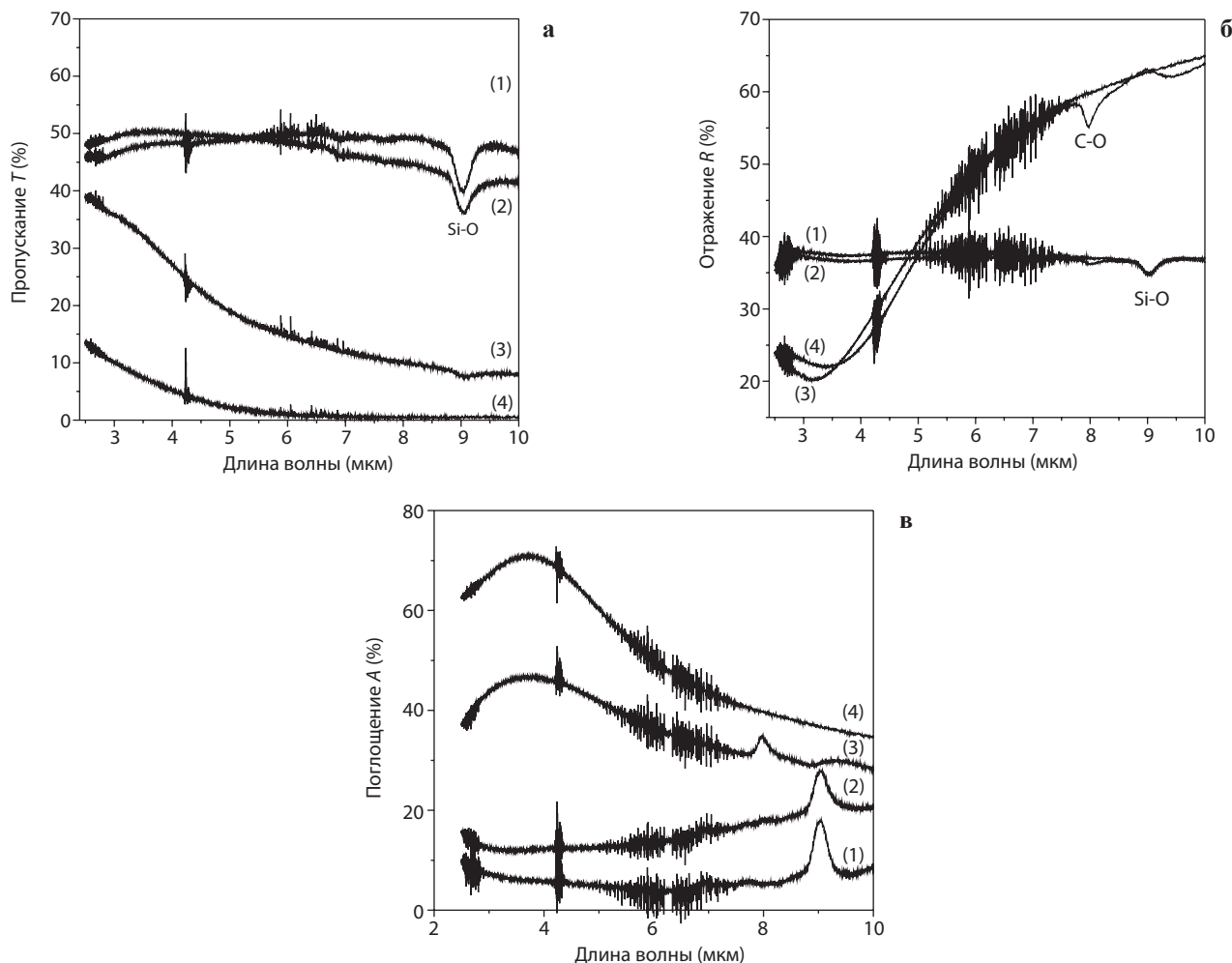


Рис. 4. ИК-спектры пропускания T (а), отражения R (б) и результирующего поглощения A (в) для исходного монокристалла p -Si (1) и имплантированных образцов Si после ТО при 800 °C (2), 1000 °C (3) и ИИО с $W = 1.0$ Дж/см² (4).

концентрации свободных электронов в легированных слоях по формуле из [10] даёт значения $(2.0\text{--}2.2) \cdot 10^{20}$ см⁻³. Сравнение данной величины с концентрацией примеси As после ИИО в пределах глубины 400 нм (рис. 2в) показывает их почти полное совпадение, что говорит об уровне активации As около 100%. В спектре отражения образца после отжига 1000 °C также видна полоса при 8 мкм (1250 см⁻¹), вероятно связанная с поглощением на связях C=O.

В спектрах поглощения (рис. 4в) виден его существенный рост от значений около 5% для исходного Si до 70% для образца после ИИО. Полосы поглощения отожжённых образцов (1000 °C и ИИО) имеют максимум при 3.6–3.7 мкм, а спектр образца после отжига 800 °C такой полосы не показывает, что вероятно связано с его дефектностью. Природа наблюдаемой полосы поглощения при энергии фотона ≈ 0.34 эВ может быть связана с двумя механизмами – поглощением на свободных электронах (концентрация электронов около $2 \cdot 10^{20}$ см⁻³) и поглощением на синтезированной фазе InAs, поскольку ширина запрещённой зоны объёмного InAs равна 0.35 эВ. Для разделения этих вкладов требуется проведение допол-

нительных экспериментов с внедрённой примесью As, но без примеси In.

На основе синтезированных образцов были приготовлены меза-диодные структуры размером 3×3 мм² и высотой 1.5 мкм путём кислотного травления в CP4. Легированные слои имели n -тип проводимости по данным метода термо-ЭДС и низкий обратный темновой ток (~ 1 мкА), растущий при освещении образцов. Результаты измерений фотоотклика при освещении образцов лампой накаливания мощностью 150 Вт приведены на рис. 5. Измерения в диапазоне 400–1400 нм, проведённые без ИК-светофильтра, показали рост сигнала с ~ 500 нм, достижение максимума при 930–960 нм и его спад к ~ 1200 нм. Рост сигнала с 1200 нм обусловлен проявлением второго порядка дифракции. Форма спектра фотоотклика образцов идентична форме спектра типового Si-фотодиода (например ФД-27К) с границей фоточувствительности вблизи 1200 нм [11]. При использовании ИК-светофильтра, блокирующего свет до 1200 нм, и записи спектра до 2450 нм не обнаружено какого-либо ощутимого сигнала фотоотклика от всех образцов, который мог ожидать-ся благодаря наличию высокого уровня поглощения в них

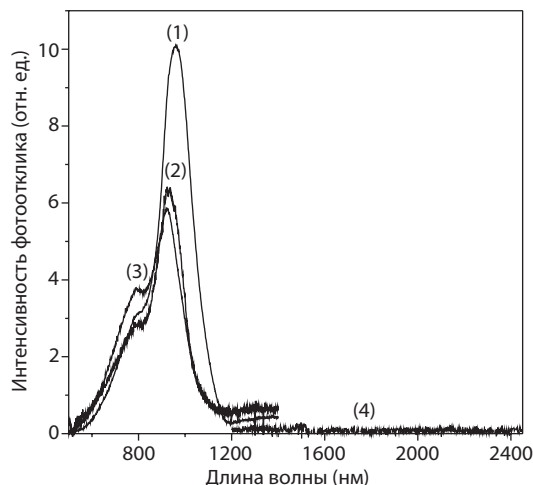


Рис. 5. Спектры фотоотклика при 300 К, снятые без ИК-светофильтра на имплантированных образцах после ИИО (1), ТО при 800 °С (2), ТО при 1000 °С (3) при обратном смещении 0.6 В. Также приведён спектр образца после ТО при 1000 °С, снятый с использованием ИК-светофильтра, пропускающего свет с 1200 нм (4).

(рис. 4в). Возможной причиной отсутствия сигнала в образце с ИИО может быть отсутствие фазы InAs за счёт образования твёрдого раствора Si:As (рис. 2в), а в случае образцов с ТО – остаточные дефекты в форме дислокаций и дислокационных петель [3, 4], являющиеся центрами безызлучательной рекомбинации фотогенерированных носителей. Однако для подтверждения этого факта требуются дополнительные измерения на ПЭМ для визуализации наночастиц и дефектов.

Заключение

Синтезированы и исследованы композитные слои Si с фазой узкозонного InAs, представляющие интерес для кремниевой оптоэлектроники. Синтез композитных слоёв осуществлён высокодозной ионной имплантацией с последующим стационарным термическим и импульсным ионным отжигом. Установлено, что импульсный отжиг способствует формированию твёрдого раствора Si:As толщиной свыше 1 мкм при вытеснении примеси In к поверхности. При термическом отжиге в печи образуются вторичные фазы InAs и In_2O_3 . Синтезированные слои

характеризуются высокой концентрацией носителей и интенсивной полосой поглощения при 3.6 мкм. Фотоотклик слоёв сравним по форме сигнала с фотооткликом Si-фотодиода, не показывая расширения свыше 1200 нм. Для понимания его механизмов и оптимизации режимов синтеза требуются дальнейшие эксперименты и измерения с привлечением методов ПЭМ и ИК-спектроскопии.

Благодарности

Авторы выражают благодарность И. М. Подлесных (ФИАН, Москва) за СЭМ и ИК-измерения и С. Г. Сиماкину (ЯрГУ, Ярославль) за ВИМС-измерения.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №24-29-00069).

Литература

- Интернет-ресурс 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)
- Комаров Ф.Ф., Мильчанин О.В., Пархоменко И.Н., Кучинский П.В., Альжанова А.Е., Моховиков М.А., Wendler E.: Инж.-физ. журн. **97**, № 3, 758–765 (2024)
- 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.: Журн. прикл. спектр. **91**, № 6, 804–812 (2024)
- Баталов Р.И., Марфин Е.А., Зайцев Д.Д.: Инж.-физ. журн., в печати (2026)
- Recht D., Smith M.J., Charnvanichborikarn S., Sullivan J.T., Winkler M.T., Mathews J., Warrender J.M., Buonassisi T., Williams J.S., Gradecak S., Aziz M.J.: J. Appl. Phys. **114**, Art. No. 124903 (2013)
- Глазов В.М., Земсков В.С.: Физико-химические основы легирования полупроводников: Москва: Наука, 1967. 372 с.
- Панков Ж.Ж.: Оптические процессы в полупроводниках: Пер. с англ. Москва: Мир, 1973. 456 с.
- Баталов Р.И., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Нургазизов Н.И., Бухараев А.А., Ивлев Г.Д., Степанов А.Л.: Опт. и спектр. **126**, № 2, 214–219 (2019)

ЭПР-исследования и особенности моделирования спектров от железосодержащих белков крови

М. И. Ибрагимова, А. И. Чушников, И. В. Яцык, Г. Г. Гумаров

Лаборатория радиационной физики и радиобиологии

В работе обсуждаются особенности ЭПР спектров белков крови, содержащих в своём составе ионы трёхвалентного железа в высокоспиновом состоянии ($S = 5/2$). Показаны возможности и особенности моделирования спектров, записанных в X-диапазоне в температурном интервале от 5 до 80 К, от трансферрина, метгемоглобина и каталазы эритроцитов.

EPR studies and modeling features of spectra from iron-containing blood proteins

M. I. Ibragimova, A. I. Chushnikov, I. V. Yatsyk, G. G. Gumarov

Laboratory of Radiation Physics and Radiobiology

This paper discusses the features of the EPR spectra of blood proteins containing ferric iron ions in the high-spin state ($S = 5/2$). The capabilities and features of modeling EPR spectra recorded in the X-band in the temperature range from 5 to 80 K for transferrin, methemoglobin, and erythrocyte catalase are demonstrated.

Введение

Использование различных методов и подходов, которые могут быть применены в медицине, является одной из важнейших задач современной физики. Одним из таких методов является электронный парамагнитный резонанс. Можно выделить следующие области медицины, где ЭПР служит “золотым стандартом”:

- исследование окислительного стресса. Окислительный стресс, вызванный избытком свободных радикалов, связан с более чем 100 заболеваниями, включая: атеросклероз и сердечно-сосудистые заболевания; нейродегенеративные заболевания (болезни Альцгеймера, Паркинсона); онкология; диабет;
- исследование роли оксида азота (NO) в различных физиологических и патологических процессах;
- изучение металлосодержащих ферментов и белков (гемоглобин, миоглобин, цитохром P450 и др.);
- радиационная биология и дозиметрия;
- мониторинг эффективности лекарств.

Вместе с тем, ключевым объектом медицинских исследований является кровь, циркулирующая по всему организму и быстро реагирующая на любые патологические изменения. Анализ крови – это доступный, информативный метод, позволяющий оценить работу органов, состояние иммунной системы и выявить заболевания на ранних стадиях.

Кровь состоит из жидкой части (плазмы – 55–60%) и взвешенных в ней форменных элементов (эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов – 40–45%). В ней содержатся сложные белки – металлопротеины, такие как трансферрин (Fe^{3+} -Tf), метгемоглобин (Fe^{3+} -MetHb), церулоплазмин (Cu^{2+} -Cp), фермент – каталаза эритроцитов (Fe^{3+} -гем), обладающие парамагнитными свойствами, и все они принимают непосредственное участие в обмене железа в организме.

В данной работе рассматриваются парамагнитные белки крови, содержащие в своём составе ионы трёхвалентного железа в высокоспиновом состоянии ($S = 5/2$). Показаны возможности и особенности моделирования линий поглощения ЭПР от Fe^{3+} -трансферрина, Fe^{3+} -метгемоглобина и Fe^{3+} -каталаза эритроцитов.

Результаты и обсуждения

На рис. 1 приведены типичные спектры ЭПР крови человека, записанные в X-диапазоне при 5 и 80 К.

Особенностью Tf, MetHb и каталазы эритроцитов является то, что все они содержат в своём составе ионы Fe^{3+} в высокоспиновом состоянии ($S = 5/2$). В X-диапазоне для спиновых состояний железа с $S = 5/2$ дипольные взаимодействия и сильная спин-орбитальная связь снимают вырождение в основном состоянии, приводящее к расщеплению сильно связанных дублетов Крамерса даже

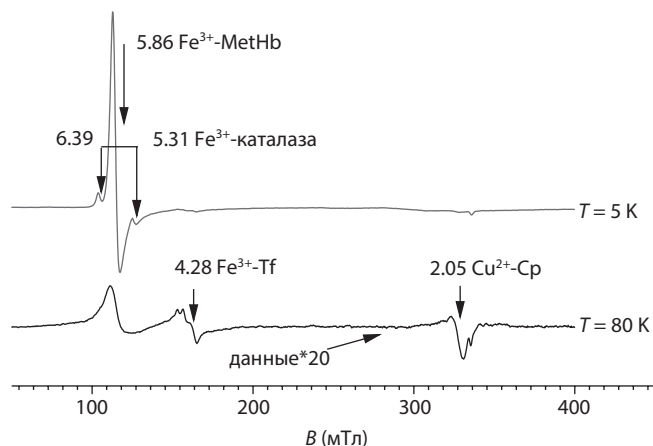


Рис. 1. Спектры ЭПР крови человека, записанные в X-диапазоне при 5 и 80 K.

в отсутствие внешнего магнитного поля, то есть имеет место расщепление в нулевом поле (ZFS).

Трансферрин – это железотранспортный белок плазмы крови. Из 4–5 г железа, содержащегося в организме, только около 3–4 мг железа (что составляет примерно 0.1% от общего количества) циркулирует в крови в комплексе с трансферрином. На рис. 2 показана структура Tf человека и координационное окружение иона железа. Как видно из рисунка, в трансферрине сформированы два гомологичных домена, в которых находятся участки с искажённой октаэдрической геометрией для обратимого связывания ионов железа в высокоспиновом состоянии ($S = 5/2$) [4]. Ион Fe^{3+} в Tf находится в октаэдрической “ловушке”, образованной 3 атомами кислорода от 3 тирозинов, одного атома азота от гистидина и двумя атомами кислорода от бикарбонат-аниона (см. рис. 2б). На частоте 9.38 ГГц при $T \leq 80$ K в спектре ЭПР от ионов железа в Tf регистрируются две линии поглощения с эффективными g-факторами ~ 4.28 и ~ 9.0 , обусловленными переходами внутри крамеровских дублетов. Характерный трёхкомпонентный сигнал ЭПР (двойной пик и плечо) вблизи $g' \sim 4.28$ с широкими хвостами приписывается переходам внутри среднего

крамеровского дублета $|\pm 3/2\rangle$ [3, 5, 6], а относительно слабая широкая линия с $g' \sim 9.0$ обусловлена переходам внутри дублетов с $|\pm 1/2\rangle$ и $|\pm 5/2\rangle$ [3].

В клинической медицинской практике для оценки концентрации железа используется рутинные биохимические методы, а именно, определение концентрации сывороточного железа (КСЖ) и общей железосвязывающей способности сыворотки (ОЖСС), поскольку считается, что всё железо входит в состав трансферрина. Однако это предположение не всегда справедливо, в частности, для образцов крови профессиональных спортсменов.

На рис. 3 представлены результаты исследований [7], иллюстрирующие соотношение между КСЖ, измеренной методом абсорбционной фотометрии, и концентрацией Fe^{3+} в ТФ, определённой из спектров ЭПР, в сыворотке крови профессиональных спортсменов (115 чел.) и волонтеров из группы контроля (16 чел.). Произвольно выбранная контрольная группа включала как больных (с различными диагнозами: железодефицитная анемия, гипертоническая болезнь, ишемическая болезнь сердца, цирроз печени), так и волонтеров – условно здоровых людей в возрасте от 20 до 80 лет. Спектры ЭПР записывали от одинакового объёма сыворотки крови на спектрометре “Varian E-12” ($\nu = 9.38$ ГГц, $W = 50$ мВт, $T = 77$ K) с одновременной регистрацией сигнала поглощения от эталонного образца (антрацита) с известными g-фактором и количеством парамагнитных центров. Поскольку ширина и форма линий в спектрах ЭПР практически не изменялись, количественный анализ спектров проводили по величине производной от линии поглощения, нормированной относительно сигнала от эталона (peak-to-peak).

Таким образом можно считать, что использование биохимических методов определения концентрации сывороточного железа в сочетании с методом ЭПР может найти применение в спорте высоких достижений, поскольку позволят сделать правильный выбор в назначении препаратов, корректирующих уровень железа в организме.

Несмотря на существование достаточного количества работ по исследованию предпочтительного распре-

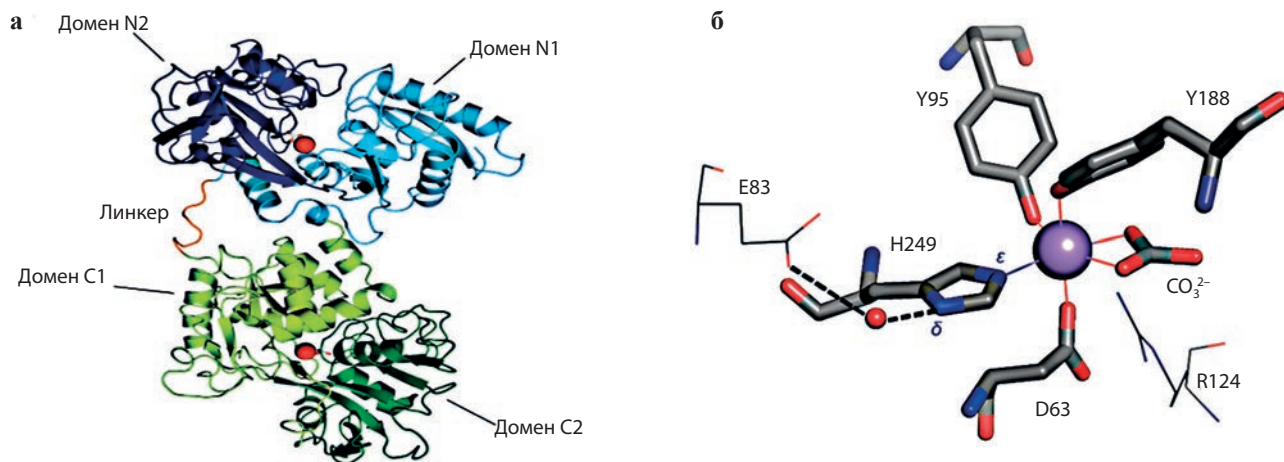


Рис. 2. а Структура трансферрина человека, демонстрирующая доменную организацию белка и выделяющую два иона железа [1, 2]; б координация железа в N-доле сывороточного трансферрина человека [3].

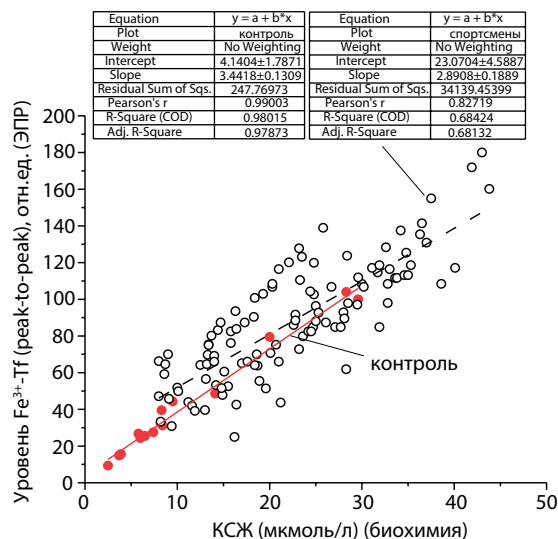


Рис. 3. Соотношение между КСЖ и концентрацией Fe^{3+} в Тф в сыворотке крови спортсменов и волонтеров из группы контроля. ● Группа контроля, ○ спортсмены.

ления ионов железа в N- и C-доменах трансферрина в организме человека *in vivo* (см., например обзор [1]), до сих пор не существует однозначного ответа на этот вопрос. Метод ЭПР позволяет исследовать спектры замороженной цельной крови/или её сыворотки, в котором присутствуют сигналы не только от ионов железа в Тф, но и от линии поглощения ионов Cu^{2+} в церулоплазмине. Одним из функций сывороточного Ср является то, что он, действуя как феррооксидаза, способствует окислению ионов Fe^{2+} (токсичен для организма) до Fe^{3+} .

В работе [8] нами была представлена методика моделирования спектров ЭПР сывороточного трансферрина, записанных в X-диапазоне при 80 К. Моделирование спектров основано на использовании метода “сетки ошибок” [3, 9] и аппроксимации распределения параметров расщепления нулевого поля (ZFS) двумя двумерными нормальными распределениями [8]. Результаты расчёта хорошо согласуются с экспериментом (рис. 4).

Спектры ЭПР записывали от образцов с одинаковым объёмом сыворотки крови на спектрометре “Bruker EMX Plus” ($\nu = 9.38$ ГГц, частота модуляции 100 кГц, амплитуда модуляции 5 Гс, $W = 20$ мВт, $T = 80$ К). Для описания спектров ЭПР высокоспинового железа Fe^{3+} ($S = 5/2$) использовали спиновый гамильтониан, включающий члены тонкой структуры до 4-го порядка (O_4^q – расширенный оператор Стивенса, где q изменяется от -4 до $+4$) [3]:

$$\mathcal{H} = \mu_B B_0 g S + \text{SDS} + \sum_q B_4^q O_4^q(S).$$

Тензор $\mathbf{D}$ симметричен и имеет нулевой след, поэтому три основных значения тензора $\mathbf{D}$ выражаются двумя параметрами – D и E . Предполагается, что $D = 3/2 D_z$ и $E = 1/2(D_x - D_y)$. D – параметр аксиальности системы, а E – параметр асимметрии или параметр ромбической деформации структуры. Для расчёта спектров ЭПР был

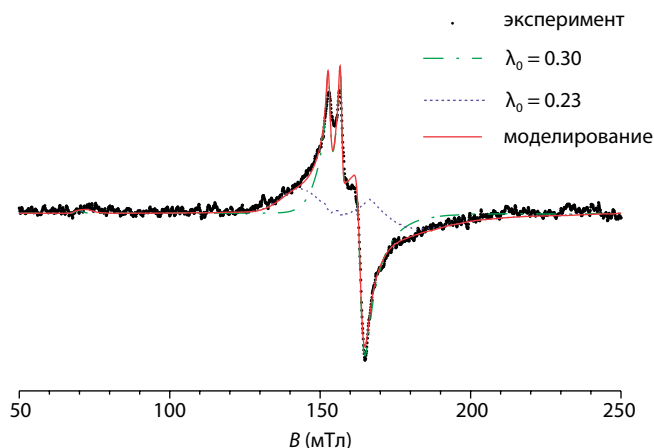


Рис. 4. Экспериментальный спектр ЭПР ионов Fe^{3+} в Тф, записанный в X-диапазоне при 80 К, и результат компьютерного моделирования в предположении нормального распределения параметров расщепления в нулевом поле.

использован программный пакет EasySpin, в частности, утилита “repper”, предназначенная для моделирования спектров ЭПР порошкообразных твёрдых образцов [10].

Особо следует подчеркнуть, что при компьютерном моделировании обязательно необходимо учитывать в гамильтониане член 4-го порядка $B_4^q O_4^q$, поскольку именно он позволяет описать двойной пик в спектре от высокоспинового железа в Тф [3].

На рис. 5 приведены распределения параметров ZFS в D - и E -представлении.

Как видно из рис. 5, для представленных спектров ЭПР распределение состоит из двух компонент с различными значениями параметра корреляции: $\rho \approx 1$ и ρ от 0 до -0.6 . Параметры ромбичности для первой компоненты составляли $E/D \approx 0.3 \pm 0.05$ и $E/D \approx 0.23 \pm 0.07$ – для второй. Первая компонента распределения ZFS, идентичная для спектров, характеризуется высокой степенью корреляции между параметрами E и D и приписывается нами железу, связанному с N-доменом железосодержащего участка человеческого сывороточного трансферрина. Вторую компоненту распределения ZFS мы связываем с железом, расположенным в C-домене железосодержащего участка Тф. Наблюдаемая высокая дисперсия коэффициента корреляции для второй компоненты обусловлена, по всей видимости, различным характером обмена железа в индивидуальном организме. Для выяснения причин такого различия в распределении параметров расщепления нулевого поля, полученных из спектров ЭПР человеческого сывороточного трансферрина, необходим дальнейший систематический анализ спектров ЭПР, а также использование методов квантовой химии и молекулярной динамики.

Гемоглобин. Около 70% всего железа в организме содержится в гемоглобине эритроцитов. Гемоглобин (Hb) относится к классу сложных белков. Молекула Hb это тетрамер, состоящий из двух пар попарно идентичных полипептидных цепей (см. рис. 6). В гидрофобном кармане в каждой из четырёх субъединиц локализована небелковая

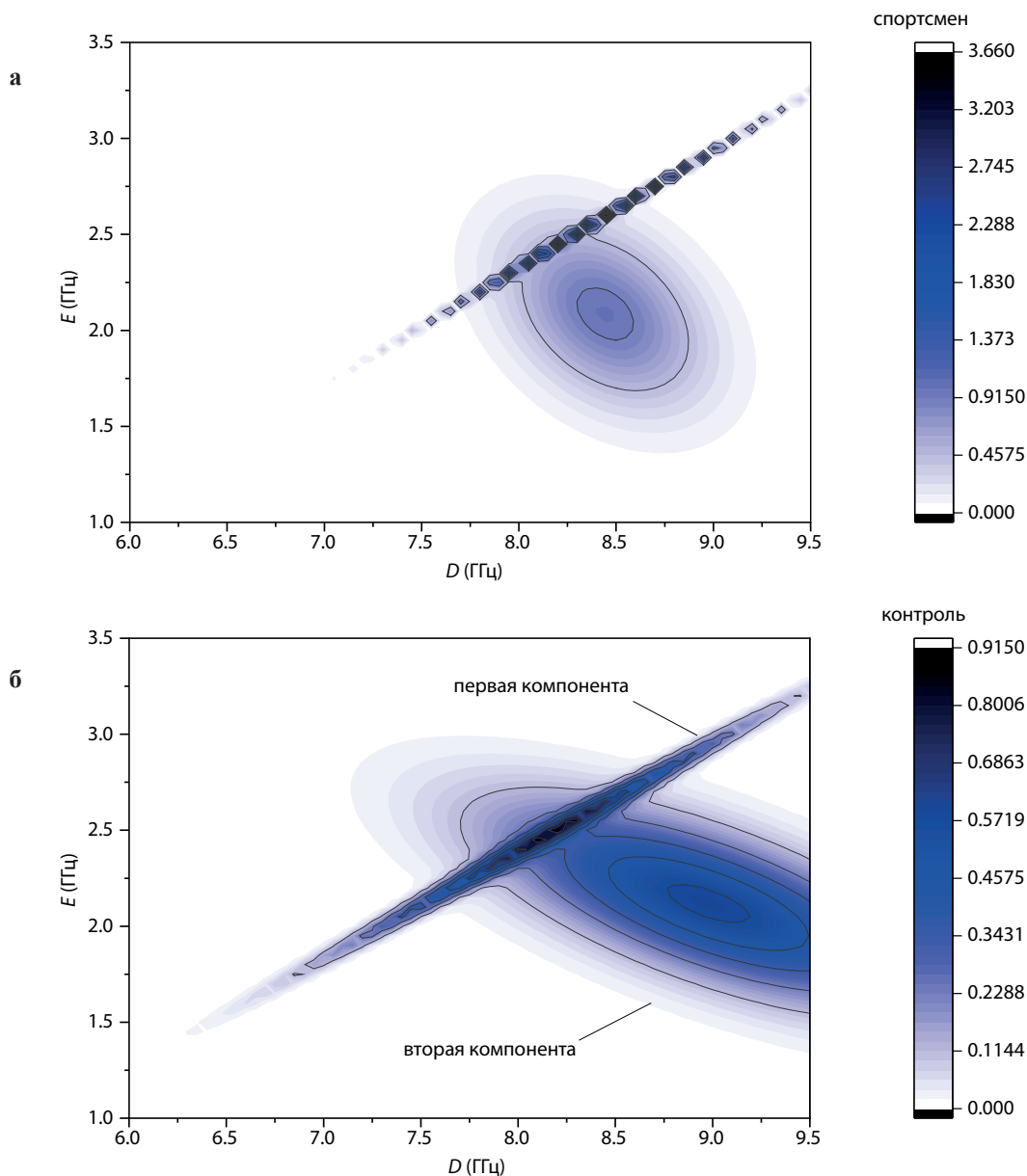


Рис. 5. Распределение параметров ZFS в D - и E -представлении, полученные при моделировании спектров ЭПР, записанных в X-диапазоне при 80 К: **а** – контроль, **б** – спортсмен.

часть молекулы Hb – гем b (известный как протогем IX – порфириновое кольцо с атомом двухвалентного железа в центре кольца). Fe^{2+} ($S = 2$ или $S = 0$) гема b связан с четырьмя атомами азота порфирина (образуют плоскость) и с атомом азота в имидазольном кольце гистидина (эта связь “подвешивает” гем внутри кармана и стабилизирует его). Шестая координационная позиция иона железа в геме свободна и обращена к внешней среде кармана. Именно эта координационная связь железа играет ключевую роль в многообразии фундаментальных свойств, лежащих в основе функции гемоглобина.

Для гемоглобина, основная функция которого – перенос атомов кислорода, в норме характерны состояния, когда шестая позиция Fe^{2+} ($3d^6$) либо свободна, либо занята кислородом. В состав дезоксигемоглобина (шестая

позиция железа свободна) входит высокоспиновое Fe^{2+} , содержащее четыре неспаренных электрона ($S = 2$), и он парамагнитен. Связывание кислорода с Hb вызывает не только координационное, но и спиновое превращение (spin crossover) иона Fe^{2+} , а именно, в оксигемоглобине ионы железа находятся в низкоспиновом состоянии ($S = 0$) и, поскольку все электроны спарены, то он диамагнитен.

Сигнал ЭПР от Fe^{2+} ($S = 2$) в дезоксигемоглобине в X-диапазоне очень слабый или не наблюдается, и причины этого следующие: i) большая ширина линии из-за коротких времена спин-решёточной (T_1) и спин-спиновой (T_2) релаксации; ii) большое расщепление в нулевом поле; поскольку координационная сфера железа в геме сильно несимметрична, то это создаёт большое электрическое поле низкой симметрии, приводящее к большой величине

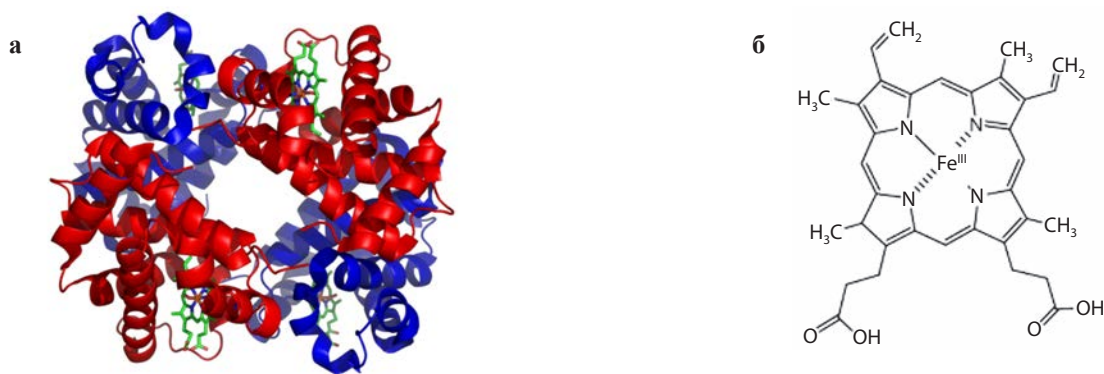


Рис. 6. а Структура гемоглобина, б структура порфирина.

параметра нулевого расщепления D (около $10\text{--}20\text{ см}^{-1}$, что соответствует $30\text{--}60\text{ ГГц}$); iii) анизотропия g -фактора, что также уширяет линии в порошковых образцах или в замороженных растворах; iv) влияние температуры, поскольку даже при низких температурах сигналы от Fe^{2+} остаются очень широкими.

Особенностью гема является то, что под действием ряда эндогенных и экзогенных факторов может происходить окисление иона Fe^{2+} ($3d^6$) до Fe^{3+} ($3d^5$). В зависимости от типа окислителя образуется метгемоглобин (MetHb) с ионами Fe^{3+} в различных спиновых состояниях: низкоспиновом ($S = 1/2$) или высокоспиновом ($S = 5/2$). Типичными лигандами, приводящими к образованию низкоспинового MetHb, являются цианид-анионы (CN^-), азид-анион (N_3^-), имидазол [11–14]. У таких соединений спектр ЭПР имеет анизотропный g -фактор, который зависит от симметрии поля лигандов. В X -диапазоне сигнал ЭПР имеет $g_1 \approx 2.8\text{--}3.0$ (перпендикулярно плоскости гема); $g_2 \approx 2.2\text{--}2.3$ (в плоскости гема); $g_3 \approx 1.5\text{--}1.7$ (в плоскости гема, второе направление). Гидроксид-анионы (OH^-), ионы F^- , хлораты (анионы ClO_3^-), нитриты (NO_2^-), ряд лекарственных препаратов (например, бисептол, нитроглицерин, лидокаин, бензокаин) приводят к образованию высокоспинового MetHb. Из-за большого расщепления в нулевом поле и $E/D \approx 0$ сигнал ЭПР в X -диапазоне наблюдается при $g \approx 6$ (для $\Delta m_s = \pm 1$) и $g \approx 2$ (для $\Delta m_s = \pm 2$) (см., например [14–17]). К эндогенным факторам, приводящим к окислению иона Fe^{2+} до Fe^{3+} в геме, относят, прежде всего, спонтанное автоокисление гема, действие активных форм кислорода, окислительный стресс.

В крови человека метгемоглобин обычно присутствует в небольших количествах (до $1\text{--}2\%$). Поскольку железо в MetHb находится в окисленном состоянии (Fe^{3+} вместо Fe^{2+}), эта форма гемоглобина не способна транспортировать кислород. Повышение концентрации MetHb до уровня более 10% приводит к метгемоглобинемии – состоянию, при котором нарушается транспорт кислорода к тканям.

Каталаза эритроцитов. Ещё одним парамагнитным центром в крови является каталаза эритроцитов. Каталаза, как и Hb, представляет собой тетрамер, состоящий из четырёх идентичных полипептидных цепей, каждая из

которых содержит порфириновое кольцо с трёхвалентным высокоспиновым атомом железа ($S = 5/2$) в центре гемового кольца. В отличие от гемоглобина, у каталазы пятый лиганд железа – тирозинатный остаток. Связь $\text{Fe}\text{--}\text{O}\text{--}\text{Tyr}$ очень сильная и играет решающую роль в катализе. Кроме того, 6-я позиция железа свободна или занята молекулой воды. В отличие от MetHb, у каталазы нет прочно связанной воды или гидроксид-иона. Это шестое положение иона железа является “входными воротами” для перекиси водорода. Основной функцией этого фермента является каталитическое расщепление перекиси водорода (H_2O_2) на воду и кислород ($\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$). H_2O_2 относится к реактивным формам кислорода, играющим важную роль в окислительных процессах в организме. Одним из показателей состояния антиоксидантной защиты организма является активность каталазы в эритроцитах. Следует отметить, что в литературе относительно мало исследований этого парамагнитного фермента методом ЭПР (см., например, [16–19]). Сигнал ЭПР от ионов Fe^{3+} в каталазе эритроцитов в X -диапазоне имеет анизотропный g -фактор с $g_1 \approx 6.39$, $g_2 \approx 5.31$; $g_3 \approx 2.0$ [17].

На рис. 7 приведены спектры ЭПР крови в области g -факторов от 3 до 8, записанные в температурном интервале от 5 до 80 К . Как видно из рисунка, температурные зависимости сигналов от высокоспиновых ионов Fe^{3+} в Tf ($g' \sim 4.28$), в MetHb ($g' \sim 5.86$), а также сигнал гемового железа каталазы эритроцитов ($g' \sim 5.31$ и 6.39) существенно различаются. Во-первых, спектр ЭПР от ионов железа в Tf незначительно изменяется во всём рассматриваемом температурном диапазоне. В тоже время интенсивность сигнала от гемового железа в MetHb резко снижается с повышением температуры. Во-вторых, сигнал от гемового железа в каталазе эритроцитов отчётливо виден только при температурах ниже 40 К . Это различие в температурной зависимости железосодержащих компонентов крови позволяет выделить вклад каждого компонента. В частности, при 5 К интенсивность сигнала от гемового железа в MetHb во много раз превышает интенсивность линии поглощения от Fe^{3+} в Tf, что позволяет нам пренебречь сигналом от ионов железа в трансферрине при моделировании спек-

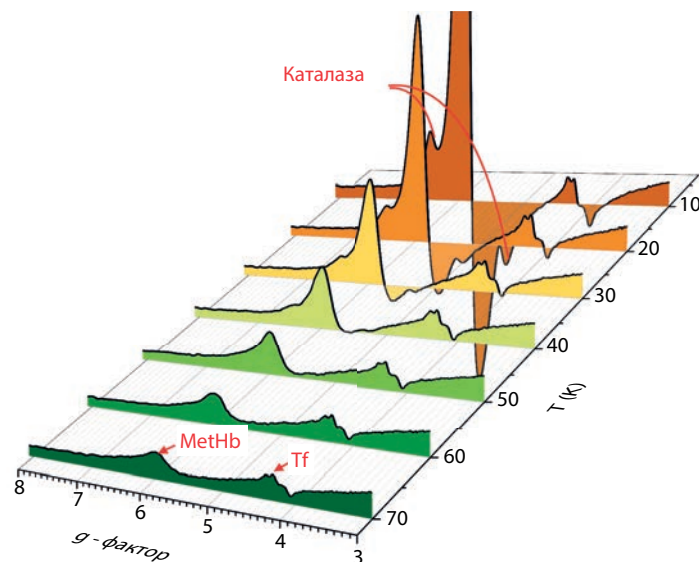


Рис. 7. Спектры ЭПР крови человека, записанные в X-диапазоне при температурах от 10 К до 70 К (часть с g-факторами от 3 до 8). Зарегистрированы сигналы от ионов Fe^{3+} в Tf, в MetHb и в каталазе эритроцитов.

тров. Все эти факторы дают возможность описать вклад гемового железа в каталазе эритроцитов.

Для описания спектров ЭПР от высокоспинового железа Fe^{3+} ($S = 5/2$) в MetHb и каталазе эритроцитах был использован спиновый гамильтониан:

$$\mathcal{H} = \mu_B \mathbf{H}_0 \mathbf{g} \mathbf{S} + \mathbf{S} \mathbf{D} \mathbf{S}.$$

В X-диапазоне для Fe^{3+} в геме с $E/D \approx 0$ реализуется предел слабого поля $\mu_B \mathbf{H}_0 \mathbf{g} \mathbf{S} \ll \mathbf{S} \mathbf{D} \mathbf{S}$.

Результат моделирования экспериментального спектра ЭПР от высокоспиновых железосодержащих гемов показан на рис. 8.

Рассчитанный спектр является суммой сигналов от двух независимых высокоспиновых ионов железа в гемах MetHb и каталазы.

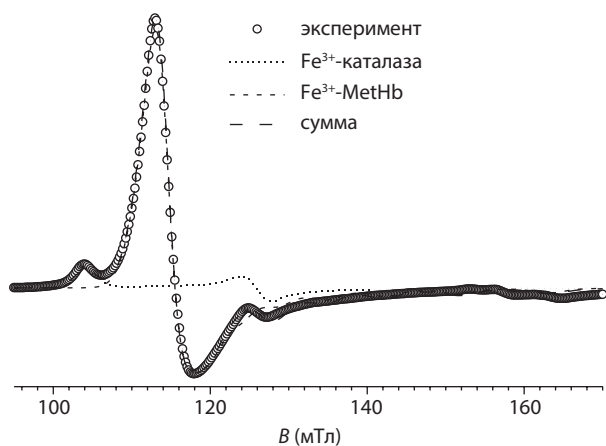


Рис. 8. Результат моделирования спектров ЭПР в X-диапазоне от высокоспиновых железосодержащих гемов в крови человека (записаны при 5 К).

Линия поглощения от Fe^{3+} -гема в каталазе эритроцитов в области $g \approx 6$ – это дублет со значениями расщепления $D = 15770 \pm 250$ МГц и $E = 362 \pm 8$ МГц, определёнными при подгонке. Относительно небольшое, но значимое для этого белка, значение E приводит к расщеплению сигнала. Согласно работам [18, 19], эффективные значения g-факторов для трёхвалентного железа в геме каталазы эритроцитов могут быть оценены, исходя из параметров ZFS (E и D):

$$g_{xy} = 6 \pm 24E/D,$$

$$g_z = 2 - 34(E/D)^2.$$

Полученные в процессе моделирования параметры E и D для Fe^{3+} в каталазе хорошо согласуются с этими значениями эффективного g-фактора.

Спектр от гемового железа в MetHb, как показали расчёты, может быть описан только с учётом анизотропного уширения линии, а именно D_{Strain} [10]. Использование этого параметра, введённого в программный пакет EasySpin, позволяет точно описать характерную асимметрию экспериментальной линии от Fe^{3+} -MetHb. Расчёт даёт значения $D = 14920 \pm 50$ МГц и $E = 70 \pm 2$ МГц для трёхвалентного иона железа в MetHb при температурах ниже 40 К и $D_{\text{Strain}} = 1570 \pm 1160$ МГц и $E_{\text{Strain}} = 149 \pm 4$ МГц. Последние параметры сильно антикоррелированы: $\rho = -0.96$.

Параметры D и E определены с очень высокой точностью (небольшие погрешности ± 50 МГц и ± 2 МГц соответственно). Это означает, что модель спинового гамильтониана адекватно описывает систему в целом.

Большое значение параметра аксиальности ($D = 14920 \pm 50$ МГц) в MetHb по сравнению с параметром ромбической асимметрии ($E = 70 \pm 2$ МГц) является классическим признаком сильной аксиальной анизотро-

пии спинового гамильтониана. Такое низкое значение параметра E характерно для гемовых систем, где железо обладает почти идеальной аксиальной симметрией.

Тот факт, что спектр от MetHb невозможно описать без параметра D_{Strain} , указывает на несовершенство и неоднородность системы. Для разных молекул MetHb параметры D и E не являются строго фиксированными, а слегка “размыты” вокруг своих средних значений. Параметр D_{Strain} (уширение D) количественно характеризует эту неоднородность. Его значение (1570 ± 1160 МГц) указывает на степень разброса параметра D между различными молекулами гема в образце. Это уширение может быть вызвано небольшими изменениями в локальном окружении ионов железа в геме (например, конформация белка, взаимодействие с соседними аминокислотами, гидратация), которые слегка искажают кристаллическое поле вокруг иона железа. Более того, коэффициент корреляции $\rho = -0.96$ между D_{Strain} и E_{Strain} чрезвычайно высок (близок к 1). Изменение одного параметра может быть почти полностью компенсировано изменением другого, однако качество подгонки остаётся практически тем же. Из-за сильной антикорреляции отдельные значения D_{Strain} (1570 ± 1160 МГц) и E_{Strain} (149 ± 4 МГц) нельзя считать полностью достоверными.

Таким образом, компьютерное моделирование спектров ЭПР от трехвалентного железа в метгемоглобине и каталазе эритроцитов с учётом D_{Strain} позволяет удовлетворительно описать экспериментальные кривые во всём исследованном температурном диапазоне. Следует особо отметить, что при температурах выше 40 К линия поглощения от каталазы эритроцитов не разрешается.

Выводы

Использование современных возможностей компьютерного моделирования спектров ЭПР, записанных в X-диапазоне в температурном интервале от 5 до 80 К, от

белков крови, содержащих в своём составе ионы железа в высокоспиновом состоянии ($S = 5/2$), позволяет выявлять особенности в функционировании этих парамагнитных белков, как в норме, так и при различных патологиях.

Литература

1. Silva A.M.N., Moniz T., Castro B., Rangel M.: *Coord. Chem. Rev.* **449**, 214186–21204 (2021)
2. Noinaj N., Easley N.C., Oke M., Mizuno N., Gumbart J., Boura E., Steere A.N., Zak O., Aisen P., Tajkhorshid E., Evans R.W., Gorringer A.R., Mason A.B., Steven A.C., Buchanan S.K.: *Nature* **483** (7387), 53–58 (2012)
3. Azarkh M., Gast P., Mason A.B., Groenen E.J., Mathies G.: *Phys. Chem. Chem. Phys.* **21**, 16937–16948 (2019)
4. Wally J., Halbrooks P.J., Vonnheim C., Rould M.A., Everse S.J., Mason A.B., Buchanan S.K.: *J. Biol. Chem.* **281**, 24934–24944 (2006)
5. Yang A.S., Gaffney B.J.: *Biophys. J.* **51**, 55–67 (1987)
6. Grady J.K., Mason A.B., Woodworth R.C., Chasteen N.D.: *Biochem. J.* **309**, 403–410 (1995)
7. Ibragimova M.I., Chushnikov A.I., Cherepnev G.V., Petukhov V.Yu.: *BioNanoScience* **9**, 1–6 (2019)
8. Ibragimova M.I., Chushnikov A.I., Yatsyk I.V., Gumarov G.G.: *Magn. Res. Sol. Elec. J. (MRSej)* **27**, 25202 (2025)
9. Azarkh M., Groenen E.J.: *Magn. Reson.* **255**, 106–113 (2015)
10. Stoll S., Schweiger A.J.: *Magn. Reson.* **178**, 42–55 (2006)
11. Hori H., Fujii M., Shiro Y., Iizuka T., Adachi S., Morishima I.: *J. Biol. Chem.* **264**, 5715–5719 (1989)
12. Svistunenko D.A., Sharpe M.A., Nicholls P., Blenkinsop C., Davies N.A., Dunne J., Wilson M.T., Cooper C.E.: *Biochem. J.* **351**, 595–605 (2000)
13. Ибрагимова М.И., Чушников А.И., Петухов В.Ю., Жеглов Е.П.: *Клиническая физиология кровообращения* № 3, 51–54 (2008)
14. Yonetani T., Iizuka T., Waterman M.R.: *J. Biol. Chem.* **246**, 7683–7689 (1971)
15. Peisach J., Blumberg W.E., Wittenberg B.A., Wittenberg J.B., Kampa L.: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **63**, 934–939 (1969)
16. Peisach J., Blumberg W.E., Ogawa S., Rachmilewitz E.A., Oltzik R.J.: *Biol. Chem.* **246**, 3342–3355 (1971)
17. Svistunenko D.A.: *J. Biomed Res.* **35**, 294–300 (2021)
18. Williams-Smith D.L., Morrison P.J.: *Biochim. Biophys. Acta* **405**, 253–261 (1975)
19. Torii K., Ogura Y.J.: *Biol. Chem.* **64**, 171–179 (1968)

Бабочка и усиление фотонного эха в импульсном магнитном поле в кристаллах $\text{Y}(\text{Lu})\text{F}_4:\text{Er}^{3+}$

А. М. Шегада, О. А. Морозов

Лаборатория нелинейной оптики

В работе рассматривается влияние импульсов магнитного поля наносекундной длительности на сигнал фотонного эха в образцах YLiF_4 и LuLiF_4 , активированных ионами Er^{3+} . Обнаружена сильная зависимость интенсивности фотонного эха от параметров магнитного импульса и направления изменения внешнего магнитного поля $\mathbf{H}$. При включении магнитных импульсов интенсивность эха может усиливаться в 5–6 раз.

Butterfly and photon echo amplification in a pulsed magnetic field in $\text{Y}(\text{Lu})\text{F}_4:\text{Er}^{3+}$ crystals

A. M. Shegeda, O. A. Morozov

Laboratory of nonlinear optics

The paper examines the influence of nanosecond magnetic field pulses on the photon echo signal in YLiF_4 and LuLiF_4 samples activated by Er^{3+} ions. A strong dependence of the photon echo intensity on the magnetic pulse parameters and the direction of change of the external magnetic field $\mathbf{H}$ was found. When magnetic pulses are applied, the echo intensity can increase by a factor of 5–6.

Введение

Диэлектрические кристаллы с примесями редкоземельных ионов активно используются для создания устройств оптических квантовых процессоров, элементов памяти, повторителей. Поэтому важно понимать и предсказывать поведение таких кристаллов в постоянных и импульсных магнитных и электрических полях. Примером влияния магнитного поля на оптические свойства материала является эффект Фарадея. При наложении внешнего магнитного поля происходит поворот плоскости поляризации линейно поляризованного света, распространяющегося через среду, а знак угла поворота зависит от направления распространения света относительно направления поля. В настоящее время повышенное внимание привлекают необычные явления при распространении света в магнитоэлектрических средах [1–5]. В недавней работе [6] в монокристаллах LuLiF_4 и YLiF_4 с ионами эрбия разной концентрации изучалась зависимость интенсивности фотонного эха (ФЭ) от напряжённости, направления и знака изменения (увеличение–уменьшение) внешнего постоянного магнитного поля $\mathbf{H}$. Впервые в диэлектрических кристаллах был обнаружен гистерезис в интенсивности ФЭ, критически зависящий от ориентации кристаллов в магнитном поле. Качественно результаты не зависели от поляризации лазерных импульсов и, в пределах экспериментальной погрешности, поворота поляризации

в сигнале ФЭ не было. Результаты связывались с проявлением в образцах магнитоэлектрических свойств. В работе [7] наблюдался эффект магнитоэлектрической невязимости в субмиллиметровой ЭПР-спектроскопии YLiF_4 , легированного ионами $^{166}\text{Er}^{3+}$, где изменение интенсивности сигналов электронного парамагнитного резонанса при переключении направления магнитного поля на обратное объяснялось интерференцией магнитных и электрических дипольных переходов.

В настоящей работе изучалась зависимость интенсивности ФЭ в диэлектрических монокристаллах LuLiF_4 и YLiF_4 , активированных ионами эрбия разной концентрации, от напряжённости, направления и знака изменения (увеличение–уменьшение) внешнего постоянного магнитного поля $\mathbf{H}$ при включении слабого импульсного магнитного поля наносекундной длительности. Обнаружено, что при включении магнитных импульсов (МИ) возникают эффекты необратимости (гистерезис, невязимость), а интенсивность ФЭ при одном и том же значении внешнего магнитного поля может меняться в 20–30 раз.

Эксперимент

Кристаллическая решётка $\text{Y}(\text{Lu})\text{LiF}_4$ характеризуется пространственной группой симметрии $I4_{1/a}(88)$, т.е. исходная пространственная решётка является центросимметричной.

Однако, как указано в работе [7], используемый для выращивания монокристаллов метод Бриджмена-Стокбаргера с градиентным распределением температуры вдоль оси a может приводить к нарушению центра инверсии в этих кристаллах, и позиции ионов Y^{3+} в элементарной ячейке замещаются ионами Er^{3+} не равномерно. В этом случае возможно проявление и наблюдение невзаимности как в оптическом диапазоне методом фотонного эха [6], так и в микроволновой области [7]. В наших экспериментах перед фотоумножителем не было никаких поляризационных фильтров, поэтому результаты никак не связаны с эффектом Фарадея. Образцы вклеивались в соленоид, состоящий из двух одинаковых катушек из нескольких витков медного провода диаметром 0.2 мм. Ось соленоида была перпендикулярна оси c кристалла. Между катушками соленоида был зазор примерно 1.5 мм, в который можно было вводить лазерные импульсы. Это позволяло проводить измерения при разных ориентациях импульсного магнитного поля $\mathbf{h}$ относительно лазерного импульса $\mathbf{k}$ ($\mathbf{h} \parallel \mathbf{k}$ и $\mathbf{h} \perp \mathbf{k}$) с сохранением условий $\mathbf{h} \perp \mathbf{H} \parallel \mathbf{c} \perp \mathbf{k}$. Обращённое двухимпульсное ФЭ наблюдалось при температуре 2 К на длине волны 653.05 нм для образцов $YLiF_4:Er^{3+}$ и 653.28 нм для $LuLiF_4:Er^{3+}$ (переход $^4I_{15/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$). Длительностью лазерных импульсов $\tau = 12$ нс, частота генерации 12.5 Гц, задержка t_{12} между лазерными импульсами менялась в пределах 33–60 нс. Последовательно с соленоидом включался резистор сопротивлением 100 Ом. На эту цепочку подавались импульсы отрицательной полярности амплитудой до 200 В, формируемые генератором на лавинных транзисторах. Длительность τ_h магнитных импульсов менялась в пределах 20–80 нс. Задержка между лазерными и МИ могла меняться с шагом 1 нс. МИ включались в промежутке времени между первым лазерным импульсом и сигналом эха.

Ранее в работе [6] в отсутствие МИ наблюдался гистерезис в зависимости интенсивности ФЭ при обращении направления магнитного поля на обратное, а также от направления сканирования магнитного поля $\mathbf{H}$. При нарушении условия $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$ уже при угле между осью c и полем $\mathbf{H}$ менее одного градуса возникал заметный гистерезис-бабочка. В данной работе образец в криостате ориентировался так, чтобы при $h = 0$ полностью отсутствовал гистерезис в зависимости интенсивности ФЭ от направления изменения внешнего магнитного поля $\mathbf{H}$. Это гарантировало точное соблюдение условия $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$. Импульсное магнитное поле в соленоиде рассчитывалось с использованием пакета программ MATLAB.

Электронной конфигурацией ионов Er^{3+} является $^4F_{11}$. Нижние кристаллические уровни основного $^4I_{15/2}(I)$ и возбуждённого $^4F_{9/2}(I)$ мультиплетов двукратно вырождены по спиновому числу. В магнитном поле $\mathbf{H}$, параллельном оси c наших кристаллов, для π -поляризации лазерного импульса разрешены переходы без изменения знака спина, а для σ -поляризации – с изменением знака спина. В нашем случае спектральная ширина лазерного импульса 0.015 нм превышает сдвиг резонансной частоты оптического перехода $^4I_{15/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$ для Er^{3+} в магнитном поле

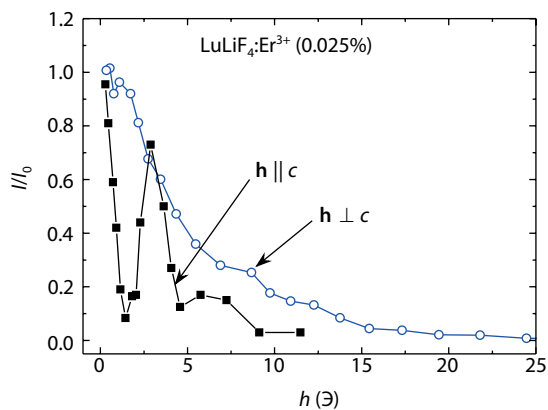


Рис. 1. Изменение относительной интенсивности ФЭ при $H = 0$ в зависимости от амплитуды импульсного магнитного поля h длительностью $\tau_h = 30$ нс, направленного параллельно оси c (чёрные квадраты) и перпендикулярно оси c . МИ включён после первого лазерного импульса. Задержка $t_{12} = 60$ нс.

$H < 1$ кЭ. Поэтому для каждой поляризации разрешены два перехода с разной частотой. В этом случае, если магнитный импульс, параллельный оси c , амплитудой h и длительностью τ_h действует в промежутках времени между первым и вторым лазерными импульсами или между вторым импульсом и сигналом эха, каждая группа диполей, вносящих вклад в поляризацию среды, в зависимости от частоты ν , за время τ_h действия магнитного импульса приобретает дополнительную фазу, и в сигнале ФЭ возникают осцилляции интенсивности, зависящие от площади МИ. По периоду этих осцилляций можно легко определить величину $g'_\parallel$ -фактора возбуждённого состояния [8, 9].

Если импульсное магнитное поле в этих образцах направлено перпендикулярно оси c , изменение амплитуды h не приводит к осцилляциям интенсивности ФЭ (см. рис. 1). Дело в том, что, несмотря на значительную величину g -фактора в основном состоянии ($g_\perp = 8.105$ для $YLiF_4:Er^{3+}$ [10] и $g_\perp = 8.138$ для $LuLiF_4:Er^{3+}$ [11]), значение $g'_\perp$ для возбуждённого состояния в $YLiF_4:Er^{3+}$ близко к нулю, и даже в поле $H_\perp = 29.5$ кЭ его не удаётся точно измерить [12].

Все измерения проводились следующим образом. В каждой точке магнитного поля H последовательно измерялась I_0 – интенсивность эха без МИ и интенсивность эха I с включёнными МИ. Затем с заданным шагом и направлением менялась величина H . Эксперименты показали, что при включении МИ и выполнении условий $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c} \perp \mathbf{k}$, есть принципиальная разница в действии этих импульсов на ФЭ в случаях, когда $\mathbf{h} \parallel \mathbf{k}$ (горизонтальные импульсы) и $\mathbf{h} \perp \mathbf{k}$ (вертикальные импульсы).

1. $\mathbf{h} \perp \mathbf{k}$. МИ направлены перпендикулярно плоскости, в которой лежат вектора $\mathbf{H}$ и $\mathbf{k}$.

При точном соблюдении условия $\mathbf{h} \perp \mathbf{H}$ наблюдается симметричная относительно $H = 0$ зависимость I/I_0 , показанная на рис. 2а. В этой зависимости полностью отсутствует гистерезис и нет никаких проявлений невзаимности. Нарушение симметрии происходит только тогда, когда между

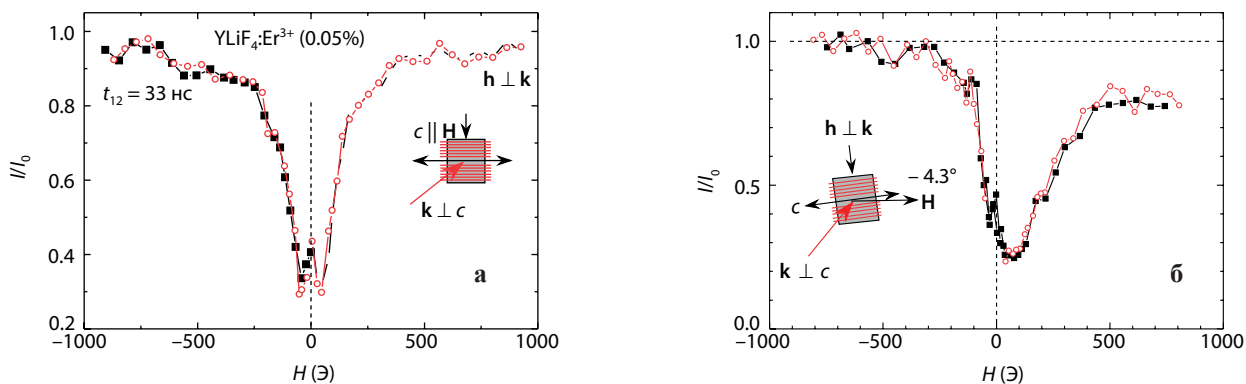


Рис. 2. Относительное изменение интенсивности I/I_0 в образце $\text{YLiF}_4:\text{Er}^{3+}$ при включении МИ длительностью $\tau_h = 22$ нс, амплитудой $h = 9.8$ Э. **а** $c \parallel \mathbf{H}$; **б** образец с соленоидом повернут против часовой стрелки вокруг волнового вектора $\mathbf{k}$ на угол 4.3° .

направлением импульсного магнитного поля и внешним полем $\mathbf{H}$ есть небольшой угол (рис. 2б). При изменении знака угла поворота, а также при изменении полярности МИ, происходит зеркальный поворот асимметрии относительно $H = 0$. На рис. 2а и б квадратами показаны значения I/I_0 , полученные при увеличении напряжённости поля от $H = 0$ до $H = \pm 1$ кЭ, а кружками – при уменьшении поля от $H = \pm 1$ кЭ до нуля.

Причина возникновения такой сильной асимметрии неочевидна, поскольку при амплитуде h , указанной на рисунке, составляющая импульсного магнитного поля, направленная вдоль внешнего поля $\mathbf{H}$, не превышает ± 0.8 Э и не может напрямую приводить к такой асимметрии [13].

2. $\mathbf{h} \parallel \mathbf{k}$. Все вектора лежат в горизонтальной плоскости. При $H = 0$ зависимость I/I_0 от амплитуды МИ показана на рис. 1 для ориентации $\mathbf{h} \parallel \mathbf{c}$. Однако, если $H \neq 0$, поведение I/I_0 существенно меняется в зависимости от длительности, условий включения МИ, величины, полярности и направления сканирования внешнего магнитного поля $\mathbf{H}$ [14].

На рис. 3 показано действие МИ, включённых в промежутке времени между первым лазерным импульсом и сигналом эха. Мы видим возникновение гистерезиса-бабочки при включении МИ. Зависимость I/I_0 , полученная при изменении поля от -900 до $+900$ Э зеркально сим-

метрична относительно $H = 0$, но сильно отличается от I/I_0 , полученной при изменении поля от $+900$ до -900 Э. Измерения показывают, что при повороте соленоида с образцом вокруг вертикальной оси на 180° зависимости на рис. 3 меняются местами, т.е. кривая, полученная при изменении поля от -900 до $+900$ Э совпадает, (в пределах погрешности измерений) с кривой, полученной при изменении H от $+900$ до -900 Э, и наоборот. В работе [6] гистерезис-бабочка наблюдается только при нарушении условия $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$, причём зависимости I/I_0 , полученные при изменении поля от $+900$ до -900 Э (или наоборот) не являются зеркально симметричными относительно $H = 0$. Следует отметить, что при повороте образца с соленоидом вокруг вертикальной оси на 180° меняется только ориентация от параллельной до антипараллельной между векторами $\mathbf{k}$ и $\mathbf{h}$.

Дальнейшие измерения показали, что вместо двух импульсов можно с таким же успехом включить один длинный импульс в промежутке времени между первым лазерным импульсом и сигналом эха (см. рис. 4). На рис. 4б мы видим, что при $h = 12.7$ Э и $\tau_h = 80$ нс в эхо в максимуме возрастает более, чем в пять раз. Однако линейной зависимости усиления сигнала ФЭ от площади МИ нет, при $h\tau_h > 10^3$ Э·нс интенсивность сигнала эха начинает уменьшаться.

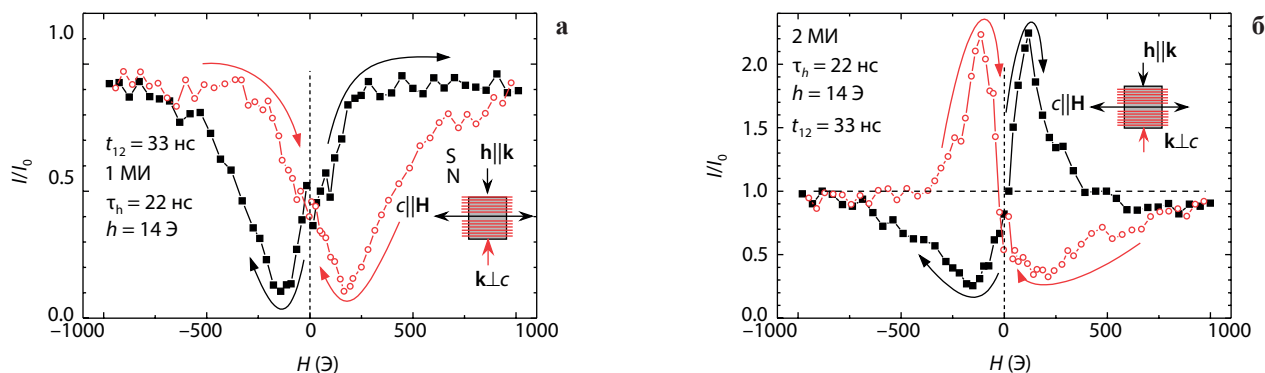


Рис. 3. Зависимость I/I_0 в образце $\text{YLiF}_4:\text{Er}^{3+}$ (0.025 %) от магнитного поля H . **а** включён один МИ, **б** включены два МИ мплитудой $h = 19.4$ Э и длительностью $\tau_h = 22$ нс. Время задержки $t_{12} = 33$ нс.

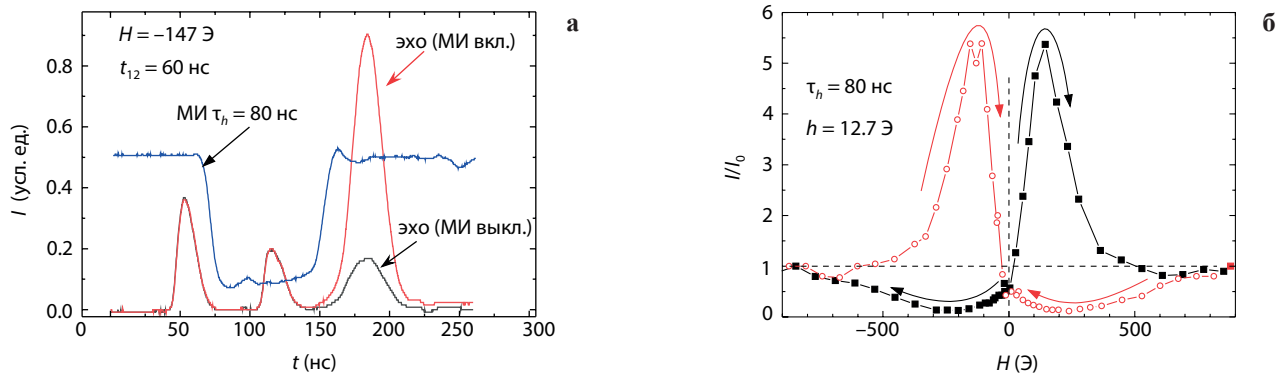


Рис. 4. а Осциллограммы наблюдаемых сигналов в образце $\text{LuLiF}_4:\text{Er}^{3+}$ (0.025 %) при $H = -147$ Э и положении МИ относительно лазерных импульсов; б зависимость I/I_0 от магнитного поля H при включении одного МИ амплитудой 12.7 Э и длительностью 80 нс. Время задержки $t_{12} = 60$ нс.

Все зависимости I/I_0 , показанные на рис. 3 и 4, носят общий характер. Кривые, полученные при изменении внешнего поля от ± 1 кЭ до $H = 0$ являются “устойчивыми”, т.е. при неизменной полярности H будут повторяться при любом направлении сканирования магнитного поля. Напротив, зависимости I/I_0 , полученные при изменении внешнего поля от $H = 0$ до ± 1 кЭ, будут повторяться только в том случае, если величина H не превышает некоторого значения $\pm H^*$, после которого при возврате

к $H = 0$ зависимость I/I_0 изменится. Рассмотрим вначале случай, когда “неустойчивым” является верхнее крыло бабочки. Это соответствует правой половине зависимостей I/I_0 на рис. 3б ($0 < H < 1$ кЭ).

Детальное поведение I/I_0 показано на рис. 5. В этих измерениях предварительно устанавливалось поле $H = \pm 1$ кЭ, которое затем сбрасывалось до нуля. На рис. 5 “устойчивой” является нижняя кривая I/I_0 (красные квадраты), полученная при изменении H от $+1$ кЭ до нуля. Как и в [6],

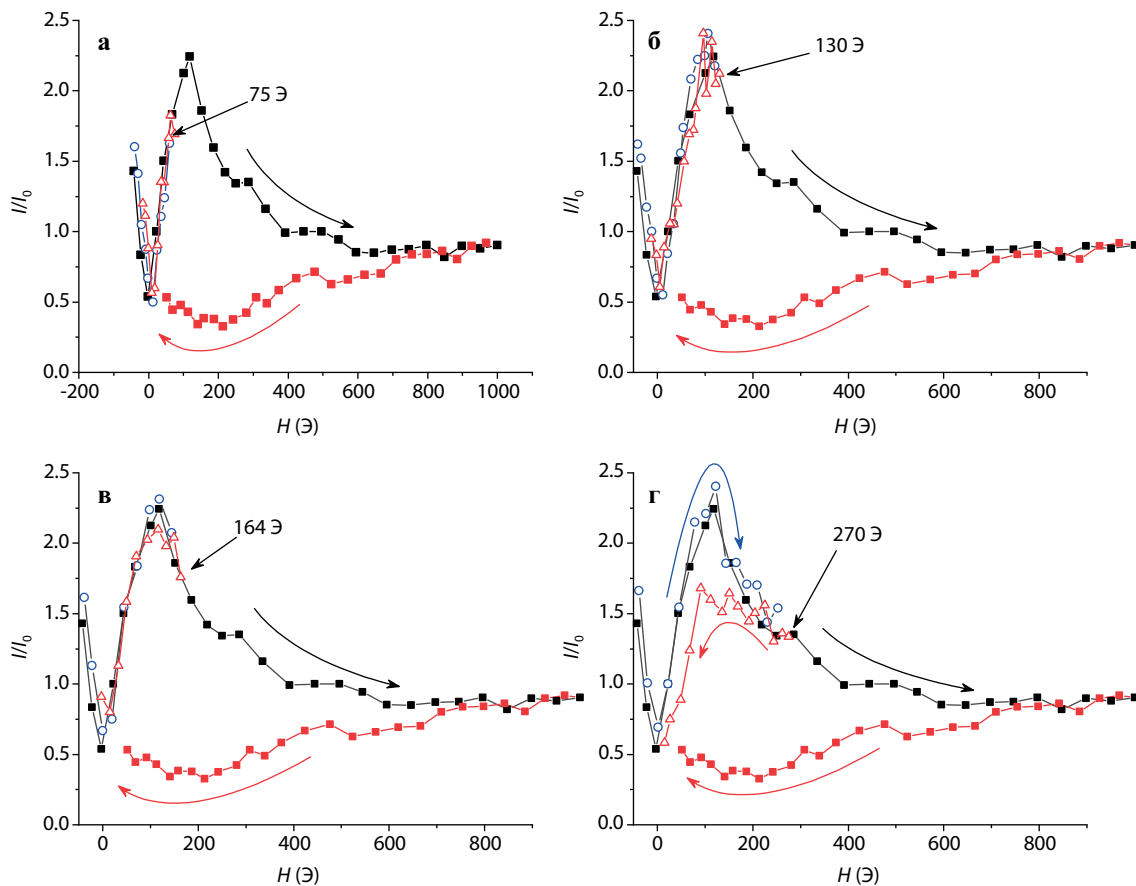


Рис. 5. Зависимость I/I_0 , полученная в образце $\text{YLiF}_4:\text{Er}^{3+}$ при включении двух МИ амплитудой 14 Э и длительностью $\tau_h = 22$ нс каждый, при задержке $t_{12} = 33$ нс. а Зависимость I/I_0 при возврате с $H = 75$ Э; б при возврате с $H = 130$ Э, в при возврате с $H = 164$ Э, г при возврате с $H = 270$ Э.

можно считать, что это является следствием установления памяти о нахождении образца в поле $+1000$ Э. Точно так же мы должны принять, что верхняя “неустойчивая” кривая (чёрные квадраты), полученная при изменении H от -1 кЭ до нуля и затем от нуля до $+1$ кЭ, каким-то образом хранит память о предварительном нахождении образца в поле -1 кЭ. Эта память начинает стираться только тогда, когда H становится больше $+H^*$. На рис. 5 показано, как меняется I/I_0 при последовательном увеличении поля до некоторого значения (синие кружки), а затем при уменьшении H до нуля (красные треугольники). Видно, что, пока $H \leq +164$ Э, эти зависимости совпадают. Однако при $H = +270$ Э возврат к нулевому значению поля происходит совсем по другой траектории. Отсюда можно сделать оценку, что стирание памяти начинается при $H^* > +200$ Э. Следует заметить, что такие же измерения, сделанные для случая, когда “неустойчивой” является нижняя ветвь бабочки (левая часть рис. 3б), показывают, что память на нижнем крыле гистерезиса сохраняется дольше и стирается при $H > 500$ Э.

Аналогичное проявление памяти наблюдалось и в работе [6], где делалось предположение о возникновении в образце в магнитном поле, при нарушении условия $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$, долгоживущих поляризационных доменов вследствие магнитоэлектрического эффекта. Однако в наших экспериментах $\mathbf{H} \parallel \mathbf{c}$, поэтому нет условий возникновения поляризационных доменов. В момент включения МИ в образце может возникнуть только наведённая импульсная поляризация и вопрос объяснения памяти остаётся открытым.

Обсуждение и выводы

Хорошо известно, что для возникновения невязности в оптике необходимо, чтобы образец обладал магнитоэлектрическими свойствами, а решётка кристалла не являлась centrosymmetric. Даже при этих условиях наблюдаемые эффекты, как правило, невелики. Достаточно необычным оптическим эффектом, обнаруженным к настоящему времени в магнитоэлектрических средах, является невязный дихроизм, когда в магнитном поле поглощение или люминесценция в мультиферроике CuB_2O_4 отличаются для двух взаимно противоположных векторов распространения света (см., например, [3]). Эффекты связывались с конструктивной или деструктивной интерференцией электрических и магнитных дипольных переходов. Микроскопические расчёты возникновения невязности в кристалле CuB_2O_4 были сделаны в работе [15]. Попытки наглядно объяснить действие МИ на ФЭ в кристаллах $\text{Y}(\text{Lu})\text{LiF}_4:\text{Er}^{3+}$ такой интерференцией приводятся в работе [13], однако при этом было сделано необычное предположение о том, что ось c кристалла является полярной, причём длина и направление вектора c определяются внешним полем.

Поскольку исследуемые в нашей работе образцы $\text{Y}(\text{Lu})\text{LiF}_4:\text{Er}^{3+}$ в идеале имеют центр инверсии и только особенности роста могут приводить к его нарушению,

следует констатировать, что ФЭ является крайне чувствительным методом обнаружения таких нарушений. Даже в методе ЭПР [7] это выглядит не столь наглядно, как демонстрируют эксперименты с ФЭ. С другой стороны, нет прямого доказательства, что наблюдаемый в этой работе, а также в работе [6], гистерезис связан с нарушением центра инверсии в образцах $\text{Y}(\text{Lu})\text{LiF}_4:\text{Er}^{3+}$. Более того, в работе [11] указано, что вследствие особенностей роста этих кристаллов, образцы $\text{LuLiF}_4:\text{Er}^{3+}$ имеют более совершенную структуру по сравнению с $\text{YLiF}_4:\text{Er}^{3+}$. В этом случае гистерезис в образцах $\text{LuLiF}_4:\text{Er}^{3+}$ должен проявляться слабее, чем в $\text{YLiF}_4:\text{Er}^{3+}$. Но в эксперименте на образцах $\text{Y}(\text{Lu})\text{LiF}_4$ с различными концентрациями ионов эрбия мы этого не видим.

Объяснение экспериментальных результатов требует серьёзных усилий. В работе [14] М. В. Еремин предложил возможное объяснение действия магнитных импульсов на сигнал ФЭ возникновением пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости, индуцированной магнитными импульсами. Но многие вопросы, особенно связанные с памятью, возникающей как с МИ, так и без МИ, остаются неясными. Результаты действия МИ на сигнал ФЭ, приведённые выше, получены при условии $\mathbf{c} \parallel \mathbf{H}$, когда без МИ отсутствует гистерезис в зависимости I/I_0 от H . На самом деле, точное выполнение условия $\mathbf{c} \parallel \mathbf{H}$ не является важным для регистрации действия МИ на сигнал ФЭ. Нарушение этого условия просто приводит к некоторой деформации зеркальной симметрии, показанной на рис. 3, в зависимости I/I_0 относительно $H = 0$. Это означает, что механизмы, приводящие к гистерезису сигнала ФЭ, обусловленного нарушением условий $\mathbf{c} \parallel \mathbf{H}$ или $\mathbf{c} \perp \mathbf{H}$ [6], и к гистерезису, вызванному включением МИ [14], имеют различные причины.

Работа А. М. Шегеды и О. А. Морозова проводилась в рамках выполнения госзадания ФИЦ КазНЦ РАН.

Литература

1. Пятаков А.П., Звездин А.К.: УФН **182**, 593 (2012)
2. Мухин А.А., Кузменко А.М., Иванов В.Ю., Пименов А.Г., Шуваев А.М., Дём В.Е.: УФН **185**, 189 (2012)
3. Toyoda S., Abe N., Arima T.: Phys. Rev. B **93**, 201109(R) (2016)
4. Caloz C., Alù A., Tretyakov S., Sounas D., Achouri K., Deck-Léger Z.-L.: Phys. Rev. Appl. **10**, 047001 (2018)
5. Szaller D., Shuvaev A., Mikhin A.A., Kuzmenko A.M., Pimenov A.: Physical Science Rev. **20190055** (2019)
6. Шегеда А.М., Кorableва С.Л., Морозов О.А., Лисин В.Н., Соловаров Н.К., Тарасов В.Ф.: Письма в ЖЭТФ **117**, 264 (2023)
7. Eremin M.V., Tarasov V.F.: JETP Lett. **121**, 434 (2025)
8. Lisin V.N., Shgeda A.M., Gerasimov K.I.: JETP Lett. **95**, 61 (2012)
9. Lisin V.N., Shgeda A.M., Samartsev V.V.: Laser Phys. Lett. **12**, 025701 (2015)
10. Sattler J.P., Nemaich J.: Phys. Rev. **4**, 1 (1971)
11. Абдулсабиров Р.Ю., Антипин А.А., Кorableва С.Л., Рахматуллин Р.М., Розенцвайг Ю.К.: Известия Вузов. Физика **2**, 24 (1988)
12. Macfarlane R.M., Wannemacher R., Boye D., Wang Y.P., Meltzer R.S.: J. Lumin. **48–49**, 313 (1991)
13. Shgeda A.M., Korableva S.L., Morozov O.A.: Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics **89**, 2416 (2025)
14. Шегеда А.М., Еремин М.В., Кorableва С.Л.: Письма в ЖЭТФ **122**, 746 (2025)
15. Нурмухаметов А.Р., Еремин М.В.: ЖЭТФ **162**, вып. 3 (9), 390 (2022)

Модуляция спектральных характеристик сенсорной поверхности композитного волоконного термосенсора

Н. С. Перминов, А. В. Шкаликов

Лаборатория нелинейной оптики

Описан и экспериментально апробирован прототип термооптического сенсора на основе модифицированного волокна с текстурированной поверхностью. Метод обработки позволил создать зону с регулируемой шероховатостью, которая выполняет функцию, аналогичную эффектам брэгговских решёток, и поддается электрической модуляции для управления фонон-фотонным взаимодействием. Это решение направлено на улучшение спектральных характеристик детектирования посредством увеличения площади активной поверхности и управления её свойствами. Рассматриваются перспективы использования устройства для задач, требующих устойчивого к помехам измерения температуры, а также совместимость предложенной методики модификации с технологиями интраволоконных световых клеток в квантовой информатике.

Modulation of spectral characteristics of the sensor surface of a composite fiber thermal sensor

N. S. Perminov, A. V. Shkalikov

Laboratory of non-linear optics

A prototype thermo-optical sensor based on a modified fiber with a textured surface is described and experimentally tested. The processing method created a zone with adjustable roughness, which functions similarly to Bragg grating effects and can be electrically modulated to control phonon-photon interactions. This solution is aimed at improving the spectral characteristics of detection by increasing the active surface area and controlling its properties. The potential for using the device in applications requiring interference-resistant temperature measurement is discussed, as is the compatibility of the proposed modification method with intrafiber light cage technologies in quantum information science.

Введение

Обладая выдающимися характеристиками, такими как высокая степень прозрачности и исключительная компактность, оптические волокна получили повсеместное распространение в качестве фундаментальной платформы для построения современных сенсорных систем и реализации протоколов квантовой информатики. В настоящее время благодаря значительному прогрессу в области литографических методов на подложках сложной геометрии, волокна микронного и субмикронного масштаба стали рассматриваться не просто как пассивные волноводы, но и в качестве автономного корпуса для интегральной квантовой оптики, – корпуса, способного вместить в себя сложные многокомпонентные устройства, функциональный потенциал которых простирается от решения задач хранения квантовой информации и выполнения логических операций до применения в высокочувствительной спектроскопии и прецизионной

термометрии [1–6]. Ключевым преимуществом подобных волоконных систем, обусловленным их субмиллиметровыми геометрическими размерами, является возможность эффективного контроля над когерентным взаимодействием между локализованными точечными квантовыми системами и внешними оптическими полями, что, в сочетании с очевидными перспективами масштабирования подобных архитектур, приобретает решающее значение для дальнейшего развития квантовых технологий. Соответственно, результаты последних экспериментальных работ демонстрируют достижение сильной и, что принципиально важно, когерентной связи распространяющегося светового излучения с активными сенсорными элементами, что позволяет в значительной степени нивелировать ограничения, накладываемые паразитным рэлеевским рассеянием и, как прямое следствие, приводит к существенному усилению мощности детектируемого полезного сигнала на фоне общего шумового фона.

Кварцевые волоконные световоды, составляющие основу современной волоконно-оптической инфраструктуры связи, находят своё применение не только в данной утилитарной сфере, но и выступают в качестве ключевого инструментария в фундаментальных и прикладных исследованиях, охватывающих широкий спектр дисциплин – от экспериментальной физики до биомедицинской диагностики и экологического мониторинга, где они задействуются для построения масштабируемых распределённых сенсорных сетей. Принципиально важно отметить, что функциональная роль оптического волокна в таких системах является дуалистической: оно служит одновременно и средой для передачи информационных сигналов, и базисным субстратом для создания высокочувствительных сенсорных элементов, чьи оптические свойства детерминированно изменяются под воздействием ряда внешних физико-химических факторов. В контексте производства сложных композитных волоконных систем мировой рынок фотонных компонентов предлагает развитую номенклатуру как пассивных элементов, так и активных волокон с управляемыми параметрами, что в совокупности предоставляет исследователям и инженерам широкие возможности для конфигурирования специализированных решений [7–13].

При проектировании волоконно-оптических сенсорных систем особая значимость отводится двум технологическим платформам: датчикам на основе волокон с суженным диаметром (микронитей), и микрополостным резонаторам (“световым клеткам”), обеспечивающим локализацию точечных квантовых объектов, что обусловлено их принципиальным преимуществом, заключающимся в интраволоконном характере распространения излучения, который гарантирует сохранение структурной целостности и герметичности всей измерительной системы [14–19]. Однако разработка подобных конфигураций суженных волокон сопряжена с необходимостью разрешения фундаментального технологического противоречия: для достижения высокой чувствительности и миниатюризации сенсора требуется предельное сокращение длины суженного сегмента, в то время как для обеспечения достаточного уровня взаимодействия эванесцентного поля с анализируемой средой, определяемого площадью контакта, данный параметр, напротив, должен быть увеличен. Таким образом, синтез конечной архитектуры представляет собой поиск оптимального компромисса между длиной чувствительного элемента, величиной радиационных потерь на участках перехода, а также критериями механической стабильности и долговечности композитной структуры. Важно подчеркнуть, что существующий парк коммерческого оборудования для процессов вытягивания и химико-механической обработки волокон зачастую не обеспечивает необходимого уровня воспроизводимости геометрических параметров, в связи с чем изготовление высокоточных сенсоров нередко требует привлечения ресурсоемких литографических методик.

Дизайн прототипа волоконного сенсора

В качестве альтернативного подхода к повышению механической стабильности волоконно-оптических сенсоров, функционирующих на принципе взаимодействия эванесцентной моды с внешней средой, рассматривается реализация структур, обеспечивающих локализацию излучения. Данная задача может быть решена либо посредством создания миниатюрных интраволоконных световых клеток, хорошо зарекомендовавших себя в газовой спектроскопии, однако отличающихся высокой технологической сложностью изготовления, требующей применения методов дорогостоящей прецизионной литографии, либо, согласно нашему оригинальному предложению, путём модификации профиля суженного участка волокна через формирование асимметричного бокового утолщения (рис. 1). В рамках настоящего исследования проводится первичная оценка характеристик конфигурации, представленной на рис. 1, с целью верификации её потенциала для использования в качестве чувствительного элемента в волоконно-оптических термометрах.

Ключевым преимуществом интраволоконной архитектуры сенсоров, предполагающей формирование чувствительного элемента непосредственно в сердцевине оптического волокна, выступает экстремально высокая степень пространственной локализации распространяющихся мод световода и мод, резонирующих в микроструктурированной области, что обеспечивает их интенсивное взаимодействие как в объёме, так и на границах; данный принцип лёг в основу новейших устройств квантовой обработки данных и высокочувствительных детектирующих комплексов, демонстрирующих превосходную точность измерений [1–5].

В целях дальнейшего усиления чувствительности, обусловленной явлением поверхностного фонон-фотонного взаимодействия, в рамках альтернативного подхода была разработана гибридная конфигурация, интегрирующая адиабатически суженное волокно с нанесённой методом ультрафиолетового отжига брэгговской решёткой. Такая геометрия не только существенно увеличивает отношение площади поверхности к эффективному объёму взаимодействия, но и увеличивает связь оптических и фононных мод, что в совокупности приводит к выра-

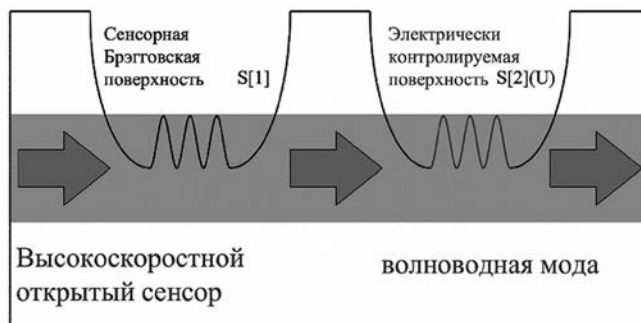


Рис. 1. Схема высокоскоростного термосенсора с открытой геометрией касания проходящего потока воздуха и активной сенсорной части с двумя брэгговскими решётками с электромодуляцией.

женному усилению отклика на внешние воздействия и деформации [20, 21].

В данной работе предлагается альтернативная методология формирования чувствительного элемента, которая, в отличие от традиционной технологии термического вытягивания волокна, предполагает применение механического стачивания оболочки с последующим нанесением брэгговской решётки и осаждением металлизированного покрытия, что позволяет не только упростить процесс изготовления, но и ввести принципиально новую функциональность – активное управление чувствительностью посредством приложения внешнего электрического поля. Создание такой электрически модулируемой поверхности открывает перспективы для значительного улучшения спектральных характеристик газовых спектрометров резонаторного типа, поскольку модуляция поверхностных свойств переменным полем обеспечивает эффективное возбуждение микроволновых переходов молекул в широком частотном диапазоне, что потенциально позволяет расширить арсенал методов спектроскопии и повысить селективность детектирования, а также вносит вклад в развитие прецизионной термометрии за счёт избирательного взаимодействия высокочастотного электрического поля с определёнными модами фононного спектра материала [22, 23].

Несмотря на присущие прототипу ограничения, его концептуальная схема обладает рядом достоинств. Реализация открытой геометрии взаимодействия с воздушным потоком ускоряет теплоперенос вблизи волокна. Технологическая простота обеспечивает высокую воспроизводимость параметров и масштабируемость. Наличие планарной сенсорной области, формируемой механической обработкой, упрощает нанесение спектрально-чувствительных функциональных покрытий и защитных барьерных плёнок, повышающих стабильность и долговечность устройства.

Согласно фундаментальным принципам, лежащим в основе функционирования термосенсоров на основе суженных оптических волокон, сдвиг спектрального положения резонансного провала в области пропускания, выражаемый через изменение соответствующей длины волны, может быть количественно описан выражением, приведённым в [17]:

$$\delta\lambda \approx 2L\delta n_{\text{eff}}, \quad (1)$$

в котором величина $\delta\lambda$ соответствует искомому спектральному сдвигу, параметр δn_{eff} представляет собой изменение эффективной разности показателей преломления, определяемой как $n = n_{\text{surf}} - n_{\text{fiber}}$, между внешним чувствительным покрытием и материалом сердцевины волокна, а L обозначает длину взаимодействия, то есть протяжённость активной сенсорной области. Из-за сложной геометрии используемой шероховатой поверхности эффективный коэффициент преломления n_{surf} также и коэффициент прозрачности (потери, которые улавливаются как девиации мощности) могут иметь достаточно высокие температурные девиации, отличные от тради-

ционных схем с гладкими адиабатически суженными волокнами, что мы и постарались применить для экспериментальной верификации модели. При этом надо отметить, что полное теоретическое описание физики нагрева шероховатой поверхности является отдельной фундаментальной проблемой, требующей более детального рассмотрения. Однако полученные нами экспериментальные результаты сенсорной чувствительности являются обнадеживающими и показывающими работоспособность предложенной модели.

В условиях варьирования температуры и при использовании источника оптического излучения со стабильными частотными характеристиками, наблюдаемое смещение резонансного провала приводит к регистрируемому изменению мощности на выходе детектора. Указанное температурное воздействие, провоцируя модификацию спектральных характеристик системы, также индуцирует увеличение популяции тепловых фононов, участвующих в процессах конверсии энергии колебаний решётки в электромагнитное излучение оптического диапазона, что, в свою очередь, оказывает дополнительное влияние на фиксируемый уровень выходной мощности. С целью интенсификации вышеописанных явлений и усиления регистрируемого отклика в представленной работе была реализована методика внешней низкочастотной электро-модуляции, расширяющая спектр фононного буфера приповерхностной области воздух-волокно, участвующего в процессах конверсии, что призвано активизировать взаимодействие фононов с элементами структуры чувствительного покрытия и тем самым добиться существенного повышения общей чувствительности сенсорного устройства.

В условиях значительных градиентов температурного воздействия, доминирующий вклад в совокупную чувствительность сенсорной системы вносит температурно-индуцированная модификация спектральных характеристик пропускания, присущих суженному сегменту оптического волокна; напротив, в области незначительных термических возмущений, особенно при наложении мощной внешней электро-модуляции, существенно возрастает относительная значимость процессов фонон-фотонной конверсии, что находит своё практическое применение в прецизионных измерительных устройствах, включая квантовые сенсоры и высокочувствительные биосенсорные платформы [1, 19]. К числу основных ограничений, сопряжённых с процедурой регистрации указанных эффектов, относится объективная необходимость задействования высокоточной аппаратуры детектирования оптического сигнала, а также применение лазерных источников излучения с исключительно высокой степенью стабильности частоты и мощности, что в совокупности обуславливает возрастание общей стоимости сенсорного устройства. При этом в конфигурациях, характеризующихся высокой интенсивностью прикладываемого модулирующего электрического поля и увеличенной площадью активной чувствительной поверхности, наблюдается значительное усиление нелинейных оптических явлений, протекающих в волоконном световоде, и усиливается роль фононных мод буферного

слоя, что приводит к более выраженному и комплексному проявлению регистрируемых физических эффектов.

Для активной части высокой площади поверхности характерно возникновение дополнительных областей провалов в спектре, спонтанно расположенных в области пропускания, но однозначно определённых для конкретной изготовленной модели. Для брэгговской решётки характерны глубокие резонансные пики, расположенные в заранее заданных изготовлением областях, что позволяет более точно ориентироваться по ним при термальном смещении. Несмотря на то, что глубина провалов для шероховатой поверхности меньше, чем глубина прецизионной брэгговской решётки, по ним можно также ориентироваться при выполнении распознавания изменения температуры, хотя это требует дополнительной калибровочной системы. Электромодуляция такой имитации брэгговской решётки также значительно усиливает эффекты электро-оптической модуляции, что положительно сказывается на конечной чувствительности прибора. Поэтому саму шероховатую поверхность в контексте сенсора можно рассматривать как систему из вложенных брэгговских резонаторов, так как работа со спектральными пиками у системы с конкретным изготовлением реализуется также, как для точной решётки.

В изготовленном прототипе сенсора в зависимости от стачивающего абразива могут быть реализованы различные крупно- и мелкодисперсным хаотические решётки, имеющие разную форму полос спектра пропускания. В отличие от брэгговской решётки положения пиков пропускания являются случайными по своему месторасположению, однако фиксированными для каждого конкретно образца и со статистически контролируемой шириной пиков. Таким образом, в плане сенсорного назначения шероховатая поверхность является имитацией суммы вложенных брэгговских резонаторов. Дополнительным плюсом шероховатой поверхности является наличие в ней большого числа спектральных особенностей, позволяющих выстроить спектральную калибровочную кривую точнее, чем для единичной брэгговской решётки, обладающей меньшим числом перепадов на единицу длины волны. У такой сенсорной стратегии есть и свои недостатки. Она предъявляет повышенные требования к точности алгоритмов калибровки, стабильности спектра источников и эффективности методов регистрации выходного сигнала. В данном исследовании мы ограничились описанием общего принципа работы схемы с развитой поверхностью активной области и демонстрацией роста её чувствительности при электромодуляции.

Представленная на рис. 1 сенсорная архитектура предусматривает интеграцию двух чувствительных областей, что позволяет реализовать метод интерференционных измерений. В данной конфигурации аналоговый сигнал от первой области ($S[1]$) суммируется или вычитается с модулированным сигналом от второй области ($S[2]$). Результирующий усиленный сигнал содержит два ключевых типа информации: высоконтрастные данные о градиенте температуры в смежных областях, что является критически важным для биологических термосенсоров,

требующих высокого пространственного разрешения; а также калибровочные данные для взаимной коррекции показаний чувствительных элементов, что особенно актуально для квантовых измерений, основанных на обеспечении когерентности фаз сигналов, регистрируемых различными участками сенсора.

Важным преимуществом предложенной архитектуры является её масштабируемость. Вместо двух областей ($N = 2$) вдоль линии может быть расположено значительное количество активных элементов ($N = 10^2 - 10^6$). Это позволяет реализовать две принципиально различные схемы детектирования: в конфигурации параллельного массива результирующий отклик представляет собой линейную суперпозицию сигналов, что обеспечивает увеличение отношения сигнал/шум и, как следствие, производительности сенсора пропорционально $N^{1/2}$; или в конфигурации последовательно-интегрированного массива (расположенного вдоль линии) суммарный сигнал является прямым произведением передаточных функций отдельных элементов. Данный подход, несмотря на потенциальное увеличение уровня шумов и снижение общей мощности сигнала, приводит к резкому усилению его контраста. Повышение общей производительности системы в последнем случае является нетривиальной задачей и может быть достигнуто за счёт применения специализированных алгоритмов постобработки для подавления шумов, что составляет предмет дальнейших исследований.

Экспериментальное тестирование прототипа

В рамках проведения предварительных экспериментальных исследований, направленных на верификацию предложенной схемы, была изготовлена первичная модель на основе сегмента оптического волокна, подвергнутого механической обработке методом стачивания (стирания), в соответствии с конфигурацией, иллюстрированной на рис. 1. Приложение внешнего контролирующего электрического поля к чувствительной области сенсора было реализовано в упрощённой конфигурации, исключающей процедуру металлизированного напыления; вместо этого использовался оголённый конец проводника, находящийся под переменным напряжением 220 В, который был расположен на расстоянии приблизительно 1 мм от зоны детектирования.

Для создания прототипа было применено стандартное одномодовое оптическое волокно с диаметром оболочки 125 мкм и диаметром сердцевины 9 мкм. Процедура механической обработки привела к формированию области стирания протяжённостью порядка 15 мм, при этом длина участка с максимальным сужением, обеспечивающего контакт эванесцентного поля моды сердцевины с внешней средой, составила приблизительно 2 мм. Указанный процесс обработки проводился последовательно с применением абразивных материалов двух различных фракций: 5–10 мкм и 2–3 мкм. Известно, что в случае силикатного стекла, составляющего основу волокна, типичная глубина

формируемых абразивными частицами бороздок составляет около 30% от их номинального размера.

Учитывая, что в данном эксперименте величина прижимного усилия в процессе обработки была намеренно ограничена, фактическая глубина созданной микро-рельефной структуры не превышала 1 мкм. Таким образом, варьирование гранулометрического состава абразива и регулирование параметра прижимного усилия открывают возможность целенаправленного формирования шероховатой поверхности, характеризующейся статистически управляемыми параметрами стохастической решётки.

Полученные в результате геометрические характеристики – а именно, протяжённость обработанной области и открытая конфигурация, обеспечивающая непосредственный контакт с воздушной средой, – позволяют предположить, что разработанный прототип может представлять практический интерес для решения задач высоколокализированного мониторинга пространственного распределения температурных полей в газовых средах и воздушных потоках в непосредственной близости от корпусов электронного оборудования, функционирование которого предъявляет строгие требования к соблюдению стабильного теплового режима. Перспективным направлением развития данной методологии представляется миниатюризация сенсорного элемента, что открывает возможности для его применения в качестве накладного устройства, предназначенного для локального мониторинга термического состояния критически важных, температурно-зависимых компонентов печатных плат, с конечной целью обеспечения повышенной стабильности их функционирования.

В рамках последующих этапов исследований планируется интеграция активной чувствительной поверхности со структурированными металлизированными масками, выполняющими двойную функцию: селективной спектральной фильтрации падающего излучения и интенсификации процесса теплообмена с окружающей средой. Параллельно рассматривается методика напыления тонкоплёночных слоёв, содержащих химически активные вещества, внедрение которых направлено на существенное увеличение общей производительности и эффективности сенсорного устройства.

Следует особо отметить, что в исследуемой модели, в целях упрощения производственного цикла, традиционная технология нанесения волоконной брэгговской решётки, призванная увеличить площадь взаимодействия, была преднамеренно замещена формированием шероховатой поверхности. Важным результатом является наблюдение, что даже при использовании подобной имитации структуры брэгговской решётки посредством хаотической рельефной решётки, образованной статистическим микрорельефом, было зафиксировано значимое улучшение ключевого параметра чувствительности. Данное улучшение проявляется себя в виде выраженного ускорения динамического отклика датчика на внешние температурные изменения, что достигается за счёт механизма внешней модуляции, обусловленной указанными морфологическими особенностями поверхности.



Рис. 2. Общая схема экспериментальной установки, содержащая широкополосный источник света, печь с контролем температуры и измеритель мощности.

Конфигурация экспериментальной установки, визуализированная на рис. 2, включает в свой состав следующие базовые модули: источник оптического излучения, волоконно-оптический сенсорный элемент, термостатирующую печь, снабжённую системой точного контроля температуры, и измеритель оптической мощности. В целях обеспечения максимального термического контакта и достижения идентичности температурных режимов суженного участка оптического волокна и нагревательной подложки печи, указанный сегмент был зафиксирован на её поверхности посредством специализированной алюминиевой клейкой ленты.

Проведённые измерения коэффициента пропускания демонстрируют, что через область с модифицированной геометрией проходит приблизительно 55% от исходной мощности вводимого в волокно оптического излучения. Возникновение указанных потерь мощности, величина которых составила порядка 45%, преимущественно обусловлено явлением рассеяния излучения на микрорельефе суженного участка, что, в свою очередь, наблюдалось визуально в виде свечения данной зоны.

Важно подчеркнуть, что на настоящем, предварительном, этапе проведения экспериментальных исследований, была сознательно выбрана схематическая конфигурация, исключающая применение узкополосного спектрального фильтра в измерительном тракте. На рис. 3 представлены характерные спектры для нескольких образцов сточенного волоконного термосенсора на выходе волокна при подаче широкополосного излучения накачки от лазерного диода, показывающие наличие широкой спектральной области с большим количеством провалов, которые могут значительно улучшить схему детектирования за счёт интерференционных эффектов в спектральном домене.

Предполагается, что последующая интеграция спектрально-селективного элемента способна привести к дальнейшему улучшению метрических характеристик чувствительности сенсора. Данный потенциальный эффект основан на регистрации температурно-индуцированного смещения спектральной полосы пропускания, обусловленного зависимостью оптических свойств материалов, составляющих волокно, от внешних термических воздействий.

В ходе проведения экспериментальных исследований, в рамках которых осуществлялось варьирование нагревом печи внешней температуры в диапазоне от 40 до 80 °С, была установлена характерная функциональная

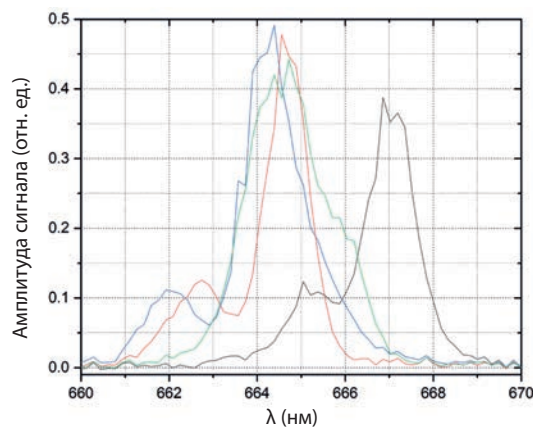


Рис. 3. Спектры мощности выходного сигнала в зависимости от длины волны на выходе сточенного волокна. Накачка осуществлялась широкополосным лазерным диодом. Нормировка реализована по абсолютному значению на максимальное значение исходной спектральной мощности диода без сенсора, данные представлены в безразмерных единицах. Цветами отмечены несколько разных образцов.

зависимость между температурой и величиной девиации нормализованной оптической мощности; полученные данные показаны на рис. 4.

Процедура нормировки мощности проводилась относительно её значения, зарегистрированного при температуре 39.2 °С, которая соответствует минимальному уровню нагрева в представленном массиве тестовых данных. Эта температурная точка была выбрана в качестве реперной, так как основное время сенсор будет работать в “холодном” режиме, фиксируя последующий прогрев системы. Важно отметить, что именно состояние системы при более низких температурах характеризуется повышенной стабильностью и минимальным уровнем возмущающих воздействий на активный чувствительный элемент, что, в свою очередь, предоставляет возможность выбора наиболее устойчивой и воспроизводимой точки для процедуры калибровки. Следует также подчеркнуть, что при адаптации методики для мониторинга различных физических систем, выбор конкретного значения калибровочной температуры может быть осуществлён произвольным образом, исходя из индивидуальных

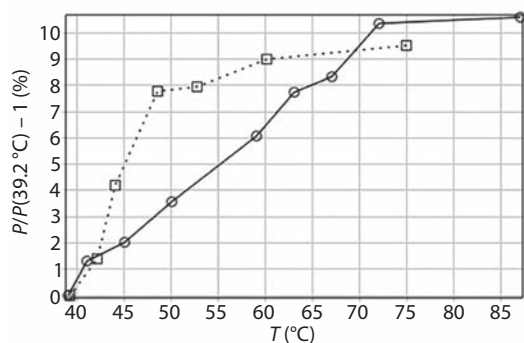


Рис. 4. Зависимость девиации нормированной интенсивности сигнала ($P/P(T = 39.2 \text{ °C}) - 1$)-100% от температуры при отсутствии (точечная линия) и наличии (сплошная линия) внешнего модулирующего электрического поля.

термостатических характеристик и рабочих режимов объекта наблюдения.

Как видно из анализа представленных графических зависимостей, детализирующих поведение исследуемого параметра в функции от температуры (где точечная линия соответствует экспериментальным данным, полученным в условиях отсутствия внешнего электрического поля, а сплошная линия отражает динамику параметра при его наличии), ключевым результатом применения модулирующего поля выступает возникновение выраженного и управляемого изменения углового коэффициента аппроксимирующей кривой, характеризующей фундаментальную чувствительность системы; количественная оценка данного изменения свидетельствует о его приблизительном двукратном увеличении, что, в свою очередь, создаёт предпосылки для существенного расширения функциональных возможностей и операционного диапазона данного сенсорного устройства.

Электромодуляция шероховатой сенсорной поверхности высокой площади

На рис. 5 представлена калибровочная зависимость девиации нормированной оптической мощности от управляющего напряжения. Измерения проводились при стабилизированной температуре 40 °С. Ключевым аспектом методики является тот факт, что приложение внешнего напряжения к активному чувствительному элементу в процессе его функционирования генерирует дополнительную калибровочную характеристику, наличие которой создаёт принципиальную возможность для осуществления более точной идентификации температурного параметра. Реализация данной возможности предполагает разработку и применение специализированного алгоритма, основанного на параметрической калибровке и последующем статистическом анализе накопленного массива экспериментальных данных, но этот вопрос детального рассмотрения которого составляет предмет последующих научных изысканий.

Следует отметить, что процедура нормировки измеряемого сигнала по параметру напряжения была целе-

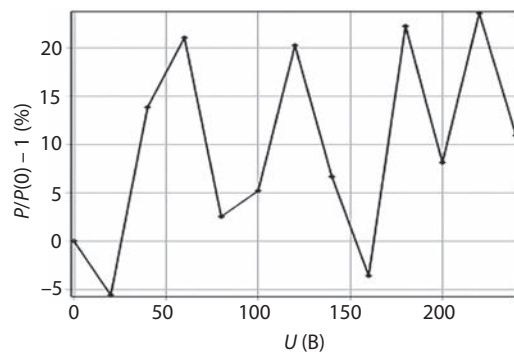


Рис. 5. Зависимость девиации нормированной интенсивности сигнала ($P/P(U = 0) - 1$)-100% от напряжения внешнего модулирующего электрического поля.

направленно осуществлена относительно его значения, зафиксированного при условии $U = 0$ В, что было продиктовано соображениями методического характера, а именно – необходимостью обеспечения прямой сопоставимости полученных результатов с данными, характерными для традиционных сенсорных систем, не использующих метод модуляции. Вместе с тем, для подавляющего большинства промышленных применений, где доминирующее значение приобретает задача достижения максимальной чувствительности, несомненный практический интерес представляла бы реализация режима наиболее интенсивного воздействия полем, достигающим величин в несколько киловольт, поскольку, как демонстрируют экспериментальные данные, рост амплитуды управляющего напряжения коррелирует с немонотонным увеличением мощности выходного оптического излучения, что, в свою очередь, обуславливает пропорциональное улучшение результирующей чувствительности устройства. Таким образом, методология калибровки серийного прибора должна предусматривать использование множества реперных точек, включая области высоких управляющих напряжений. Следует констатировать, что, аналогично хорошо изученному феномену термического расширения, электрооптический эффект, проявляющийся в модуляции оптических характеристик как периодических структур типа решёток Брэгга, так и спектрального отклика аperiодических поверхностных неоднородностей и фононного спектра приповерхностной области газового слоя, оказал статистически значимое и количественно измеримое воздействие на функциональные параметры волоконно-оптических сенсорных поверхностей, что, в свою очередь, открывает принципиально новые перспективы для целенаправленного активного управления метрологическими свойствами предложенной концепции в контексте её дальнейшей оптимизации.

Анализ данных в температурном диапазоне 40–80 °С показывает (рис. 4), что суммарная девиация оптической мощности из-за изменения температуры достигает 10% во всем исследованном интервале. В то же время, что представляется наиболее существенным, вариация мощности, вызванная приложением управляющего электрического поля в сравнительно узком диапазоне напряжений даже небольшой величины, составила приблизительно 20%, согласно данным, представленным на рис. 5. Таким образом, метод электромодуляции демонстрирует существенный и практически реализуемый потенциал, позволяя, согласно проведённым оценкам, повысить итоговую чувствительность сенсорного устройства приблизительно в три раза – с базового уровня в 10% до совокупного изменения мощности порядка 30% на калибровочный диапазон, что следует признать нетривиальным и высокоперспективным результатом.

Данная методика открывает путь для значительного улучшения метрологических характеристик серийных сенсорных систем посредством применения простых в технологическом исполнении электромодулирующих накладных элементов, не требующих дорогостоящих и

сложных модификаций конструкции самой сенсорной головки. Представленная методология, основанная на целенаправленном применении внешнего электрического поля в совокупности с последующей тонкой настройкой сопряжённых калибровочных алгоритмов, формирует концептуальный фундамент для глубокой модернизации широкого спектра критически важных прикладных измерительных систем, к которым предъявляются строгие требования в отношении эксплуатационной надёжности, повышенной устойчивости к воздействию различного рода помех и, что немаловажно, технологической рентабельности серийного производства. В рамках настоящего исследования была осуществлена демонстрация фундаментального принципа, устанавливающего саму принципиальную возможность существенного влияния электрического поля на ключевые метрологические параметры сенсора, в то время как последующая детальная оптимизация режимов модуляции, направленная на согласование с конкретными конструктивными особенностями измерительного прибора, несёт в себе значительный потенциал для извлечения дополнительных характеристик в контексте точности и достоверности получаемых данных.

Особого внимания заслуживает тот факт, что электрически модулируемый чувствительный элемент потенциально способен к взаимодействию со сложными многочастотными электрическими импульсами значительной амплитуды, что открывает путь к кардинальной трансформации характеристик регистрируемого оптического отклика, – и всё это без необходимости применения энергоёмких и конструктивно сложных систем оптической накачки. Реализация подобного подхода ведёт к существенному повышению разрешающей способности всей системы измерения, что достигается благодаря значительному усилению итоговой девиации интенсивности полезного сигнала на фотоприёмном устройстве и позволяет эффективно нивелировать фундаментальное ограничение, связанное с неизбежными потерями сигнала на каждом из последовательных элементов сложной многокомпонентной сенсорной архитектуры. Следует также подчеркнуть, что использование компактных электронных генераторов усиливающих сигналов представляется значительно более предпочтительным с точки зрения практической реализации, эргономики и общей управляемости системы, что в конечном итоге не только приводит к снижению себестоимости конечного устройства за счёт упрощения требований к источникам оптического излучения и фотодетекторам, но и способствует созданию более интегрированных и компактных термо-измерительных модулей.

Несмотря на присущую экспериментально полученным кривым значительную сложность формы, а также на определённую вариабельность, обусловленную технологическими допусками в процессе производства измерительного волокна, предлагаемая методика их последующей алгоритмической калибровки открывает возможность для высокоточной температурной идентификации. Таким образом, ключевой вывод заключается в том, что достигнутый уровень чувствительности

сенсорной системы в принципе позволяет эффективно компенсировать посредством алгоритмической пост-обработки данных как микродефекты изготовления, так и влияние стохастических факторов, возникающих на производственной стадии. Данное обстоятельство, в свою очередь, создаёт предпосылки для существенного снижения себестоимости изготовления самого волоконного термосенсора, поскольку нивелирует необходимость соблюдения чрезвычайно жёстких и, как следствие, дорогостоящих технологических норм, без ущерба для итоговой точности измерений. Более того, подобный компенсационный подход обеспечивает повышенную воспроизводимость и стабильность метрологических характеристик конечного измерительного комплекса – а именно, его сенсорной способности – при эксплуатации в различных, в том числе и экстремальных, температурных диапазонах.

Выводы

В ходе проведённого исследования был осуществлён комплексный анализ работоспособности прототипа волоконно-оптического термодатчика, архитектура которого основана на принципе электрического управления параметрами специально модифицированной зоны оптоволоконного тракта. Упомянутая модификация заключается в создании методами точной обработки области с контролируемой шероховатостью, функциональное предназначение которой заключается в обеспечении эффективного взаимодействия распространяющейся эванесцентной волны с нанесённым термочувствительным покрытием, характеризующимся не только настраиваемыми свойствами, но и исключительно высокой удельной площадью поверхности, что, в свою очередь, является критически важным фактором, обусловившим достижение высоких значений чувствительности всего сенсорного устройства в целом.

Разработанная конфигурация, как представляется, открывает значительные перспективы для глубокой модернизации серийно выпускаемых измерительных приборов, а её потенциальная область применения может распространяться на создание нового поколения механически робастных и компактных датчиков температуры, предназначенных для установки в малогабаритные технические системы, а также на использование в разнообразных научных экспериментах, требующих прецизионного термического мониторинга.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках темы лаборатории нелинейной оптики КФТИ – ОСП ФИЦ КазНЦ РАН.

Литература

- Gómez-López E., Ritter D., Kim J., et al.: arXiv preprint. 2025. arXiv:2503.22423.
- Davidson-Marquis F., Gargiulo J., Gómez-López, E., et al.: *Light: Science & Applications* **10**, No. 1, 114 (2021)
- Bürger J., Kim J., Weiss T., Maier S.A., Schmidt M.A.: *Advanced Photonics* **7**, No. 4 Art. No. 046002 (2025)
- Yang Y., Jeon Y., Dong Z., et al.: *ACS Nano* **19**, No. 13, 12491 (2025)
- Kuster O., Augenstein Y., Hernández R.N., Rockstuhl C., Sturges T.J.: *Nanophotonics* **14**, No. 9, 1415 (2025)
- Warrington E.A., Salter P.S., Davis W.O., et al.: *Optics Express* **33**, No. 11, Art. No. 23616 (2025)
- Viet Nguyen L., Hwang D., Moon S., Seung Moon D., Chung Y.: *Optics express* **16**, No. 15, 11369 (2008)
- Ma S., Xu Y., Pang Y., et al.: *Sensors* **22**, No. 15, Art. No. 5722 (2022)
- Lee B.H., Kim Y.H., Park K.S., et al.: *Sensors* **12**, No. 3, 2467 (2012)
- Wang K., Dong X., Köhler M.H., et al.: *IEEE Sensors Journal* **21**, No. 1, 132 (2020)
- Duan C., Li J., Zhang K., Tian M.: *Optical and Quantum Electronics* **56**, No. 2, 262 (2024)
- Kawasaki B.S., Hill K.O., Lamont R.G.: *Optics Letters* **6**, No. 7, 327 (1981)
- Mustapha Kamil Y., Abu Bakar M.H., Zainuddin N.H., Yaacob M.H., Mahdi M.A.: *Biosensors* **13**, No. 2, 270 (2023)
- Zhu Z., Sun S., Chai X., et al.: *Laser & Photonics Rev.* **18**, No. 9, Art. No. 2301388 (2024)
- Ngiejungbwen L.A., Hamdaoui H., Chen M.Y.: *Optics & Laser Technology* **170**, Art. No. 110187 (2024)
- Perminov N., Tarankova D. in: *Cyber-Physical Systems. Studies in Systems. Decision and Control* (Kravets A.G., Bolshakov A.A., Shcherbakov M.V., eds.). Vol. 350. Springer. Cham. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67892-0_30
- Andrianov S.N., Kochneva Y.Y., Shindyaev O.P., Shkalikov A.V.: *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* **83**, 1462 (2019)
- Harun S.W., Lim K.S., Tio C.K., Dimyati K., Ahmad H.: *Optik* **124**, No. 6, 538 (2013)
- Taha B.A., Ali N., Sapiee N.M., Fadhel M.M., et al.: *Biosensors* **11**, No. 8, 253 (2021)
- Navruz I., Ari F., Bilsel M., Al-Mashhadani Z.A.: *Optical Fiber Technology* **45**, 201 (2018)
- Chen L., Ma Y., Jiang C., et al.: *Optics Communications* **569**, Art. No. 130798 (2024)
- Cheng Z., Shu X., Ma L., et al.: *Nature Communications* **14**, No. 1, Art. No. 7409 (2023)
- Śmietana M., Burnat D., Curda P., et al.: *ACS Photonics* **11**, No. 5, 2061 (2024)
- Ye A., Tang Y., Li X., Niu Y., Gong S.: *Measurement Art. No. 118106* (2025)
- Nigmatullin R.R., Maione G., Lino P., Saponaro F., Zhang W.: *Commun. in Nonlinear Sci. Num. Simul.* **42**, 324 (2017)

Хиральные и топологические свойства кольцевой фотонной молекулы из четырёх оптических микрорезонаторов

Н. С. Перминов, С. А. Моисеев

Лаборатория нелинейной оптики

В настоящем исследовании анализируется теоретическая модель кольцевой фотонной молекулы, состоящей из четырёх высокودобротных оптических микрорезонаторов. Показано, что введение хиральной асимметрии посредством специфического выбора фазовых набегов и коэффициентов связи между элементами приводит к формированию системы с нетривиальными топологическими свойствами. Расчётный анализ выявил, что при асимметричном распределении параметров связи и их фаз комплексный спектр системы сохраняет симметричную структуру. Однако распределения интенсивностей по отдельным резонаторным модам существенно зависят от геометрической хиральности конфигурации. Теоретически обоснована возможность целенаправленного управления спектрально-топологическими характеристиками системы через варьирование указанных параметров. В частности, продемонстрирована возможность индуцирования состояний двукратного и трёхкратного спектрального вырождения. Подобные управляемые вырожденные состояния представляют значительный интерес для разработки методов восстановления записанной информации и могут служить основой для создания эффективных протоколов реализации квантовой памяти.

Chiral and topological properties of a ring photonic molecule composed of four optical microresonators

N. S. Perminov, S. A. Moiseev

Laboratory of non-linear optics

In this study, a theoretical model of a ring-shaped photonic molecule consisting of four high-quality optical microresonators is analyzed. It is shown that introducing chiral asymmetry through a specific selection of phase shifts and coupling coefficients between the elements leads to the formation of a system with non-trivial topological properties. The computational analysis revealed that under an asymmetric distribution of coupling parameters and their phases, the complex spectrum of the system retains a symmetric structure. However, the intensity distributions among individual resonator modes significantly depend on the geometric chirality of the configuration. The possibility of targeted control over the spectral-topological characteristics of the system through the variation of these parameters is theoretically substantiated. In particular, the possibility of inducing states of two-fold and three-fold spectral degeneracy is demonstrated. Such controllable degenerate states are of significant interest for developing methods of recorded information recovery and can serve as a basis for creating efficient quantum memory protocols.

Введение

Реконфигурируемые и высокоэффективные системы квантовой памяти (КП), функционирующие в оптическом спектральном диапазоне, рассматриваются в качестве критически значимого элемента для реализации широкого спектра прикладных задач в области квантовой информатики [1, 2]. Особый научный и технологический интерес в контексте масштабируемых архитектур квантовых вычислений вызывает разработка многокубитовых платформ на основе твердотельных и ионных кубитов, демонстрирующих значительный потенциал в плане наращивания вычислительных мощностей [3]. Тем не менее, ключевым ограничением, препятствующим реализации

этого потенциала, выступает отсутствие в подобных системах интегрированной квантовой памяти, способной кардинально повысить их общую вычислительную производительность [4]. Принципиальная важность решения данной проблемы дополнительно подчёркивается недавними исследованиями, которые свидетельствуют о том, что даже квантовая память с относительно малой информационной ёмкостью способна обеспечить экспоненциальное ускорение вычислительных процессов при выполнении определённого класса квантовых алгоритмов [5]. Следовательно, создание реконфигурируемой оперативной квантовой памяти с высокими показателями эффективности представляет собой одну из наиболее актуальных исследовательских задач, решение которой

способно инициировать качественно новый этап в развитии технологий квантовых вычислений.

Развитие квантовых вычислительных систем в значительной степени зависит от создания КП, демонстрирующей высокие показатели эффективности. Однако на текущем этапе технологического развития отсутствуют реализованные решения КП, чьи параметры в полной мере соответствовали бы критериям, необходимым для их продуктивного применения в рамках квантовых вычислений. Центральной задачей в конструировании подобной памяти остаётся разработка интерфейса [6], обеспечивающего возможность обратимой и высокоэффективной передачи состояний кубитов из волноводных трактов или непосредственно от квантовых процессоров в среду КП с последующим контролируемым восстановлением фотонных состояний в произвольный заданный момент времени. В настоящей работе исследуется перспектива реализации высокоэффективной оптической резонаторной КП, характеризующейся реконфигурируемыми спектральными свойствами, что позволяет осуществлять точную подстройку её резонансных частот под рабочие частоты квантовых процессоров, а также обладающей высокой эффективностью хранения и программно управляемым временем сохранения квантовой информации.

В рамках настоящего исследования применяется методология, изложенная в предшествующих работах [7, 8], в которых продемонстрировано, что ансамбль связанных оптических резонаторов, чья спектральная конфигурация определяется заданным распределением резонансных мод, может функционировать в качестве высокоэффективного интерфейса для взаимодействия с импульсными оптическими полями. В настоящей статье предлагается архитектура, основанная на объединении высокодобротных оптических микрорезонаторов, образующих нетривиальную геометрическую структуру в виде кольцевой фотонной молекулы (ФМ), которые применяются в большом числе различных приложений квантовой информатики [9]. Подобная кольцевая конфигурация представляет значительный интерес для задач многоканального переноса квантовых состояний, а также для их временного хранения. Проведён детальный анализ спектральных характеристик системы в зависимости от параметров связи между отдельными резонаторами, включая как величину коэффициентов связи, так и фазовые множители, которые определяют топологически инвариантные свойства всей структуры. В ходе проведённого анализа установлено, что в условиях асимметричного распределения параметров фазовых сдвигов и коэффициентов связи между элементами системы, её комплексный спектр демонстрирует симметричную спектральную структуру, в то время как спектры интенсивности, соответствующие отдельным резонаторным модам, обнаруживают выраженную зависимость от геометрической хиральности конфигурации. Теоретически продемонстрировано, что целенаправленное варьирование параметров фаз и сил связей позволяет осуществлять значительную модификацию спектрально-топологических характеристик всей

системы, создавая условия для формирования двукратного и трёхкратного спектрального вырождения. Подобные управляемые состояния вырождения являются ключевыми для реализации эффекта понижения частоты биений, а также для организации эффективных протоколов хранения квантовой информации.

Теоретическая модель

На рис. 1 представлена схема соединения четырёх микрорезонаторов, образующих фотонную молекулу с гибридизацией мод за счёт взаимодействия их между собой.

На рис. 1 $k_n(t) = 1 + nf$ – связи между резонаторами с модами $x_n(t)$ и внешними волноводами, $g_n = 1 \cdot \exp(i\pi s/4)$ – комплексные коэффициенты связи между резонаторами (введена нормировка $|g_n| = 1$, не уменьшающая общности рассуждений). Коэффициенты связи были специально сконструированы в такой форме, что содержат геометрическую (хиральную) структуру, нарушающую её эквивалентность при инверсии относительно оси вращения системы. Это, безусловно, вызывает изменения в динамике и собственных частотах изучаемой системы, и далее мы покажем какие именно необычные эффекты можно наблюдать при такой двухпараметрической системе контролируемых параметров $\{f, s\}$, которые кодируют как “ручки” управления все исходные физические параметры связей. Важно отметить, что при современных возможностях удаётся не только плавно реконфигурировать подобные системы, но получить и быстрое переключение, то есть программирование динамики системы. Тема оптических переключателей активно развивается в последние годы [10] и при ставшем доступном быстром переключении связей, меньше обратной величины связи между резонаторами $\sim 1/100$ МГц = 10 нс, становится возможным эффективный трансфер квантового состояния между волноводом и резонаторами с последующим отключением связей для длительного запирания квантового сигнала в системе. 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 вы-

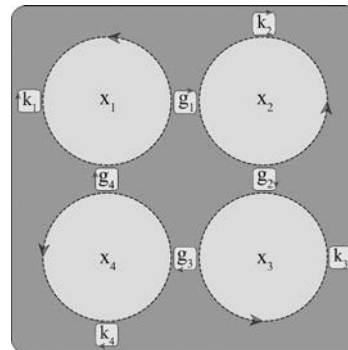


Рис. 1. Схема кольцевой фотонной молекулы из четырёх оптических микрорезонаторов.

сокой добротности оптических микрорезонаторов [11] и малых потерь в них, мы имеем следующую систему линейных уравнений:

$$\begin{aligned}(\partial_1 + i\Delta_1 + k_1/2)x_1 + ig_1x_2 + ig_4^*x_4 &= 0, \\(\partial_1 + i\Delta_2 + k_2/2)x_2 + ig_2x_3 + ig_1^*x_1 &= 0, \\(\partial_1 + i\Delta_3 + k_3/2)x_3 + ig_3x_4 + ig_2^*x_2 &= 0, \\(\partial_1 + i\Delta_4 + k_4/2)x_4 + ig_4x_3 + ig_3^*x_2 &= 0,\end{aligned}\quad (1)$$

где исходная частотная отстройка $\Delta_n = 0$ микрорезонаторов от центральной частоты ω_0 одинакова, но за счёт взаимодействия конечный комплексный спектр системы расщепляется, становится очень сложным и обладающим большими возможностями для реконфигурации за счёт изменения других параметров системы.

Спектроскопия и особые точки для оптимизации

Решение уравнений (1) доступны для анализа в фурье-представлении, после чего возникает задача о нелинейной алгебраической оптимизации спектра и динамики под различные задачи от трансфера и хранения информации до динамического управления биениями. Это очень сложная задача в высокоразмерном пространстве параметров и в данном кратком сообщении мы не планируем охватить сразу весь круг задач. Здесь мы рассмотрим более детально какие принципиальные спектрально-топологические возможности есть у такой фотонной молекулы, и способна ли она находиться в состоянии с вырождением спектра, который частично решает задачу об управляемом трансфере.

Для выгрузки из такой системы во внешние волноводы начального симметричного состояния вида $x_n(0) = 1/2$ комплексный спектр $v = E_n + iD_n$ определяется решением характеристического уравнения

$$16v^4 + (80f + 32)iv^3 + (-140f^2 - 120f - 88)v^2 + (-100f^3 - 140f^2 - 220f - 72)iv + 24f^4 + 50f^3 + 131f^2 - 32\cos((5/2)\pi s) + 90f + 49 = 0. \quad (2)$$

Сразу отметим, что ввиду наличия всего четырёх резонаторов (небольшое чётное число) получается, что спектры будут иметь симметричное распределение действительных и комплексных частей в комплексной плоскости относительно эффективного математического центра масс этих четырёх точек, что нетривиально ввиду того, что изначально задана ассиметрична конфигурация связей. Покажем это далее более детально.

На рис. 2 и 3 представлены спектры E_n и D_n как функции от s, f , отвечающие решению уравнения (2). Полученная зависимость позволяет настраивать характеристики ФМ. При слиянии энергетических линий системы мы получаем отсутствие осцилляций на стадии хранения, что интересно для обеспечения быстрого режима хранения сигнала.

А для оптимизации эффективности высвечивания энергии из ФМ в волноводные тракты можно использовать условия оптимизации, представленные в работе [8].

Как видно из рис. 2, показывающего таблицу спектров для разных значений фиксированного фазового параметра s , данная система при выбранной параметризации является совершенно уникальной и позволяет реализовывать топологию линий из 1, 2, 3 и 4 различных частот путём перестройки всего одного параметра f . В приложении к хранению информации это означает очень высокий контроль возможностей по созданию различных по свойствам частотных гребёнок.

На рис. 3 мы видим аналогичную картину, но уже с управлением топологией спектра при помощи гладкого изменения параметров связей, реализуемых на физическом уровне контролируемые линиями задержки, сдвигающими фазу сигнала при его прохождении от одного резонатора к другому.

Как ни странно, зависимость от фазы является очень сильной, что нехарактерно для подобных систем, и есть возможность мягкой перестройки гребёнки частот из двух линий (например, в одну линию), причём за счёт достаточно бесшумного метода (переключение фазы связей), что несколько отличает это от перестройки амплитуды связей f . Увеличение числа линий в системе даёт нам потенциальную возможность для получения биений, создающих эффект памяти и достаточно длительную задержки сигнала во всей композитной ФМ. А перестройка топологии спектра до одной линии принципиально позволяет делать более быструю выгрузку без биений.

Топологические лакуны спектра и хиральность

Представленные на рис. 2 и 3 двумерные зависимости, содержащие особые точки, на самом деле являются довольно сложными объектами – лакунами в трёхмерном пространстве $\{E_n, s, f\}$. То есть при увеличении параметра f вблизи критической точки спектр может расщепляться, а при увеличении s – наоборот, вырождаться. Подобные объекты классифицируются как седловые точки многомерных поверхностей. Лакунарность как свойство разрывных систем проявляется здесь в том, что производные по параметру от наблюдаемых такой квантовой системы обладают разрывом из-за вырождений линий, что может быть использовано для сенсорных приложений при наличии модуляции управляющих параметров. На рис. 4 мы приводим уже трёхмерные формы зависимости комплексного спектра от параметров $\{s, f\}$ вблизи областей вырождения. Как видно из графиков, система обладает сложной параметрической зависимостью и при наличии некоторого небольшого замкнутого контура обхода особой области, мы можем проходить сразу через несколько областей, где топология спектра значительно отличается. Такой обход может задаваться динамическим управлением параметров одновременно

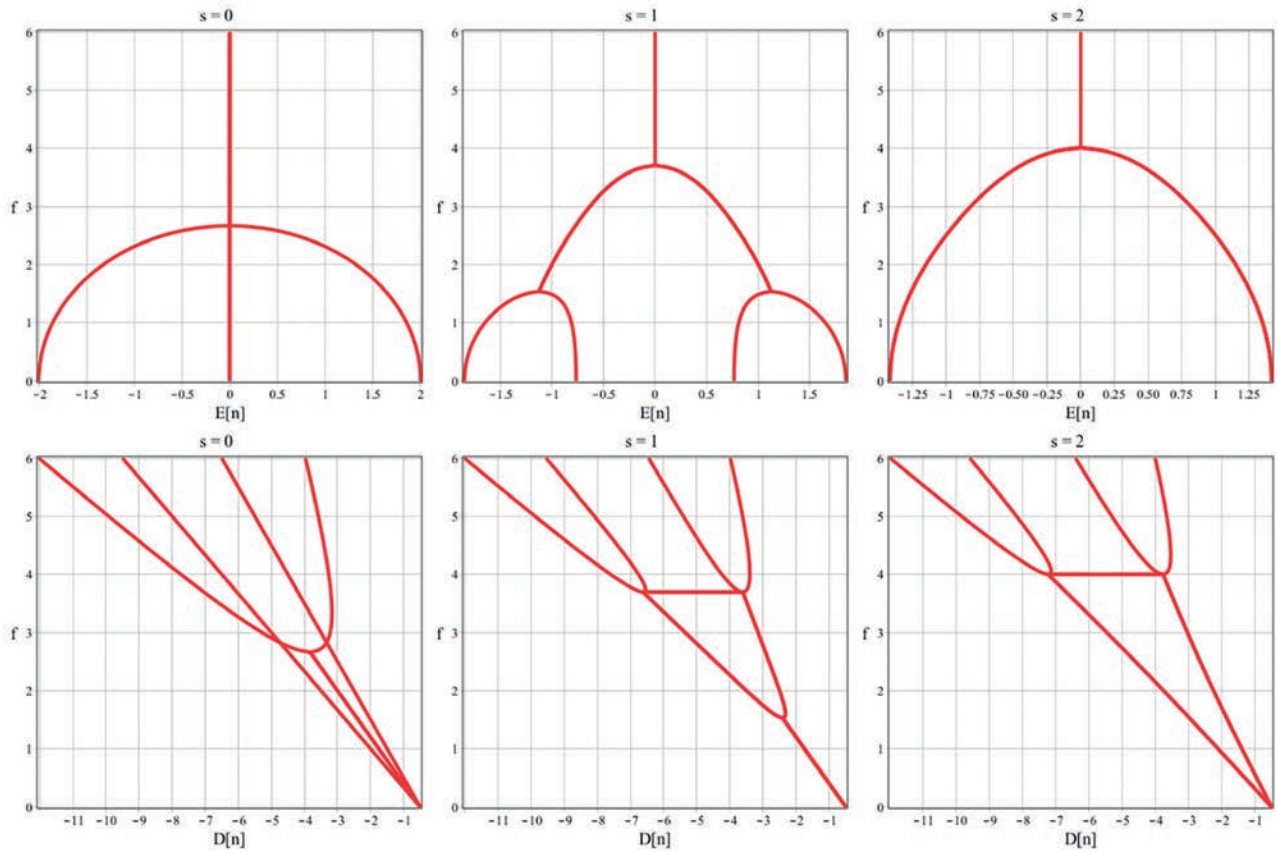


Рис. 2. Зависимость спектра ФМ от параметров связи с внешними волноводами $k_n = 1 + nf$.

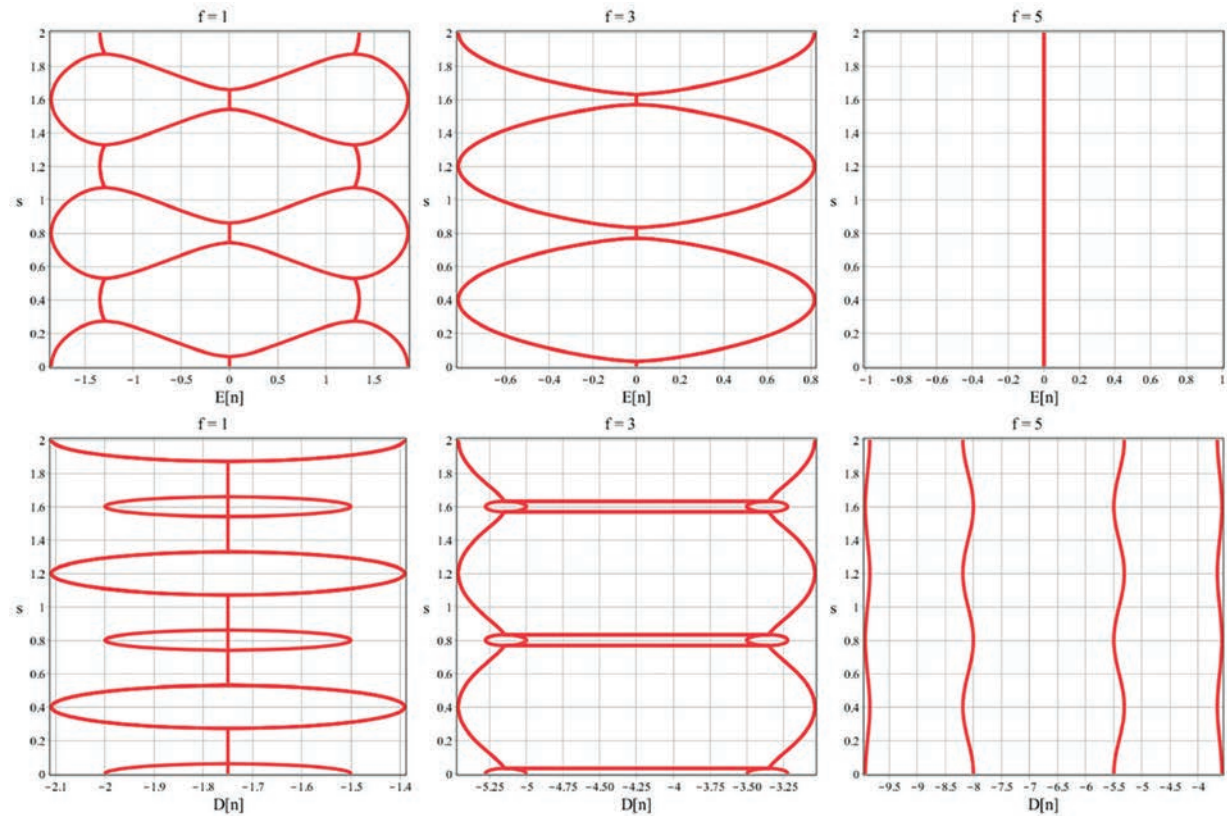


Рис. 3. Зависимость спектра ФМ от параметров фазы связей между резонаторами $\arg(g_n) = \pi ns/4$.

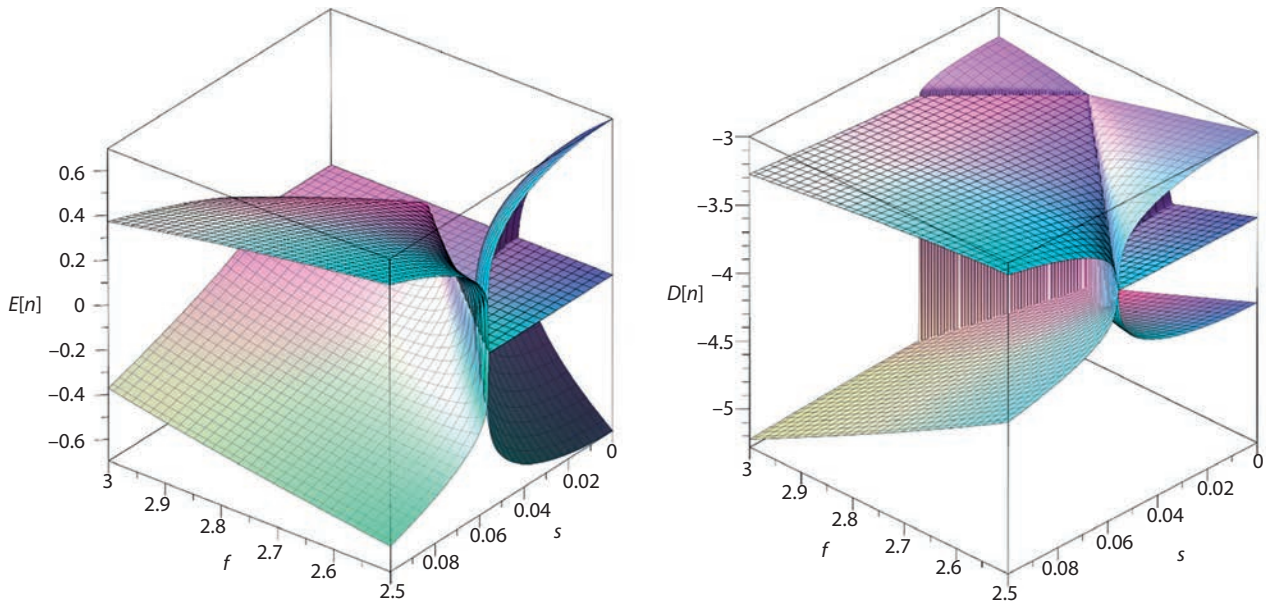


Рис. 4. Двухпараметрическая зависимость комплексного спектра ФМ от параметров фазы связей между резонаторами $\arg(g_n) = \pi ns/4$ и параметров связи с внешними волноводами $k_n = 1 + nf$ в трёхмерной форме вблизи критических областей.

двумя параметрами $\{s, f\}$ и будет приводить к достаточно резким изменениям динамики и наблюдаемых величин, что безусловно можно использовать для повышения чувствительности подобных трансферных интерфейсов состояний в квантовой сенсорике. В рамках данного краткого сообщения мы ограничиваемся лишь доказательством того, что предложенная модель обладает принципиальной возможностью такой перестройки. При этом задача о поиске лагун в аналитической форме, или их применения для задач трансфера или контроля динамики является уже на порядок более сложной задачей. В предыдущих работах, посвящённых системам

связанных резонаторов, для оптимизации эффектов задержки сигнала мы уже применяли наличие особых точек для оптимизации качества и ширины полосы КП [7, 8], однако далеко не во всех изучаемых системах, тем более с нетривиальной петлевой геометрией соединения, существуют нужные для дальнейших исследований сильные эффекты вырождения линий. Здесь мы явно показываем, что в огромном пространстве параметров есть достаточно простое сечение (параметры $\{s, f\}$), где наблюдается практически всё богатство возможностей для получения множества отличных друг от друга спектрально-топологических характеристик.

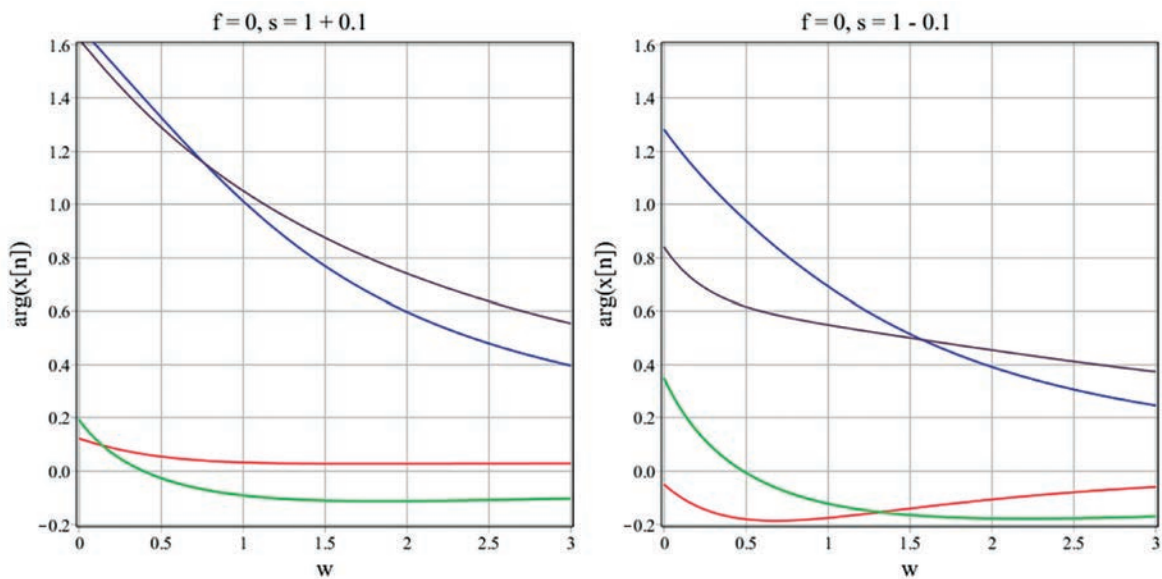


Рис. 5. Зависимость спектра аргумента мод резонаторов от лапласовой частоты ($w = i\nu$) при выгрузке начального симметричного состояния $x_n(0) = [1, 1, 1, 1]$ от хиральности распределения фаз связей $\arg(g_n) = \pi ns/4$ (цветами обозначены моды x_n разных резонаторов).

В исследуемой модели ФМ кольцевой формы присутствуют фактически все факторы для её дальнейшего изучения в приложении к хранению и управления квантовой информацией: есть зависимость от хиральности и сильная перестройка топологии спектра. На рис. 5 мы приводим зависимость параметров системы от хиральности.

Путём инверсии параметра s относительно значения $s = 1$ на величину от $1 - 0.1$ до $1 + 0.1$, что отвечает эффективной смене хиральности в распределении фаз связей, мы показываем, что лапласовы спектры мод сильно меняются, а сама система зависит от хиральных свойств. Конечно, мы сами сконструировали такие связи, но влияние фаз связей и их распределения на конечные спектры является нетривиальным, а в системах без кольцевой геометрии соединения подобные эффекты не наблюдаются. Таким образом, в данной системе становится возможно управление топологически нетривиальными эффектами.

Выводы

На примере модели кольцевой фотонной молекулы из четырёх высокодобротных микрорезонаторов теоретически продемонстрировано, что целенаправленное введение хиральной асимметрии через управление фазовыми набегам и коэффициентами связи является эффективным механизмом формирования нетривиальных топологических состояний. Установлено, что, несмотря на асимметричное распределение параметров связи и их фаз, комплексный спектр собственных частот системы сохраняет симметричную структуру. Ключевым следствием хиральности является радикальное перераспределение интенсивностей оптического поля между модами отдельных резонаторов,

что указывает на глубокую связь между геометрией конфигурации и локализацией состояний.

Ключевым результатом работы является теоретическое обоснование протокола управления топологическим порядком и спектром системы. Показано, что варьирование асимметрии связи и фазовых набегов позволяет не только настраивать общие спектрально-топологические характеристики, но и целенаправленно индуцировать режимы двукратного и трёхкратного вырождения – особые точки неэрмитовой физики. Подобные управляемые особые состояния открывают перспективы для реализации эффекта низкочастотных биений и могут лечь в основу новых протоколов квантовой памяти, основанных на топологически защищённых модах.

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 (Рег. номер НИОКТР 125012300688-6).

Литература

1. Han H., et al.: *Laser & Photonics Reviews* **19**, 1 (2025)
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. Li Y., et al.: *Laser & Photonics Reviews* **11**, 2 (2017)
10. Guo Q., et al.: *Nature Photonics* **16**, 9 (2022)
11. Yang K.Y., et al.: *Nature Photonics* **12**, 5 (2018)

Автоматизация настроек специализированного магнитно-резонансного томографа

В. Л. Одиванов, Я. В. Фаттахов, А. Р. Фахрутдинов, В. А. Шагалов, А. А. Баязитов

Лаборатория методов медицинской физики

Описана структура программного комплекса специализированного магнитно-резонансного томографа, программные средства для оптимизации процедур измерений и автоматизации настроек аппаратуры МРТ в процессе эксплуатации, а также при разработке новых компонент приёмно-передающей системы.

Automation of specialized magnetic resonance imaging system's settings

V. L. Odivanov, Ya. V. Fattakhov, A. R. Fakhrutdinov, V. A. Shagalov, A. A. Bayazitov

Laboratory of medical physics

The structure of the specialized magnetic resonance imaging system's software package, software tools for optimizing measurement procedures and automating the settings of MRI equipment during operation, as well as during the development of new components of the receiving and transmitting system are described.

Введение

Магнитно-резонансная томография (МРТ) на сегодняшний день является одним из наиболее эффективных методов медицинской диагностики заболеваний. В настоящее время в мире наблюдается повышение интереса к средне- и низкополевой томографии. Это обусловлено, во-первых, физическими характеристиками спиновых систем в низких магнитных полях, во-вторых, совершенствованием аппаратно-программного обеспечения, значительно повышающим диагностические возможности таких систем. К достоинствам таких томографов можно отнести также невысокую стоимость и простоту обслуживания.

В настоящее время в лаборатории методов медицинской физики совместно с ООО “Градиент МРТ” разработан и изготовлен опытный образец специализированного магнитно-резонансного томографа на базе постоянного магнита с индукцией поля 0.4 Тл.

Созданный магнитно-резонансный томограф представляет собой аппаратно-программный комплекс, предназначенный для обследования суставов пациентов. Аппаратная часть установки включает постоянный магнит с индукцией магнитного поля 0.4 Тл с рабочим зазором 206 мм и системой градиентных катушек, набор датчиков для обследования различных суставов пациентов или мелких лабораторных животных, передающую и приёмную аппаратуру, усилители токов градиентов и радиоспектрометр, обеспечивающий управление всем комплексом в процессе сканирования томограмм или из-

мерений. Спектрометр связан с компьютером со встроенными платами АЦП и цифрового интерфейса.

Программное обеспечение аппаратно-программного комплекса состоит из следующих частей:

1. Приложение MRScan, предназначенное для:
 - Ведения базы данных пациентов для сохранения результатов обследований.
 - Загрузки модулей методик сканирования или измерений.
 - Настройки параметров методик для получения нужных результатов.
 - Взаимодействия с аппаратурой спектрометра через систему драйверов при выполнении сканирования и измерений.
 - Настройки аппаратуры для оптимизации условий обследования.
 - Визуализации результатов сканирования или измерений в виде графиков и изображений.
 - Сохранения полученных изображений или графиков в базе пациентов.
 - Визуализации ранее сохранённых результатов.
 - Выполнение расчётов характеристик по изображениям и графикам результатов, представление их результатов в форме числовых данных и графиков.
2. Набор драйверов устройств для взаимодействия со встроенными платами: АЦП, цифровой интерфейс, а также некоторыми устройствами в составе радиоспектрометра: синтезатором частоты, формирователями градиентов, программатором последовательностей. Это позволяет обеспечивать единое взаимодействие

приложения с различными вариантами реализации аппаратных модулей. Драйверы реализованы в виде динамически загружаемых библиотек (DLL).

3. Набор модулей методик сканирования изображений и измерения ЯМР-характеристик объектов. Модули реализуют различные функции использования томографа при взаимодействии с основным приложением. Модули имеют универсальный программный интерфейс с приложением MRScan, что позволяет реализовывать различные способы применения томографа для проведения обследований пациентов и научных исследований. Каждый модуль имеет собственный набор параметров настройки режимов, обеспечивая гибкость использования для выполнения заданных функций. Модули реализованы в виде динамически загружаемых библиотек (DLL).
4. Приложение, которое обеспечивает возможность разработки новых модулей сканирования или измерений для использования вместе со стандартным набором. Для этого используется библиотека функций и макросов, которые могут включаться в разрабатываемый модуль на языке программирования C++, обеспечивая средства компиляции кода импульсных последовательностей, а также функции обработки данных и передачу результатов в приложение MRScan. Для редактирования кода новых методик используется внешний текстовый редактор, а для создания файлов методик – компилятор из состава среды разработки MS Studio.

Важным аспектом для получения качественных результатов при выполнении сканирования или измерений является оперативная настройка аппаратуры перед про-

ведением исследований. Для этого аппаратные средства располагают элементами настройки, управляемыми из приложения. Также для получения качественных результатов требуется совершенствование методик проведения сканирования или измерений. Для достижения указанных целей разработаны следующие программные модули специализированного МРТ, позволяющие автоматизировать процесс настройки аппаратуры.

Настройка приёмных катушек датчика на резонансную частоту, получение АЧХ

Приёмно-передающая система для исследования объекта включает в себя передающий контур для возбуждения спин-системы объекта и приёмный контур для детектирования сигнала ЯМР. Контуров выполняется по схемам параллельного колебательного контура со схемами согласования и развязки. Контуров настраиваются на рабочую резонансную частоту ЯМР для выбранного ядра. При помещении в приёмный контур исследуемого объекта его резонансная настройка изменяется за счёт паразитных ёмкостей витков катушки с объектом. Чтобы компенсировать расстройку, в схеме предусилителя, к которому подключается приёмный контур, предусмотрены варикапы, управляемые напряжением со специальных цифро-аналоговых преобразователей, управляемых программно из приложения. Ручная настройка выполняется при наблюдении сигнала свободной индукции (ССИ) по максимальной амплитуде. При настройке также осуществляется контроль исправности компонент датчика.

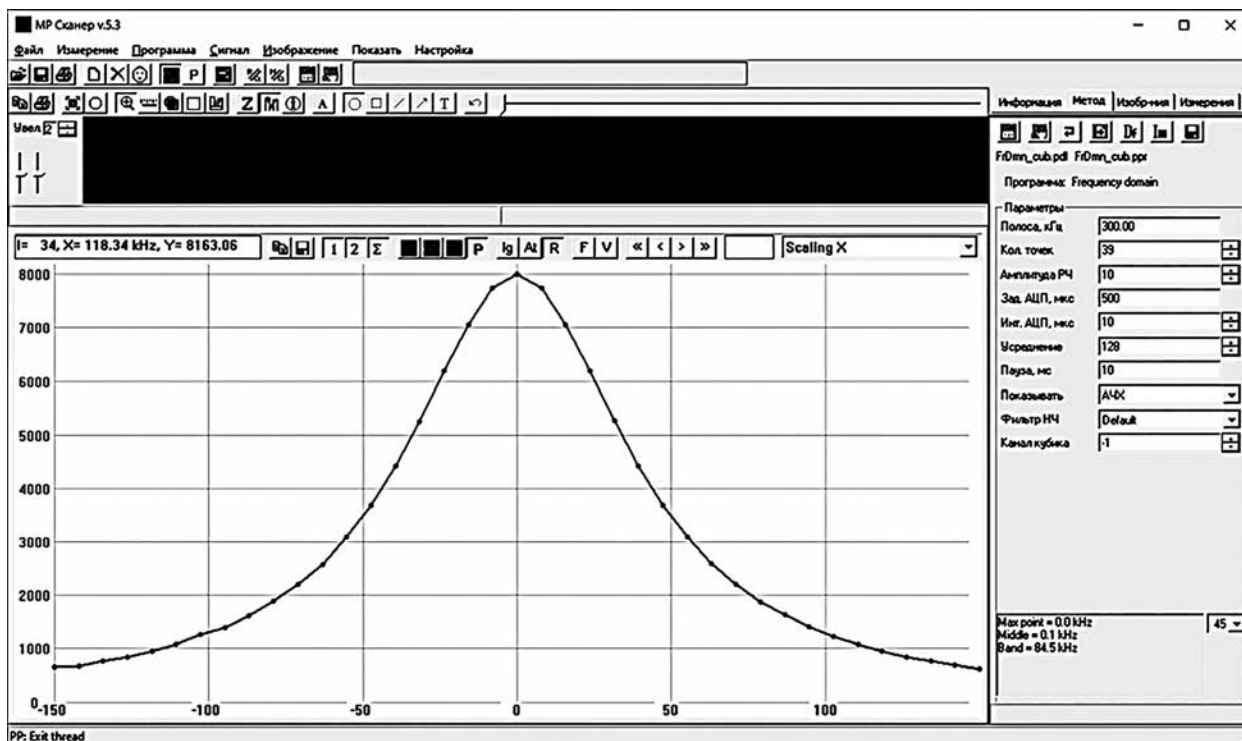


Рис. 1. Диалоговое окно приложения MRScan с загруженным модулем измерения частотных характеристик.

При разработке новых датчиков и контроле исправности часто требуется наблюдение частотной характеристики приёмного контура. Для этой цели разработан модуль методики FrDmn.pdl, который позволяет наблюдать графики амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик приёмного контура [1]. Измерение производится при возбуждении сигналом штатного передатчика томографа, подаваемого на катушку-зонд, помещённую на некотором расстоянии от датчика. В модуле можно задать диапазон частот для наблюдения характеристик, а также некоторые параметры сканирования, определяющие скорость и точность результатов. При получении резонансной кривой вычисляется её ширина в килогерцах на уровне 0.707 от максимума для вычисления добротности контура. На рис. 1 представлено диалоговое окно приложения MRScan с загруженным модулем измерения частотных характеристик. Синтезатор радиоспектрометра томографа обеспечивает получение до 39 точек на графике АЧХ, полоса частот может достигать нескольких мегагерц. Применение модуля позволяет существенно облегчить исследование характеристик сложных схем приёмных контуров датчика и их настройку.

Настройка рабочей частоты радиоспектрометра на резонанс по сигналу спада свободной индукции

Наблюдаемые сигналы ЯМР представляют собой две квадратурные компоненты, представленные на рис. 2. При вычислении фазы квадратурных компонент по скорости её изменения можно вычислить сдвиг частоты. Это выполняется как в модуле методики, включающем измерение ССИ, так и в приложении MRScan в модуле наблюдения графиков. Возможно также вычисление сдвига частоты по сигналу спинного эха в модулях сканирования изображений. Для автоматизации настройки вычисленное значение сдвига частоты передаётся в модуль драйвера управления синтезатором частоты [2]. Модуль включает в себя диалоговое окно управления, представленное на рис. 3.

Элементы управления диалогового окна позволяют выбрать рабочее ядро или задать его гиромангнитное отношение, вычислить рабочую частоту по заданному значению индукции поля. Полученное значение сдвига

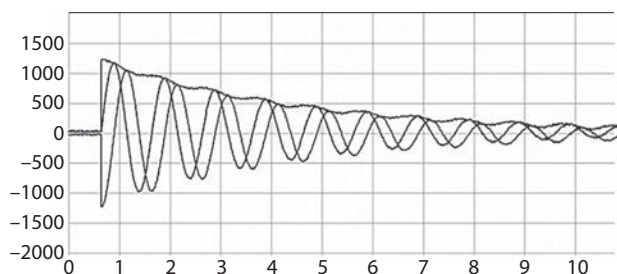


Рис. 2. Типичный вид сигнала свободной индукции при неточной настройке на резонанс.

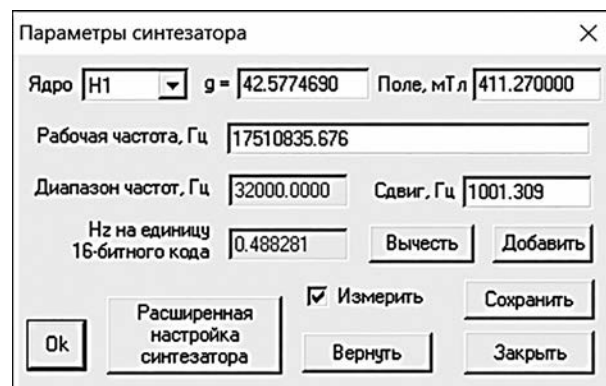


Рис. 3. Диалоговое окно управления синтезатором.

частоты из приложения при установленном флажке “Измерить” показывается в окне “Сдвиг, Гц”, при нажатии кнопки “Добавить” это значение добавляется к вычисленной частоте, и рабочая частота настраивается на ЯМ-резонанс. При снятом флажке можно задать фиксированный шаг частоты для поиска резонанса добавлением или вычитанием шага с наблюдением ССИ. Использование автоматизации настройки частоты позволяет сократить время подготовки к обследованиям.

Коррекция смещений базовых линий АЦП

При измерении сигналов ЯМР базовые уровни могут быть смещены от нулевого значения. Это приводит к тому, что график амплитуды сигнала, вычисленный как квадратурная сумма компонент, будет искажён. Это создаёт неудобство в процессе настройки аппаратуры, хотя и не приводит к искажению результатов при применении накопления с переменной фазой возбуждения. Смещения вычисляются усреднением кодов АЦП в модуле отображения графиков приложения при запуске методики ССИ с выключенным сигналом возбуждения. После этого уровни вычитаются из измеренных данных, коррекция осуществляется в модуле драйвера АЦП. Модуль драйвера АЦП включает диалоговое окно управления, показанное на рис. 4.

Вычисленные смещения при запущенной импульсной программе автоматически передаются в модуль драйвера и отображаются в текстовых полях справа. При уста-

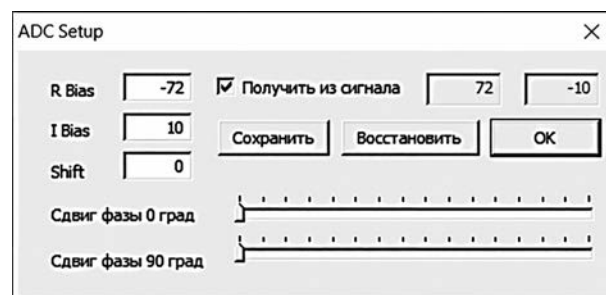


Рис. 4. Диалоговое окно управления АЦП.

новленном флажке “Получить из сигнала” эти значения переносятся в поля слева. Кнопка “ОК” закрывает окно с применением установленных смещений из полей слева, а кнопка “Сохранить” позволяет сохранить заданные в этих полях значения смещений в реестре Windows и впоследствии загружать их в драйвер при запуске приложения. Окно также позволяет регулировать в некоторых пределах фазы компонент сигналов ЯМР.

На разработанный программный модуль подана заявка на получение Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ (Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Баязитов А.А. Программный модуль для автоматической компенсации смещения каналов АЦП, регистрирующих сигнал ЯМР. Заявка № 2025696758 от 15 декабря 2025 г.).

Накопление сигналов ЯМР с переменной фазой возбуждения

При регистрации сигналов ЯМР возникают некоторые аппаратные и методические сложности:

- Неравенство коэффициентов передачи каналов компонент квадратурного спада.
- Смещения базовых линий каналов компонент спада.
- Сдвиг фаз опорных сигналов детектирования компонент не равен 90 градусов.
- В некоторых методиках сигналы ЯМР содержат аддитивные артефакты.

В импульсных программах сканирования или измерений для повышения соотношения сигнал-шум используется накопление результатов с повторением циклов при постоянных параметрах последовательности. Если использовать накопление с количеством, кратным двум или четырём, можно использовать в импульсной последовательности изменение фазы возбуждающего радиочастотного импульса в цикле 0–180 или 0–90–180–270 градусов, соответственно, с последующей обработкой полученных сигналов с учётом сдвига фаз. Такой алгоритм позволяет существенно снизить влияние перечисленных сложностей на конечный результат за счёт компенсации их влияния при обработке. Программные средства накопления с переменной фазой возбуждения [3] реализуются в модулях методик сканирования и измерений в функциях формирования кода импульсной последовательности и в функциях обработки измеренных данных. Режим накопления с переменной фазой реализован во всех разработанных модулях стандартных

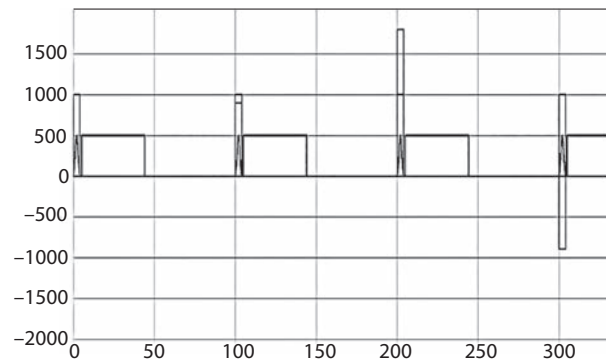


Рис. 5. Диаграмма цикла накопления ССИ.

методик сканирования изображений и измерений. На рис. 5 показана диаграмма цикла накопления импульсной последовательности наблюдения ССИ с четырьмя изменениями фазы возбуждения на 90 градусов.

Выводы

Все разработанные программные модули интегрированы в программное обеспечение специализированного томографа и служат для облегчения процедуры настроек перед сканированием, повышая удобство работы, качество изображений и достоверность результатов измерений. На разработанные программные модули получены Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Литература

1. Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Баязитов А.А.: Программный модуль измерения амплитудно-частотной характеристики приёмного контура. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2025695845. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 15.12.2025 г.
2. Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Баязитов А.А.: Программный модуль для автоматической настройки частоты синтезатора на резонанс. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2025697712. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 26.12.2025 г.
3. Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Баязитов А.А.: Программный модуль для реализации возможности накопления данных с переменной фазой возбуждения. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2025697785. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 26.12.2025 г.

Формирование микроструктур на поверхности кремния мощными световыми импульсами для повышения эффективности солнечных элементов

Б. Ф. Фаррахов

Лаборатория методов медицинской физики

Получены различные формы текстурированной поверхности на Si-пластинах ионным легированием с последующим импульсным световым нагревом. Определено влияние некоторых режимов ионного легирования ионами As^+ , In^+ , Mn^+ и импульсного светового нагрева на механизм формирования рекристаллизованных рельефных периодических микроструктур из расплавленной фазы на поверхности Si.

Forming microstructures on the surface of silicon by powerful light pulses to improve the efficiency of solar cells

B. F. Farrakhov

Laboratory methods of medical physics

Various textured surface shapes were obtained on Si wafers by ion implantation followed by pulsed light heating. The effects of certain ion implantation modes with As^+ , In^+ , and Mn^+ ions and pulsed light heating on the formation mechanism of recrystallized textured periodic microstructures from the molten phase on the Si surface were determined.

Введение

Солнечная энергетика занимает всё более возрастающее положение в производстве электричества в мире благодаря тому факту, что является возобновляемым источником энергии, не оказывающим вредного воздействия на экологию [1]. Первостепенными для текущего и будущего развития отрасли являются удешевление, упрощение производства и улучшение технических характеристик преобразователей световой энергии в электрическую [2, 3]. В настоящей статье будет рассмотрен вариант улучшения физических свойств и технических характеристик подобных устройств.

Инженеры и учёные реализуют различные методы совершенствования параметров солнечных элементов для увеличения КПД. Общая эффективность солнечного элемента зависит от многих факторов, среди которых состав полупроводника, температура, контакты и металлизация, тип просветляющего покрытия, концентрация легирующего вещества и топология слоёв элемента, а также герметизация. Как известно, Si является основным полупроводником, который используется для производства фотоэлектрических элементов, поскольку энергетическая ширина полосы поглощения совместима с большей частью солнечного спектра, он широко распространён в природе, технологии его обработки досконально отработаны. В настоящее вре-

мя производство многих солнечных элементов основано на производстве мульти-/микро-/поликристаллического и монокристаллического кремния (c-Si), причём последний отличается наибольшей эффективностью. Одним из наиболее перспективных направлений в повышении КПД является создание направленного рассеивания и увеличение площади поверхности, что равносильно снижению коэффициента отражения поверхности или увеличению поглощательной способности солнечных элементов. Увеличение площади поверхности достигается за счёт текстурирования, т.е. формирования на поверхности фотоэлементов уникальных рельефных структур, отличающихся различными формами, размерами и плотностями [4].

Сегодня известны различные методы текстурирования поверхности полупроводников для использования в оптоэлектронике [2–8]. Для c-Si-элементов также было разработано множество технологий обработки поверхности. Среди них на сегодняшний день вызывают наибольший интерес методы создания таких структур, как нанонити и нанопроволоки [7, 8] и создание рельефных микроструктур, образующихся при ионном легировании (ИЛ) и импульсном световом нагреве (ИСН) [9, 10]. В представленной работе в дополнение к ранее опубликованным результатам [11] рассматривается новый подход к выбору режимов ИЛ и ИСН с целью эффективного микроструктурирования поверхности c-Si.

Эксперимент

В качестве образцов для исследования использовались пластины *c*-Si марки КДБ-1 с кристаллографической ориентацией поверхности (100).

ИЛ проводилось на ускорителе ИЛУ-3 ионами As^+ с энергией $E = 50$ кэВ и дозой $D = 3.12 \cdot 10^{16}$ ион/см², ионами Mn^+ с энергией $E = 30$ кэВ и дозой $D = 2 \cdot 10^{16}$ ион/см². Также образец Si (100) был последовательно легирован ионами In^+ и As^+ с энергией $E = 30$ кэВ и дозами по $D = 2 \cdot 10^{16}$ ион/см².

ИСН образцов проводился импульсами секундных длительностей излучением галогенных ламп накаливания на установке Импульс-6 с плотностью мощности излучения ламп $w = 20$ Вт/см² при различных длительностях импульса.

Модифицированные поверхности образцов Si анализировались на оптическом микроскопе МБС-9. Сформированные структуры регистрировались на цифровую камеру. Отражательная способность сформированных структур измерялась с использованием зондирования лучами полупроводниковых лазеров мощностью $P = 5$ мВт, с диаметром пучка 1.1 мм, под углом 45° к нормали образца на длинах волн $\lambda_b = 405$ нм, $\lambda_g = 532$ нм и $\lambda_r = 650$ нм. Плоскость поляризации была выставлена параллельно поверхности. Регистрация интенсивности отражённых лучей выполнялась фотодиодом ФД-24К и цифровым мультиметром.

Профили распределения ионов по толщине образца рассчитывались на программе TRIM (Transport of Ions in Matter), которая является ядром пакета программ SRIM(The Stopping and Range of Ions in Matter)-2013. Программа разработана Ф. Ц. Джеймсом и П. Б. Йохеном в 1983 году [12] и постоянно совершенствовалась. TRIM основан на методе моделирования Монте-Карло, а именно на приближении бинарных столкновений со случайным выбором параметра удара следующего сталкивающегося иона. В программе моделируются все процессы взаимодействия налетающей частицы и атомов мишени. В качестве входных параметров задаются тип иона и энергия (в диапазоне 10 эВ – 2 ГэВ) и материал одного или нескольких слоёв мишени. SRIM позволяет с высокой точностью моделировать: ионизационные потери энергии частиц в веществе; энергетические спектры ядер отдачи; 3D-траектории частиц с учётом многократных столкновений с атомами; процессы легирования ионных примесей в вещество; позволяет вычислять электронную останавливающую способность любого иона в любом материале (включая газообразные мишени) на основе усредняющей параметризации широкого спектра экспериментальных данных.

Результаты и обсуждение

Были сформированы слои с различными типами примеси, значениями концентрации и профилями распределения по глубине. Профили распределения внедрённой примеси, рас-

считанные на программе SRIM-2013, представлены на рис. 1. Формируются слои *n*-типа и электрически нейтральные слои в Si *p*-типа путём ИЛ ионами Mn^+ и As^+ с распределениями примеси на глубинах до $d = 800$ Å и $d = 640$ Å, соответственно. При последовательном ИЛ акцепторными и донорными ионами In^+ и As^+ формируется суммарный слой с глубиной распределения до $d = 540$ Å (рис. 1).

На рис. 2а–в показаны микрофотографии структур на поверхности Si-образцов, полученных после ИСН с плотностью мощности $w = 20$ Вт/см² и длительностью 6 с на установке Импульс-6. Видно, что мощные световые импульсы галогенных ламп приводят к образованию рельефных поверхностей различной формы и плотности. Ранее нами было показано, что локальные области плавления образуются на ростовых дефектах монокристаллического Si или на дефектах, введённых ИЛ [9]. Если на Si, легированном ионами As^+ , наблюдаются фигуры правильной формы и с относительно упорядоченным расположением (рис. 2а), то в других случаях видны случайно расположенные микрофигуры неправильной формы. Вероятно, вклад в удлинённую форму микроструктур на рис. 2в внесла именно ИЛ ионами In^+ . То обстоятельство, что условия ИСН для всех образцов были идентичными, а энергия ионов Mn^+ и In^+ была одинаковой, позволяет предположить, что ключевую роль в формообразовании играет именно атомная масса легируемых элементов. Существенную роль играют также процессы рекристаллизации Si в течение светового импульса до достижения образцом температуры локального плавления.

Для модифицированных Si-образцов были измерены коэффициенты отражения R_{ang} под углом к соответствующим поверхностям структур, и проведено их сравнение со значениями для исходных поверхностей R_{ini} . Результаты измерений представлены в табл. 1. Сравнение микрофотографий на рис. 2 показывает, что на изменение R_{ang} оказали существенное влияние формы рельефных структур. Это можно ясно увидеть при сопоставлении микрофотографии на рис. 2б и д. Данные структуры внесли заметный вклад в уменьшение коэффициента отражения.

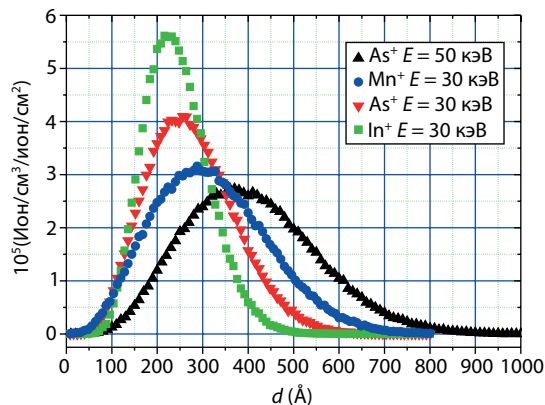


Рис. 1. Профили распределения после ИЛ в Si ионов As^+ с энергией $E = 50$ кэВ, ионов Mn^+ с энергией $E = 30$ кэВ и последовательно ионами In^+ и As^+ с энергиями по $E = 30$ кэВ, рассчитанные на программе SRIM-2013 для пробега $2 \cdot 10^5$ ионов.

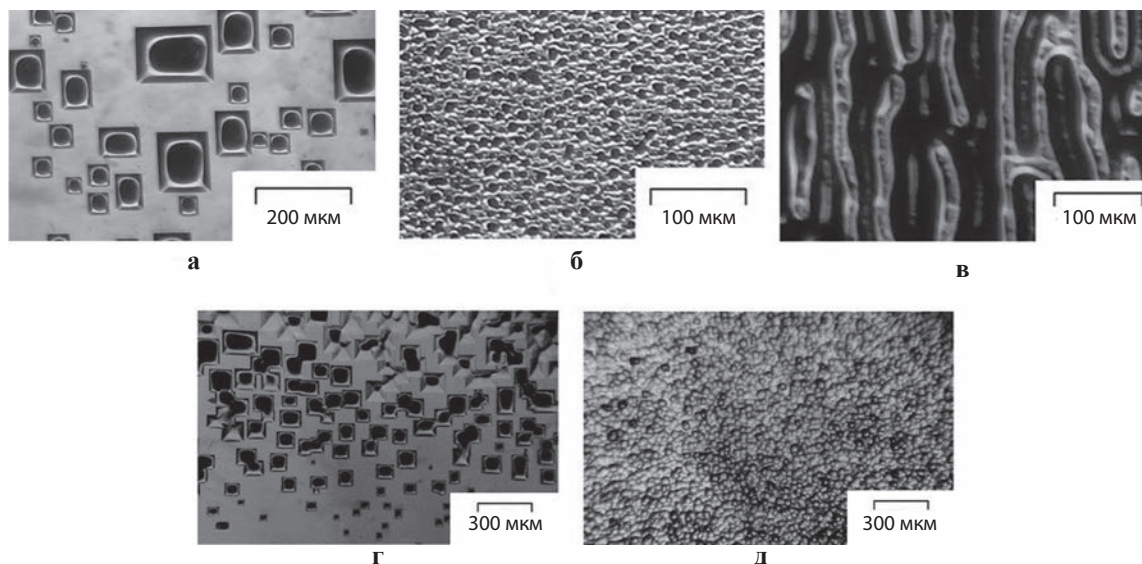


Рис. 2. Микрофотографии поверхности легированного Si (100): **а** ионами As⁺ с энергией $mE = 50$ кэВ и дозой $D = 3.1 \cdot 10^{15}$ ион/см²; **б** ионами Mn⁺ с энергией легирования $E = 30$ кэВ и дозой $D = 2 \cdot 10^{16}$ ион/см²; **в** ионами In⁺ и As⁺ последовательно энергиями легирования $E = 30$ кэВ и дозами $D = 2 \cdot 10^{16}$ ион/см² для каждого) после ИСН длительностью $t = 6$ с. Для сравнения представлены фотографии, полученные нами ранее после обработки на установке УОЛ.П-1: нелегированного Si КДБ-1 (100) при плотности мощности светового импульса $w = 1200$ Вт/см² и длительностях 70 мс (**г**) и 90 мс (**д**) (поверхность перед ИСН была шлифована) [11].

Таблица 1. Коэффициент отражения поверхности Si до и после формирования рельефных структур.

Рисунок	Ион/ E (кэВ)/ D (ион/см ²)	λ (нм)	R_{ini}	R_{ang}	$(R_{ini} - R_{ang})/R_{ini} \cdot 100\%$
2а	As ⁺ /50/3.1·10 ¹⁵	405	0.46	0.46	0
		532	0.36	0.35	1
		630	0.34	0.31	3
2б	Mn ⁺ /30/2·10 ¹⁶	405	0.46	0.46	0
		532	0.36	0.34	2
		630	0.34	0.33	1
2в	In ⁺ и As ⁺ / по 30/по 2·10 ¹⁶	405	0.46	0.46	0
		532	0.36	0.34	2
		630	0.34	0.30	4
2г	Без ИЛ	405	0.46	0.43	3
		532	0.36	0.32	4
		630	0.34	0.27	7
2д	Без ИЛ	405	0.46	0.45	1
		532	0.36	0.33	3
		630	0.34	0.28	6

Выводы

Показано, что ионное легирование с последующим импульсным световым нагревом позволяет получать различные морфологические состояния на изначально гладких поверхностях полупроводниковых подложек, в частности Si. Получаемые таким образом микро-структуры могут представлять интерес в разработке компонентов солнечной энергетики для увеличения площади поверхности.

Благодарности

Автор выражает благодарность Р. И. Баталову за подготовку и предоставление некоторых образцов для экспериментов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН: “Физика функциональных материалов и гибридных мезоскопических структур для микро-электроники, энергетики и информационных технологий”. Руководитель: Л. Р. Тагиров. Номер регистрации в ЕГИСУ 125031903979-7.

Литература

1. Королёва Д.А., Целищев В.А., Шайдаков В.В.: Солнечная энергетика, 140 с. Москва: Инфа-Инженерия, 2023.
2. Upadhyay R., Tripathi M., Pandey A.: High Energy Chemistry **47**, No. 6, 308–314 (2013)
3. Guijarro N., Prevot M., Sivula K.: Phys. Chem. Chem. Phys. **24**, 15655–15674 (2015)
4. de Lima Monteiro D.W., Honorato F.P., de Oliveria Costa, Salles L.P.: Int. J. Photoenergy Art. ID 743608 (2012)
5. Lee H.-S., Suk J., Kim H., Song J., Jeong D.S., Park J.-K., Kim W.M., Lee D.-K., Choi K.J., Ju B.-K., Lee T.S., Kim I.: Sci. Rep. **8**, Art. No. 3504, 1–12 (2018)
6. Fedorenko L., Medvid A.: Adv. Mater. Res. **1117**, 9–14 (2018)
7. Stepanov A.L., Farrakhov B.F., Fattakhov Ya.V., Rogov A.M., Kononov D.A., Nuzhdin V.I., Valeev V.F.: Vacuum **186**, 110060–110064 (2021)
8. Гаврилова Т.П., Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Хантимеров С.М., Нуждин В.И., Рогов А.М., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А., Степанов А.Л.: ЖТФ **96**, № 12, 1827–1832 (2022)
9. Фаттахов Я.В., Баязитов Р.М., Хайбуллин И.Б., Львова Т.Н., Ерёмин Е.А.: Изв. РАН. Сер. физ. **59**, № 12, 136–142 (1995)
10. Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Галаяутдинов М.Ф.: ПТЭ **2**, 93–98 (2019)
11. Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Степанов А.Л.: Изв. РАН. Сер. физ. **88**, No. 11, 1099–1103 (2024)
12. Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U.: The Stopping and Range of Ions in Solids. NY: Pergamon Press, 1985 (new edition in 2008). 321 p.

Диагностика заболеваний голоса педагогов. Разработка программного модуля для измерения амплитуды и энергии формант голоса

А. А. Баязитов, М. Я. Фаттахова, Р. Р. Бадриева¹, В. Л. Одиванов, Я. В. Фаттахов

Лаборатория методов медицинской физики

¹ МАОУ “Средняя общеобразовательная школа №18 с углублённым изучением английского языка” Вахитовского района г. Казани

Проведённые исследования голосовой функции “профессионалов голоса” – преподавателей ВУЗов и учителей школы – показали широкую распространенность заболеваний голоса. Анализ результатов выявил необходимость доработки некоторых модулей программного обеспечения. Создан программный модуль, позволяющий разрабатывать новые методики диагностики голосовых нарушений с применением спектрального анализа голоса и магнитно-резонансной томографии, а также оригинальные методики реабилитации пациентов с голосовыми нарушениями.

Diagnosis of voice diseases of teachers. Development of a software module for measuring the amplitude and energy of voice formants

A. A. Bayazitov, M. Ya. Fattakhova, R. R. Badrieva¹, V. L. Odivanov, Ya. V. Fattakhov

Laboratory of medical physics

¹ Municipal autonomous educational institution “Secondary general education school No. 18 with advanced study of English”, Kazan

The conducted studies of the vocal function of “voice professionals” – university teachers and school teachers – have shown a wide prevalence of voice diseases. The analysis of the results revealed the need to refine some software modules. A software module has been created that allows the development of new methods for the diagnosis of vocal disorders using spectral analysis of voice and magnetic resonance imaging, as well as original methods for the rehabilitation of patients with vocal disorders.

Введение

Функциональные и органические нарушения органов голосообразования широко распространены у так называемых “профессионалов голоса” – вокалистов, преподавателей вузов, учителей школ, а также у работников промышленных предприятий с химическим и пылевым загрязнением. Серьёзные проблемы с голосообразованием, требующие длительной реабилитации, наблюдаются сейчас у переболевших COVID.

В настоящее время физические методы широко используются для диагностики различных заболеваний пациентов. Важная область акустики – физиологическая акустика – непосредственно связана с жизнедеятельностью человека и относится к исследованиям органов и процессов формирования голоса.

Диагностика голосовых нарушений находится на стыке физической акустики, лучевой диагностики, вокального искусства, оториноларингологии, психологии, неврологии, и поэтому требует комплексного подхода

для её решения. Комплексный подход включает в себя помимо наличия комплекса информативных методик для всесторонней диагностики также и участие в работе команды специалистов, которые владеют современными методами диагностики и лечения функциональных и органических нарушений голоса.

Ранее нами [1] была проанализирована заболеваемость педагогов зарубежных стран: США [2], Франции [3, 4], Нидерландов [5]. По литературным данным, от 40 до 60% педагогов страдают заболеваниями голосового аппарата. Поэтому в настоящей работе мы решили начать изучение этой группы пациентов в нашей стране, а именно педагогов вузов и средней школы в Казани.

В настоящее время в оториноларингологии в зависимости от решаемых задач и диагностируемого органа широко применяются как активные, так и пассивные акустические методы. Среди пассивных методов исследований наибольшее развитие получил компьютерный акустический анализ голоса – оценка фонаторной функции голосового аппарата.

Эксперимент

В лаборатории методов медицинской физики КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН был разработан и создан свой программно-аппаратный комплекс (ПАК) для компьютерного спектрального анализа голоса, не уступающий по основным техническим характеристикам импортным аналогам [6, 7]. ПАК позволяет получить объективную информацию о функционировании голосового аппарата в дополнение к субъективным ощущениям пациента и традиционному слуховому анализу голоса фонопедом, вокальным физиологом, вокальным педагогом [6].

Комплекс даёт возможность записать с применением специальных тестов голос пациента, провести анализ спектра, сравнить с эталоном, выявить недостатки и выработать рекомендации для разработки индивидуальной методики реабилитации [6, 7].

Мы проводили диагностику пациентов с последовательным применением трёх дополняющих друг друга методик. Первая методика – запись специальных голосовых тестов с использованием созданного нами программно-аппаратного комплекса для компьютерного спектрального анализа голоса. Вторая методика – видеостробоскопия гортани – стандартная методика клинической оториноларингологии.

Третья методика применялась в более сложных случаях: мы использовали магнитно-резонансную томографию грудного и шейного отделов позвоночника и органов головы. Магнитно-резонансная томография выполнялась на томографе Siemens Verio с индукцией магнитного поля 3.0 Тл как в режиме традиционной стационарной томографии, так и в режиме динамической томографии. Факторами, усложняющими диагностику и лечение, были: возраст, сопутствующие заболевания, в том числе онкологические, операции, а затем и заболевание COVID.

Магнитно-резонансная томография позволяет выявить органические нарушения органов голосообразования, приводящие к болевым ощущениям в горле, затруднениям в голосоизвлечении. Проведены также исследования гортани в динамике. В последние годы появились работы по разработке методик для обследования различных органов пациентов с высоким временным разрешением.

На первом этапе работы проводился опрос педагогов о состоянии голосовой функции. Ниже приведены результаты опроса. Общее количество учителей в школе – 105 чел. Опрошены (дали ответы) 65 чел., то есть 62% от общего количества. Все опрошенные – женского пола. Имели проблемы с голосом 34 человека (32.3% от общего количества учителей или 53.8% от опрошенных). Симптомы: осиплость, сухость во рту, изменение тембра голоса. К врачу обращались только 3 человека, что составляет 8.8% от количества педагогов, имевших проблемы с голосом.

ПАК для компьютерного спектрального анализа голоса позволяет получить цифровой портрет голоса педагога для последующего анализа: частоту основного тона, частотный диапазон голоса, распределение энергии

по гармоникам, максимальную длительность фонации и др. Известно, что при длительном патологическом состоянии голоса возникает, так называемая “привычная осиплость”, то есть звучание нездорового голосового аппарата. Продолжение эксплуатации голосового аппарата педагогом в состоянии нездоровья усложняет процесс реабилитации, а восстановление, в свою очередь, требует более длительного лечения.

Распространенность нарушений голоса зависит от возраста педагогов, стажа преподавания, учебной нагрузки, психологического состояния. Например, известно, что проблемы с голосом преподаватели-женщины имеют в два раза чаще, чем преподаватели-мужчины.

Результаты этого исследования подтверждают, что преподавание является профессией с высоким риском развития проблем с голосом, что согласуется с результатами зарубежных исследователей. Эта информация должна быть использована для разработки программ медицинского просвещения, ориентированных на преподавателей – на группу высокого риска. Мероприятия по гигиене голоса в течение учебного года могут быть полезны для снижения утомления голоса, охриплости и других симптомов, связанных с преподаванием. Проблемы со здоровьем голоса могут иметь значительные последствия как для деятельности педагогов, так и экономики в целом [5].

С применением ПАК появляется возможность самому пациенту под контролем врача визуально отслеживать правильность исполнения упражнений для реабилитации.

Это позволяет корректировать процедуру реабилитации при необходимости и ускорить, таким образом, процесс восстановления голосовой функции, а также наглядно показать пациенту прогресс реабилитации особенно в сложных случаях, требующих более длительной реабилитации, что позволяет поддержать его на этом непростом пути.

По результатам диагностики нами было модернизировано программное обеспечение спектрального анализа. Были добавлены опции, позволяющие получать более детальную информацию о спектре голоса и распределении энергии по формантам для более тонкой диагностики заболеваний педагогов.

Описание программного модуля

Интерфейс модуля представлен на рис. 1.

Данный модуль позволяет с помощью ползунка в области 1 (рис. 1, нижняя часть экрана) выбрать отрезок на временной дорожке, который преобразуется модулем быстрого преобразования Фурье с частотой дискретизации 44100 Гц в спектр с областью частот от 20 до 20000 Гц, полученный спектр выводится в верхней части экрана

В области 2 (рис. 2) реализована возможность выбора параметров расчёта шкалы амплитуды спектра: логарифмическая, линейная, или квадратичная; размер

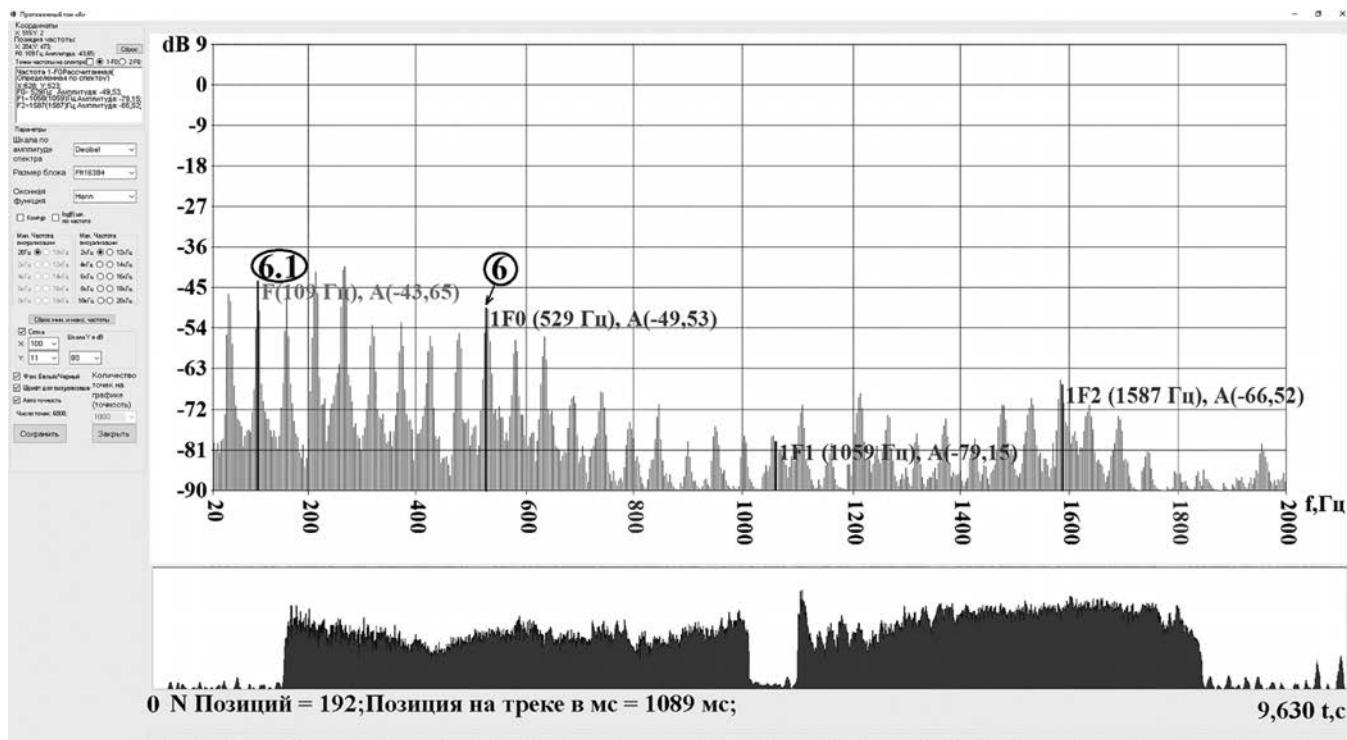


Рис. 1. Общий вид окна расчёта спектра голосовой дорожки.

блока (рекомендовано: Fft16384); оконная функция: без функции (None), Hann, Hamming, Blackman Harris (рекомендуется использовать функции Hann или Hamming).

В области 3 (рис. 3) можно выбрать, какую область частот рассчитанного спектра отобразить на экране.

В области 4 (рис. 4) реализован выбор параметра сетки и возможность включить/выключить сетку, как и отображение самой сетки и её шкалы на верхнем графике.

В области 5 (рис. 5) реализована возможность смены цвета фона и линий на графике, а также опция включения и выключения автоматической точности отображения числа баров на графике. Возможные отображения: для логарифмической шкалы по частоте создаётся матрица данных длиной 1000 значений, выбранных из рассчитанных значений, в области спектра от 20 до 20000 Гц; для линейной шкалы по частоте создаётся матрица данных

длиной 6000 значений, выбранных из рассчитанных значений в область спектра от 20 до 20000 Гц. Когда автоматическая точность выключена, можно самостоятельно выбрать число отображаемых бар: 1000, 2000, 4000, 6000. При меньшем числе точек выводятся данные с большим интервалом частоты между точками. Бóльшее число точек не позволяет определить частоту на графике программным путём.

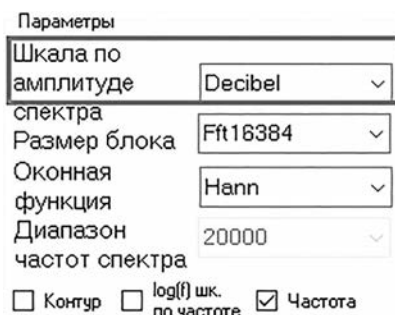


Рис. 2. Окно выбора параметров расчёта шкалы амплитуды спектра, размер блока, оконная функция.



Рис. 3. Окно выбора параметров отображения области частот спектра.



Рис. 4. Окно управления сеткой и отображение шкалы.



Рис. 5. Окно управления графиком: изменения фона и цвета графиков, функция автоматического или самостоятельного выбора количества выводимых точек на спектре частот, изменение шрифта для подписи.

В области 6 (рис. 6а и б) показано программное определение частоты. Рассчитанные данные спектра записываются в матрицы данных. При наведении курсора на область 6 и выборе, координаты сравниваются с данными, записанными в матрице данных спектра. Если не установлена “Точка частоты на спектре”, то выделенная частота подсветится (см. рис. 6б точка 6.1) оранжевым цветом с надписью “F (значение частоты), A (значение амплитуды на данной частоте)” и дополнительно будут выведены значения выше

надписи “Точка частоты на спектре”. Если установлена “Точка частоты на спектре” и выбрана одна из частот “1-F0” или “2-F0”, то 5 гармоник выбранной частоты F0 будут отображены на спектре с записью “iFj (значение частоты), A (значение амплитуды на данной частоте)”, где i – номер ряда (1-F0 или 2-F0), j – номер гармоники для частоты F0. Эти данные также записываются в область под надписью “Точка частоты на спектре”.

Вид спектра можно сохранить с помощью кнопки “Сохранить”. Кнопка “Закрыть” закрывает окно интерфейса.

Выводы

Применение методик спектрального анализа голоса особенно актуально и эффективно для профессионалов голоса: вокалистов, профессорско-преподавательского состава высших учебных заведений, учителей школ. Проведённые исследования показали необходимость доработки некоторых модулей программного обеспечения. Был разработан программный модуль для измерения амплитуды и энергии формант голоса.

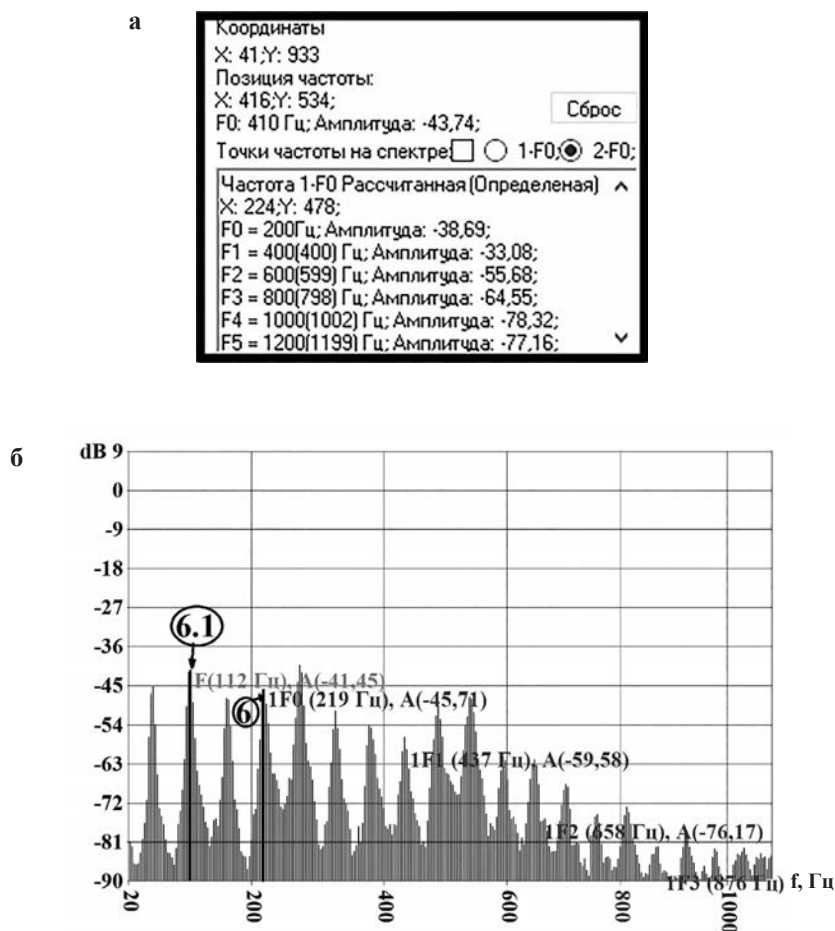


Рис. 6. а Окно отображения значений гармоник выбранной частоты, в скобках определённой по спектру, и амплитуда соответствующей частоты. б Окно отображения значений выбранной частоты и её гармоник.

Литература

1. Фаттахова М.Я., Баязитов А.А., Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Красножён В.Н., Ахатов А.Ф., Бекмачева Е.С.: Изв. РАН. Сер. Физическая. **89**, 1651–1659 (2025)
2. Nerrière E., Vercambre M-N., Gilbert F., Kovess-Masféty V.: BMC Public Health **9**, 370 (2009)
3. Gallinari C., Garsi J-P., Vercambre-Jacquot M-N.: Archives des Maladies Professionnelles et de L'Environnement **77**, No. 4, 650 (2016)
4. F. I. C. R. S., Kooijman P.G.C., Thomas G., et al.: Folia Phoniatica Logopaedica **58**, No. 3, 186 (2006)
5. Smith E., Gray S.D., Dove H., et al.: J. Voice **11**, No. 1, 81, (1997)
6. Фаттахова М.Я., Фаттахов Я.В., Хабилов Р.Ш., Красножён В.Н.: Способ диагностики и реабилитации пациентов с нарушениями голосо-речевой функции. Патент РФ № 2738660, кл. А61В5/00, 2020.
7. Хабилов Р.Ш., Фаттахова М.Я., Фаттахов Я.В.: Программный комплекс сбора и анализа данных для проведения диагностики пациентов с нарушениями голосовой функции. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666646, 2020.

Синтез, структура и электрохимические свойства композитных плёнок Ge–Ni, полученных магнетронным распылением

В. В. Базаров, В. Ф. Валеев, Р. Р. Гарипов, Н. М. Лядов, В. И. Нуждин,
Н. М. Сулейманов, В. А. Шустов, И. В. Янилкин

Лаборатория радиационной физики
Лаборатория физики углеродных структур и композитных систем

Методом магнетронного распыления на постоянном токе синтезированы композитные плёнки $\text{Ge}_x\text{Ni}_{1-x}$ ($x = 0.7\text{--}1.0$) на подложках Si(111). Методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS), рентгено-структурного анализа (XRD) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) изучены элементный состав, фазовые превращения и морфология поверхности. Показано, что исходные плёнки находятся в аморфном состоянии; после термического отжига при 300 °С формируется кристаллическая фаза германида никеля NiGe. В образцах, дополнительно облучённых ионами Ni^+ , исследована электрокаталитическая активность в реакции окисления этанола. Установлено, что имплантация никеля сдвигает потенциал окисления этанола в область более высоких значений (до 0.96 В) и увеличивает плотность тока, причём эффект усиливается с уменьшением толщины плёнки.

The synthesis, structure and electrochemical properties of Ge–Ni composite films obtained by magnetron sputtering

V. V. Bazarov, V. F. Valeev, R. R. Garipov, N. M. Lyadov, V. I. Nuzhdin,
N. M. Suleymanov, V. A. Shustov, I. V. Yanilkin

Laboratory of radiation physics
Laboratory of carbon structure physics and composite systems

Composite films of $\text{Ge}_x\text{Ni}_{1-x}$ ($x = 0.7\text{--}1.0$) were synthesized on Si(111) substrates using direct current magnetron sputtering. The elemental composition, phase transformations, and surface morphology were studied using X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM). The initial films were shown to be amorphous; after thermal annealing at 300 °C, a crystalline phase of nickel germanide NiGe was formed. The electrocatalytic activity of samples additionally irradiated with Ni^+ ions in the ethanol oxidation reaction was studied. It was found that nickel implantation shifts the ethanol oxidation potential to higher values (up to 0.96 V) and increases the current density, with the effect becoming more pronounced with decreasing film thickness.

Введение

Композитные материалы на основе полупроводников и переходных металлов вызывают значительный интерес благодаря возможности сочетания полупроводниковых свойств матрицы с каталитической или магнитной активностью металлических наночастиц [1, 2]. В частности, системы Ge–Ni перспективны для создания электродов топливных элементов, использующих этанол в качестве возобновляемого топлива. Никель и его соединения (например, NiGe) рассматриваются как менее дорогая альтернатива платине в реакциях электроокисления спиртов [3, 4].

Теоретические расчёты предсказывают склонность атомов переходных металлов к кластеризации в полупро-

водниковой матрице, что может приводить к образованию наноразмерных каталитически активных центров [5]. Экспериментальная реализация таких структур возможна методами неравновесного синтеза, включая молекулярно-лучевую эпитаксию или магнетронное распыление. Последнее позволяет получать плёнки с контролируемым составом и толщиной за короткое время, одновременно распыляя различные мишени [6].

Ранее была отработана методика синтеза плёнок $\text{Ge}_x\text{Ni}_{1-x}$ и показано формирование фазы NiGe после отжига [7]. В настоящей работе представлены результаты комплексного исследования структурных характеристик таких плёнок и их электрохимической активности в реакции окисления этанола, включая влияние дополнительной ионной имплантации никеля.

Методика эксперимента

Синтез плёнок

Плёнки $\text{Ge}_x\text{Ni}_{1-x}$ ($x = 0.7, 0.8, 0.9, 0.95, 1.0$) получали методом магнетронного распыления на постоянном токе в высоковакуумной камере (базовое давление $<5 \cdot 10^{-7}$ Па). Использовались две мишени: германий (чистота 99.95%) и никель (99.99%). Распыление проводилось одновременно в атмосфере аргона. Подложками служили монокристаллические пластины Si(111). Толщина плёнок варьировалась от 200 до 600 нм и контролировалась временем осаждения. Состав плёнок задавался скоростями распыления каждой мишени, определёнными при предварительной калибровке.

Часть образцов состава $\text{Ge}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}$ дополнительно подвергалась ионной имплантации никеля на ускорителе ИЛУ-3. Имплантация проводилась ионами Ni^+ с энергией 40 кэВ, дозой $6 \cdot 10^{16}$ ион/см² при комнатной температуре. Согласно расчётам в программе SRIM, проективный пробег ионов в материале плёнки составлял около 25 нм.

Методы характеристики

Элементный состав и химическое состояние поверхности исследовались методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) на аналитической системе SPECS GmbH (чувствительность ~ 0.5 ат.%). Рентгеноструктурный анализ выполнялся на дифрактометре ДРОН-7 в геометрии Брэгга–Брентано (излучение CuK_α). Обработка спектров и определение размеров областей когерентного рассеяния проводились в программе MAUD [8, 9].

Морфология поверхности изучалась на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50XVP в режимах вторичных (SE) и отражённых (QBSD) электронов.

Электрохимические измерения

Электрокаталитическую активность исследовали методом циклической вольтамперометрии с использованием многоканального потенциостата P-20X8 и трёхэлектродной ячейки Э-1С. Рабочим электродом служила исследуемая плёнка (площадь 0.2 см²), вспомогательным – платиновая фольга, электродом сравнения – хлорсеребряный ($\text{Ag}|\text{AgCl}|\text{KCl}$ нас.). Измерения проводились в щелочно-спиртовом электролите (1 М KOH + 1 М $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) при скорости развёртки потенциала 20 мВ/с в диапазоне от 0 до 1500 мВ. Перед измерениями электроды промывались этанолом, дистиллированной водой и высушивались в вакууме при 348 К в течение 5 ч.

Результаты и обсуждение

По данным XPS, все синтезированные плёнки содержали только германий и никель в пределах чувствительности

Таблица 1. Экспериментальные образцы композитных плёнок $\text{Ge}_x\text{Ni}_{1-x}$, синтезированных методом магнетронного осаждения германия и никеля на монокристаллические подложки кремния (Si (111)) [6]. Толщина плёнки для всех образцов 600 нм.

№	Образец	Концентрация никеля из РФЭС, ат.%
1	Ge	0
2	$\text{Ge}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}$	7.7
3	$\text{Ge}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$	11.6
4	$\text{Ge}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}$	20.9
5	$\text{Ge}_{0.7}\text{Ni}_{0.3}$	29.0

метода. Концентрация никеля в серии образцов составляла от 0 до 29.0 ат.%, что хорошо согласуется с номинальными значениями (табл. 1). Характерные XPS-спектры представлены на рис. 1; они не содержат посторонних пиков, что подтверждает отсутствие загрязнений.

Рентгеновская дифракция исходных (неотожжённых) плёнок показала наличие широких аморфных гало, свидетельствующих о разупорядоченной структуре (рис. 2). Анализ профиля для плёнки $\text{Ge}_{0.7}\text{Ni}_{0.3}$ позволил идентифицировать присутствие смеси германидов $\text{Ni}_{18}\text{Ge}_{12}$ и NiGe в нанокристаллическом или аморфизованном состоянии.

После вакуумного отжига при 300 °С в течение 15 мин в дифракционной картине плёнки $\text{Ge}_{0.7}\text{Ni}_{0.3}$ появляются узкие рефлексы, соответствующие кристаллическим фазам Ge и NiGe (рис. 3). Рефлексы элементарного никеля не наблюдаются. Средний размер областей когерентного рассеяния для фазы NiGe, оценённый по формуле Шеррера, составил около 400 нм. Полученные данные согласуются с известной фазовой диаграммой системы Ge–Ni и результатами работ [10], согласно которым NiGe является стабильной фазой при данной температуре отжига.

На СЭМ-изображениях поверхности отожжённой плёнки $\text{Ge}_{0.7}\text{Ni}_{0.3}$ (рис. 4) в режиме отражённых электронов (QBSD) наблюдаются светлые области размером 150–200 нм. Поскольку контраст в режиме QBSD определяется средним атомным номером, эти области можно интерпретировать как скопления фазы NiGe (более тяжёлой по сравнению с германиевой матрицей), что подтверждает данные рентгеновской дифракции. В режиме вторичных электронов (SE) поверхность выглядит однородной, что указывает

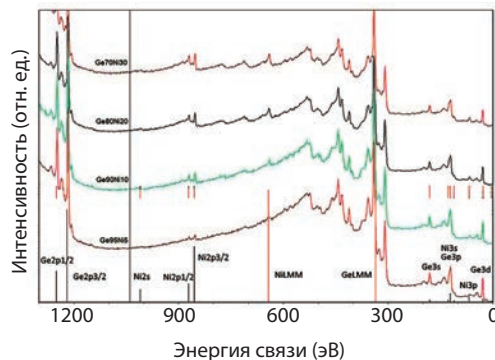


Рис. 1. Рентгеновские фотоэлектронные спектры плёнок $\text{Ge}_x\text{Ni}_{1-x}$ различного состава (по данным [6]).

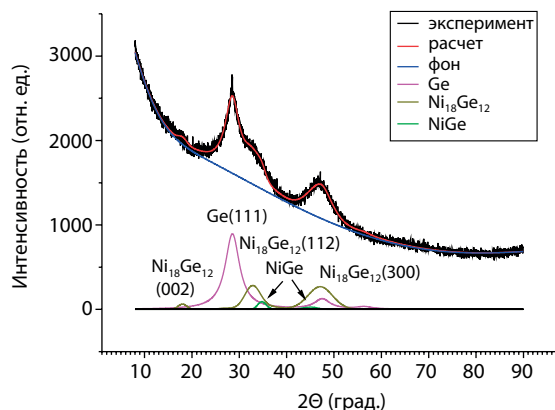


Рис. 2. Спектр рентгеновской дифракции плёнки $\text{Ge}_{0.7}\text{Ni}_{0.3}$ (толщина 600 нм) после осаждения.

на незначительный рельеф и преимущественно подповерхностное расположение частиц германида.

Циклические вольтамперограммы плёнки чистого никеля (рис. 5) демонстрируют пик окисления этанола при потенциале около 0.55 В, что соответствует образованию NiOOH и его каталитическому действию [11]. Для исходной композитной плёнки $\text{Ge}_{0.7}\text{Ni}_{0.3}$ пик наблюдается при 0.65 В (рис. 6), что свидетельствует о сохранении каталитической активности даже при отсутствии свободного никеля, по-видимому, за счёт фазы NiGe или остаточного никеля в разупорядоченной матрице.

Наиболее существенные изменения зафиксированы для образцов $\text{Ge}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}$, подвергнутых ионной имплантации никеля (рис. 7). Пик окисления этанола сдвигается в область более высоких потенциалов: до 0.81 В для плёнки толщиной 600 нм и до 0.96 В для плёнки толщиной 200 нм. Одновременно возрастает плотность тока в пике. Таким образом, потенциал окисления и плотность тока коррелируют с толщиной плёнки: чем тоньше плёнка, тем выше потенциал и ток.

Наблюдаемый эффект можно объяснить следующим образом. Имплантация никеля с энергией 40 кэВ создаёт слой с повышенной концентрацией никеля в приповерхностной области (~25 нм). В тонкой плёнке (200 нм) этот

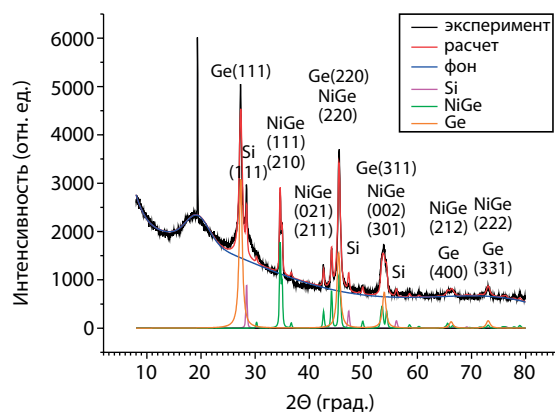


Рис. 3. Спектр рентгеновской дифракции плёнки $\text{Ge}_{0.7}\text{Ni}_{0.3}$ после термического отжига при 300 °C, 15 мин.

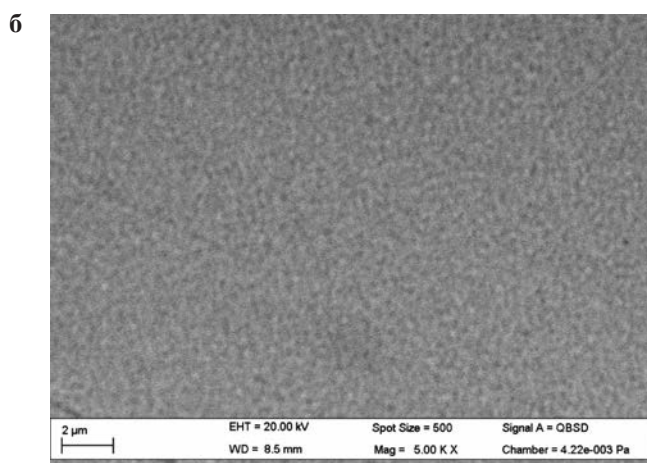
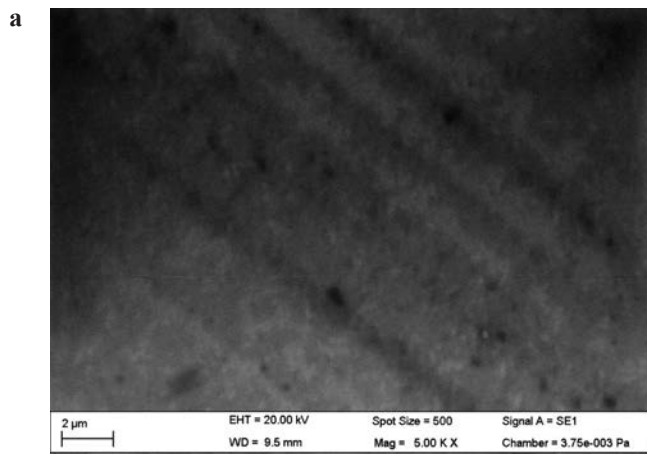


Рис. 4. СЭМ-изображения поверхности плёнки $\text{Ge}_{0.7}\text{Ni}_{0.3}$ после отжига: а режим вторичных электронов (SE); б режим отражённых электронов (QBSD). Светлые области – фаза NiGe .

модифицированный слой составляет большую долю от общего объёма, и его влияние на электрохимические процессы проявляется сильнее. Формирование наночастиц Ni или NiGe в приповерхностной области, возможно, со-

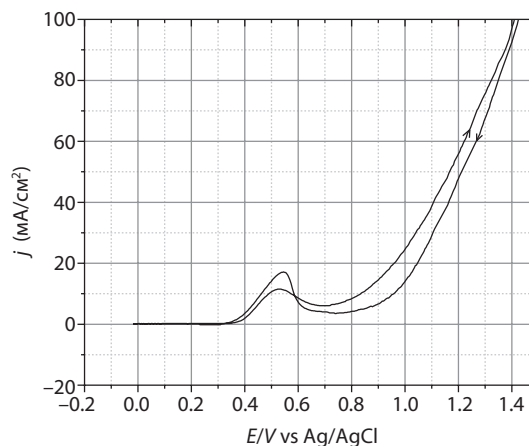


Рис. 5. Циклическая вольтамперограмма плёнки никеля в электролите 1 М KOH + 1 М $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

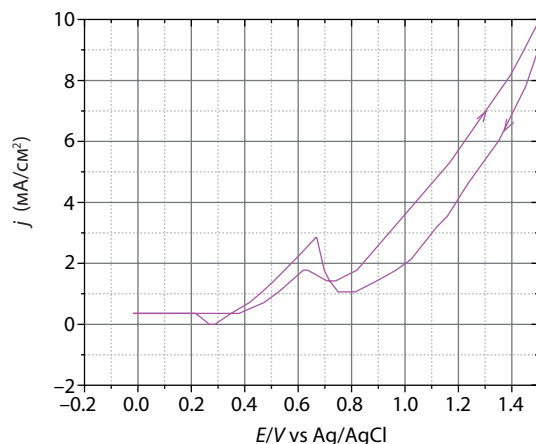


Рис. 6. Циклическая вольтамперограмма исходной плёнки $\text{Ge}_{0.7}\text{Ni}_{0.3}$ толщины 600 нм, отжиг при 300 °C 15 мин.

проводящееся развитием пористости [12], увеличивает эффективную площадь катализатора и изменяет энергетику адсорбции промежуточных продуктов реакции (CO , CH_x , ацетальдегид). Сдвиг потенциала в положительную сторону может быть связан с изменением электронного окружения атомов никеля в германидной фазе или с влиянием подложки Si [13].

Заключение

В работе проведён полный цикл исследований – от синтеза до электрохимических испытаний – композитных плёнок Ge–Ni, полученных магнетронным распылением. Методом одновременного распыления Ge и Ni возможно получение плёнок заданного состава с содержанием никеля до 30 ат.%. Исходные плёнки аморфны. Термический отжиг при 300 °C приводит к кристаллизации германия и образованию фазы германида никеля NiGe, частицы которой размером 150–200 нм равномерно распределены в объёме. Композитные плёнки проявляют каталитическую активность в реакции окисления этанола. Дополнительная имплантация ионов никеля существенно изменяет вольтамперометрические характеристики: потенциал окисления возрастает до 0.96 В, плотность тока увеличивается. Обнаружена зависимость электрохимических параметров от толщины плёнки: уменьшение толщины (с 600 до 200 нм) приводит к росту потенциала

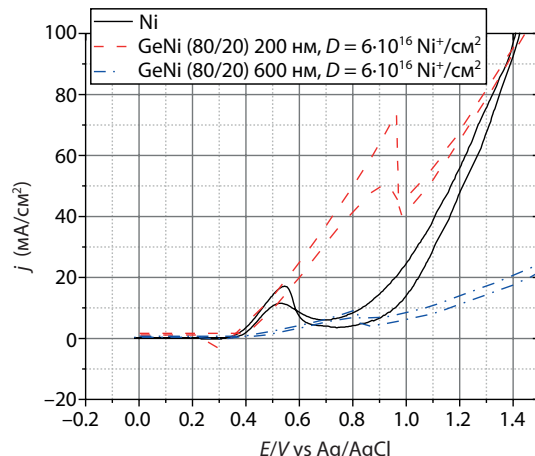


Рис. 7. Циклические вольтамперограммы никеля и плёнок $\text{Ge}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}$ различной толщины, имплантированных ионами Ni^+ (доза $6 \cdot 10^{16}$ ион/см²).

и плотности тока, что связано с бóльшим относительным вкладом приповерхностного имплантированного слоя. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования модифицированных ионной имплантацией плёнок Ge–Ni в качестве электродных материалов для щелочных спиртовых топливных элементов.

Литература

1. Saikia D., Borah J.P.: Appl. Phys. A **124**, 240 (2018)
2. Roy S., Ghosh M.P., Mukherjee S.: Appl. Phys. A **127**, 451 (2021)
3. e Silva F.A., Salim V.M.M., Rodrigues T.S.: Applied Chem. **4**, 86 (2024)
4. Rahmani K., Habibi B.: Int. J. Hydrogen Energy **45**, 27263 (2020)
5. Mahadevan P., Osorio-Guillén J.M., Zunger A.: Appl. Phys. Lett. **86**, 172504 (2005)
6. Сулейманов Н.М., Абдуллина А.А., Базаров В.В. и др.: Письма в ЖТФ **52**, № 1, 41 (2026)
7. Fairley N., Fernandez V., Richard-Plouet M., et al.: Appl. Surf. Sci. Adv. **5**, 100112 (2021)
8. Lutterotti L.: Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B **268**, 334 (2010)
9. Kars M., Gomez Herrero A., Roisnel T., et al.: Acta Cryst. E **71**, 318 (2015)
10. Begeza V., Rebohle L., Stocker H.: J. Alloys Compd. **990**, 174420 (2024)
11. Fleischmann M., Korinek K., Pletcher D.: J. Electroanal. Chem. **3**, 39 (1971)
12. Базаров В.В., Шустов В.А., Лядов Н.М. и др.: Письма в ЖТФ **45**, № 10, 1047 (2019)
13. Lubna Y., Tayyaba N., Naseem I.: RSC Adv. **11**, 16768 (2021)

Эффект сверхпроводящего спинового клапана в $\text{Fe}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Pb}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Fe}$ гетероструктурах

А. А. Камашев, Н. Н. Гарифьянов, Д. А. Арбузов¹, А. А. Валидов, И. А. Гарифуллин

Лаборатория проблем сверхпроводимости и спинтроники

¹ Казанский федеральный университет

Были исследованы структуры сверхпроводящего спинового клапана (ССК) конструкции $\text{Fe}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Pb}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Fe}$ (где Si_3N_4 – диэлектрический изолирующий слой). Была изучена зависимость величины эффекта ССК от толщины сверхпроводящего (С) и изолирующего (И) слоёв. Оптимальный подбор толщин С- и И-слоёв позволил наблюдать полное переключение между нормальным и сверхпроводящим состояниями при изменении взаимной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоёв (Ф) с антипараллельной на параллельную. Максимальная величина эффекта ССК, равная 0.36 К, была достигнута во внешнем магнитном поле 1 кЭ. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения структур ССК с возможностью регулирования прозрачности границы Ф/С за счёт изолирующей прослойки. Это открывает новые возможности для разработки таких систем и их потенциального применения в устройствах сверхпроводящей спинтроники.

Superconducting spin valve effect in $\text{Fe}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Pb}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Fe}$ heterostructures

A. A. Kamashev, N. N. Garif'yanov, D. A. Arbuzov¹, A. A. Validov, I. A. Garifullin

Laboratory of Superconductivity and Spintronics Problems

¹ Kazan Federal University

The structures of the superconducting spin valve (SSV) $\text{Fe}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Pb}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Fe}$ (where Si_3N_4 is a dielectric insulating layer of controlled thickness) were investigated. The dependence of the SSV effect magnitude on the thicknesses of the superconducting (S) and insulating (I) layers was studied. An optimal choice of the S and I layer thicknesses enabled the observation of a complete switching between the normal and superconducting states when the mutual orientation of the magnetizations of the ferromagnetic (F) layers was changed from antiparallel to parallel. The maximum SSV effect, equal to 0.36 K, was achieved in an external magnetic field of 1 kOe. The obtained results demonstrate the promise of SSV structures with tunable F/S interface transparency controlled by an insulating interlayer. This opens new opportunities for the development of such systems and their potential application in superconducting spintronic devices.

Введение

Эффект сверхпроводящего спинового клапана (ССК) возникает из-за различной степени подавления сверхпроводимости ферромагнетизмом при параллельной (П) и антипараллельной (АП) ориентациях намагниченностей ферромагнитных слоёв (Ф) в тонкоплёночных гетероструктурах $\Phi 1/\Phi 2/\text{С}$ и $\Phi 1/\text{С}/\Phi 2$ [1–3]. Это приводит к различным температурам сверхпроводящего перехода (T_c) для П (T_c^P) и АП (T_c^{AP}) ориентаций намагниченностей Ф-слоёв в структурах ССК. Принцип работы ССК базируется на эффекте близости сверхпроводник/ферромагнетик (С/Ф). Данный эффект лежит в основе устройств сверхпроводящей спинтроники (см., например, [4–16]). В частности, сверхпроводящий спиновый клапан является перспективным элементом для создания сверхпроводящих переключателей или транзисторов.

Величина синглетного эффекта ССК (ΔT_c) определяется как разница между T_c^{AP} и T_c^P . Полный эффект сверхпроводящего спинового клапана, при котором возможно управлять сверхпроводимостью (включать/выключать сверхпроводящее состояние) путём перемагничивания Ф-слоёв из П- в АП-ориентацию, достигается при выполнении условия $\Delta T_c > \delta T_c$ (где δT_c – ширина сверхпроводящего перехода). Данный эффект подробно изучен во многих теоретических и экспериментальных работах, где рассматриваются структуры ССК с высококачественной границей между С- и Ф-слоями (см., например, [11, 15, 17–30]).

Высококачественная граница в структурах ССК между сверхпроводником и ферромагнетиком приводит к существенному подавлению сверхпроводимости всей системы. При этом как T_c^P , так и T_c^{AP} могут быть значительно ниже критической температуры исходного сверхпроводящего материала. С этой точки зрения структуры ССК типа

ФИ/С/ФИ (где ФИ – ферромагнитный изолятор) могут оказаться предпочтительнее [31–33]. В таких структурах прямой эффект близости отсутствует, в то время как T_c контролируется относительной ориентацией обменных полей ФИ-слоев. В качестве альтернативы общее подавление T_c может быть уменьшено за счёт введения немагнитных изолирующих слоёв (И) на границе раздела Ф/С. Действительно, структуры ССК конструкции Ф/И/С/И/Ф демонстрируют значительную величину эффекта ССК [34–38]. Важным преимуществом таких структур ССК является возможность тонкой настройки взаимодействия между Ф- и С-слоями. В частности, оптимизация толщины С-слоя позволяет достичь высокой чувствительности сверхпроводимости к магнитной части системы. Таким образом, использование изолирующих прослоек обеспечивает управление такой “хрупкой” сверхпроводимостью в подобных структурах, что открывает возможность к достижению значительных величин ΔT_c (более 0.1 К).

Полный эффект ССК в структурах Ф/И/С/И/Ф был впервые продемонстрирован в работе [34]. Хотя подобные структуры были впоследствии исследованы в работах [35, 36], полученные значения ΔT_c оказались значительно меньше, чем в работе [34], и полный эффект ССК не наблюдался. Важные подтверждения результатов, приведённых в работе [34], включая сопоставимые значения ΔT_c и демонстрацию полного эффекта ССК, были получены в работах [37, 38].

Однако значительная величина эффекта ΔT_c , полученная в работах [34, 37, 38], наблюдалась и в структурах ССК с окисленными границами раздела Ф/С. Несмотря на то, что эти результаты были последовательно воспроизведены в структурах ССК с различными комбинациями ферромагнитных и сверхпроводящих материалов, свойства сформированных изолирующих слоёв (в частности их толщина) не поддавались точному контролю вследствие специфики используемых методов их получения.

Для решения этой проблемы в настоящей работе сверхпроводящий и ферромагнитный слои были целенаправленно разделены изолирующими прослойками с хорошо контролируемой толщиной на границе раздела Ф/С в структурах ССК. Были изготовлены и исследованы структуры ССК Fe/Si₃N₄/Pb/Si₃N₄/Fe (где Si₃N₄ – диэлектрический изолирующий слой) с различной толщиной как сверхпроводящего, так и изолирующих слоёв. Исследована зависимость величины эффекта ΔT_c от толщины Si₃N₄- и Pb-слоёв. Показано, что при оптимальных параметрах структуры значение ΔT_c достигает 0.36 К, что обеспечивает полный эффект ССК во внешнем магнитном поле 1 кЭ. Достигнутые величины эффекта превосходят ранее сообщавшиеся значения для структур ССК типа Ф/И/С/И/Ф [34–38], а также большинство значений синглетного эффекта ССК ΔT_c в структурах с прямым высококачественным контактом между С- и Ф-слоями.

Образцы

Образцы были приготовлены на напылительной установке фирмы BESTEC GmbH в Казанском физико-техническом институте им. Е. К. Завойского. Конструкция установки позволяет в рамках одного вакуумного цикла перемещать образцы между тремя камерами: загрузочной камерой со стационарным вакуумом около 10⁻⁸ мбар, камерой молекулярно-лучевой эпитаксии (МБЕ) со стационарным вакуумом около 10⁻¹⁰ мбар и камерой магнетронного напыления (на постоянном и переменном токе) со стационарным вакуумом 10⁻⁹ мбар. Были приготовлены три серии образцов следующего состава: CoO_x(3.5 нм)/Fe1(3 нм)/Si₃N₄1($d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$)/Pb(d_{Pb})/Si₃N₄2($d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$)/Fe2(3 нм)/Si₃N₄(85 нм), где варьировались толщины Si₃N₄-слоёв ($d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$) в диапазоне от 0 до 1.2 нм и толщина Pb-слоя (d_{Pb}) в диапазоне от 40 до 60 нм. Образцы наносились на высококачественные монокристаллические подложки MgO (001). Все материалы, использованные для напыления, имели чистоту более 4N (99.99%). Дизайн приготовленных образцов представлен на рис. 1. В приготовленных образцах: CoO_x – антиферромагнитный (АФ) слой, необходимый для фиксации направления намагниченности слоя Fe1; Fe1 и Fe2 – ферромагнитные слои; Si₃N₄1 и Si₃N₄2 – диэлектрические изолирующие слои; Pb – сверхпроводящий слой; верхний слой Si₃N₄ – защитный слой. Слои были нанесены методами электронно-лучевого испарения (Co, Fe, Pb) и магнетронного напыления на переменном токе (Si₃N₄).

Первый слой CoO_x был приготовлен в два этапа: (а) сначала в камере МБЕ был нанесён слой металлического Co; (б) после этого образец был окислен в атмосфере

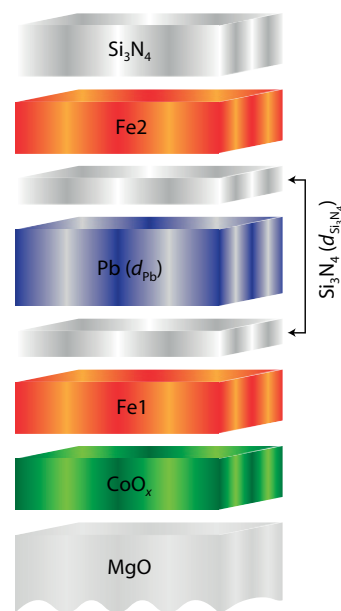


Рис. 1. Дизайн приготовленных структур ССК: CoO_x(3.5 нм)/Fe1(3 нм)/Si₃N₄1($d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$)/Pb(d_{Pb})/Si₃N₄2($d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$)/Fe2(3 нм)/Si₃N₄(85 нм) с варьлируемыми толщинами Si₃N₄-слоёв $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ в диапазоне от 0 до 1.2 нм и Pb-слоя в диапазоне от 40 до 60 нм.

Таблица 1. Параметры приготовленных структур ССК: $\text{CoO}_x(3.5 \text{ нм})/\text{Fe1}(3 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(d_{\text{Si}_3\text{N}_4})/\text{Pb}(d_{\text{Pb}})/\text{Si}_3\text{N}_4(d_{\text{Si}_3\text{N}_4})/\text{Fe2}(3 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(85 \text{ нм})$ с варьируемыми толщинами Si_3N_4 -слоёв $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ в диапазоне от 0 до 1.2 нм и Pb-слоя в диапазоне от 40 до 60 нм.

Серия	Образец	d_{Pb} (нм)	$d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ (нм)	ΔT_c (K)	T_c (K) ($H_0 = 0$ Э)
1	1	40	0.0	0.0	≤ 1.4
	2		0.3	0.21	5.4
	3		0.6	0.08	6.7
	4		1.2	0.0	7.0
2	1	50	0.0	0.0	≤ 1.4
	2		0.15	0.0	≤ 1.4
	3		0.3	0.36	6.08
	4		0.6	0.1	6.76
	5		1.2	0.0	7.0
3	1	60	0.0	0.090	3.3
	2		0.3	0.078	6.53
	3		0.6	0.043	6.83
	4		1.2	0.0	7.0

кислорода при 100 мбар в течение двух часов в вакуумной камере. Затем последующие слои структур ССК наносились на подложку, охлаждённую до температуры $T_{\text{sub}} \approx 150 \text{ K}$. Эта процедура необходима для формирования максимально гладкого слоя Pb [28]. Скорости осаждения были следующими: 0.5 Å/s для слоёв Co, Fe, Si_3N_4 1 и Si_3N_4 2; 12 Å/s для слоя Pb; 2 Å/s для защитного слоя Si_3N_4 .

Установлено, что коэффициент остаточного удельного сопротивления $RRR = R_{300 \text{ K}}/R_{10 \text{ K}}$ исследованных образцов находится в диапазоне 15–20. Такие значения свидетельствуют о высокой чистоте и качестве слоя Pb в приготовленных образцах.

В табл. 1 представлены параметры всех серий образцов.

Экспериментальные результаты

Изучение магнитных свойств образцов проводилось с использованием вибрационного магнитометра (VSM SQUID). Для всех образцов была измерена зависимость намагниченности M от магнитного поля H для определения диапазона рабочих внешних магнитных полей, при которых достигаются П- и АП-ориентации намагниченностей Ф-слоёв. На рис. 2 показана петля магнитного гистерезиса для образца 1-3 (см. табл. 1). Такой тип петель магнитного гистерезиса характерен для всех серий образцов. Перед измерением магнитных свойств образцы охлаждались до 10 K в магнитном поле 8 кЭ (“field cooling” procedure). Эта процедура необходима для выравнивания намагниченностей Ф-слоёв параллельно друг другу и для фиксации намагниченности слоя Fe1. Зависимость $M(H)$ была измерена при температуре 10 K и изменении магнитного поля от +8 до –8 кЭ и обратно до +8 кЭ. Обе величины поля +8 и –8 кЭ соответствуют П-ориентации намагниченностей Ф-слоёв. Как видно из рис. 2, суммарная намагниченность образца $M(H)$ достигает максимального значения и остаётся постоянной при уменьшении магнитного поля

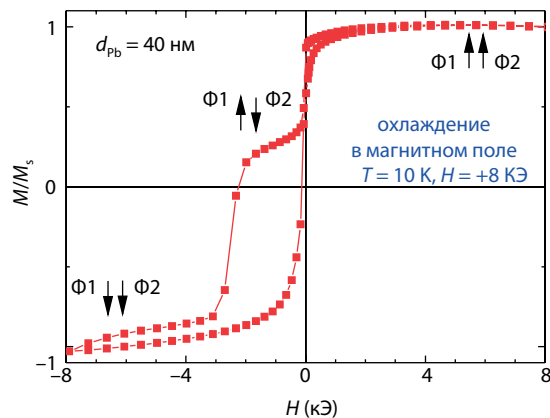


Рис. 2. Петля магнитного гистерезиса $M(H)$ для образца серии 1-3, измеренная после процедуры охлаждения от комнатной температуры до $T = 10 \text{ K}$ в магнитном поле +8 кЭ (“field cooling” procedure).

с +8 до +0.5 кЭ, что свидетельствует о параллельной ориентации и насыщению намагниченностей Ф-слоёв. При дальнейшем снижении поля величина $M(H)$ уменьшается, что соответствует повороту намагниченности “свободного” Ф2-слоя, в то время как намагниченность Ф1-слоя, закреплённого антиферромагнитным слоем CoO_x , сохраняет исходное направление вплоть до приложения магнитного поля –1.7 кЭ. Антипараллельная ориентация намагниченностей Ф-слоёв реализуется в интервале магнитных полей от –0.15 до –1.7 кЭ. При увеличении магнитного поля по модулю в интервале от –1.7 до –3 кЭ намагниченность Ф1-слоя начинает переориентироваться в направлении внешнего поля, что приводит к дальнейшему уменьшению величины $M(H)$. В диапазоне магнитных полей от –3 до –8 кЭ устанавливается П-ориентация намагниченностей Ф-слоёв, направленная противоположно исходной параллельной конфигурации.

Сверхпроводящие свойства образцов исследовались с использованием стандартного четырёхконтактного метода на постоянном токе. Изменение внешнего магнитного поля осуществлялось с помощью электромагнита Bruker Instruments. Критическая температура T_c определялась по зависимости сопротивления от температуры и определялась как средняя точка на сверхпроводящем переходе. Для фиксации намагниченности слоя Ф1 образцы охлаждались до температуры жидкого гелия во внешнем магнитном поле +5 кЭ, приложенном в плоскости образца. Эта процедура аналогична той, что использовалась при проведении магнитных измерений.

На рис. 3 представлена зависимость T_c от толщины слоя Si_3N_4 для трёх серий образцов, измеренная при отсутствии внешнего магнитного поля ($H_0 = 0$ Э). Видно, что для конструкций с большой толщиной $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ значение T_c близко к значению для объёмного свинца (7.2 K). По мере уменьшения $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ значение T_c также уменьшается. При малых или нулевых значениях $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ сверхпроводимость не могла быть обнаружена вплоть до самой низкой достижимой температуры 1.4 K.

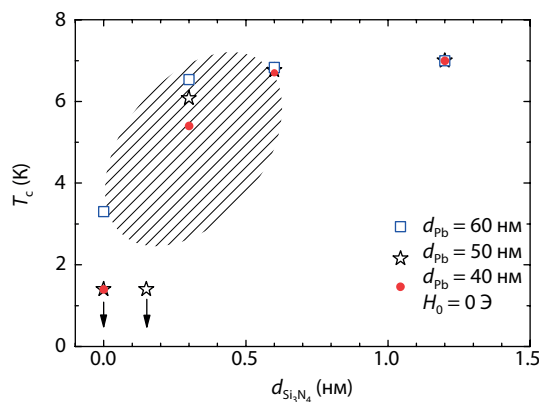


Рис. 3. Зависимость T_c от толщины $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ для трёх серий образцов, измеренная в отсутствии внешнего магнитного поля ($H_0 = 0$ Э). Заштрихованной областью отмечен оптимальный диапазон толщин И-слоя для наблюдения эффекта ССК (см. текст).

На рис. 4 показаны сверхпроводящие переходы для П- и АП-ориентаций намагниченности слоёв Fe1 и Fe2 для трёх образцов: (а) образец 3-2 ($d_{\text{pb}} = 60$ нм), (б) образец 2-3 ($d_{\text{pb}} = 50$ нм) и (в) образец 1-2 ($d_{\text{pb}} = 40$ нм). Изменение взаимной ориентации намагниченностей слоёв Fe осуществлялось путём вращения приложенного внешнего магнитного поля в плоскости образца ($H_0 = 1$ кЭ), что, в свою очередь, приводило к соответствующему повороту намагниченности слоя Fe2 относительно закреплённого слоя Fe1. Как видно из рис. 4, полный эффект ССК ($\Delta T_c > \delta T_c$) наблюдается для образца 2-3 со значением $\Delta T_c \approx 0.36$ К.

На рис. 5 представлена зависимость ΔT_c от $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ для трёх серий образцов. Максимальное значение эффекта ССК $\Delta T_c = 0.36$ К достигалось при толщине С-слоя $d_{\text{pb}} = 50$ нм и толщине И-слоя $d_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 0.3$ нм (образец 2-3).

Обсуждение результатов

Из рис. 3 видно, что при больших толщинах Si_3N_4 -слоёв $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ эффект близости С/Ф практически отсутствует, что приводит к относительно высоким значениям T_c (приблизительно 7.2 К). По мере уменьшения толщины слоя Si_3N_4 эффект близости С/Ф становится более выраженным, что приводит к подавлению T_c и исчезновению сверхпроводимости при малых (или нулевых) значениях $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$. Такое поведение T_c характерно для всех серий образцов и хорошо согласуется с современным пониманием эффекта близости С/Ф. Чем ближе сверхпроводящий и ферромагнитный слои расположены друг к другу, тем более выраженным становится эффект близости С/Ф. Из рис. 3 также видно, что по мере уменьшения толщины С-слоя d_{pb} критическая температура T_c также уменьшается. Такое поведение ожидаемо, поскольку более тонкие сверхпроводящие слои являются более чувствительными к магнитной части структуры ССК. Таким образом, на основе зависимости, показанной на рис. 3, можно определить оптимальный диапазон толщин изолирующего слоя

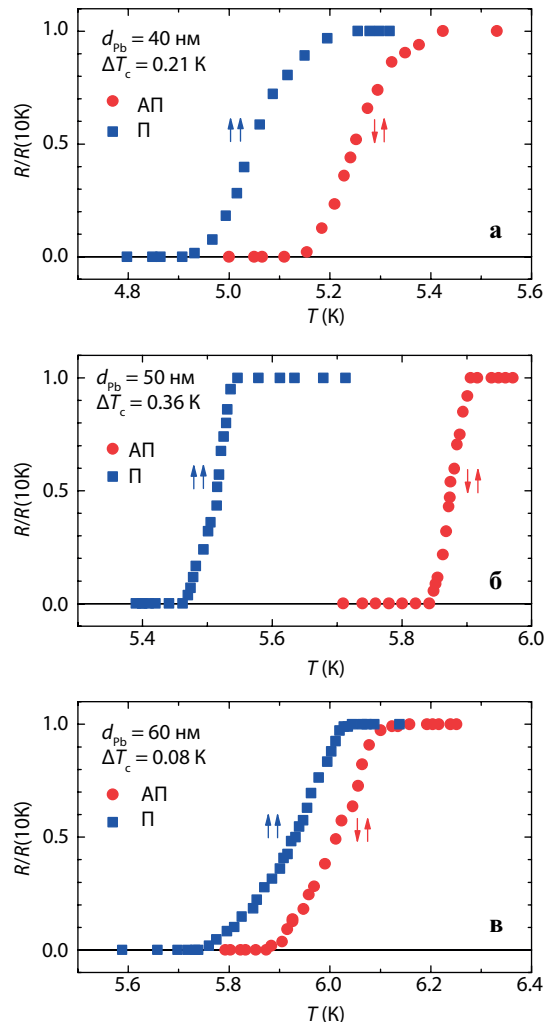


Рис. 4. Кривые сверхпроводящих переходов для П- и АП-ориентаций намагниченности слоёв Fe1 и Fe2 для трёх образцов: **а** образец 3-2 ($d_{\text{pb}} = 60$ нм); **б** образец 2-3 ($d_{\text{pb}} = 50$ нм); **в** образец 1-2 ($d_{\text{pb}} = 40$ нм).

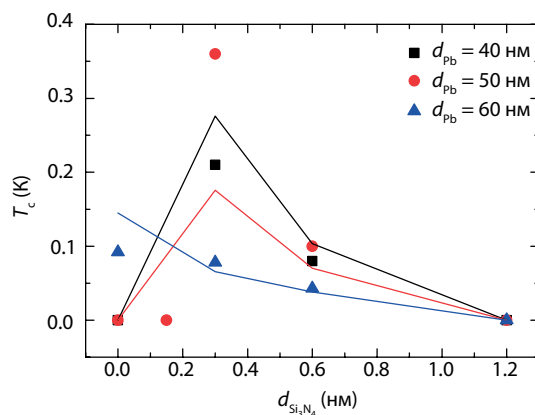


Рис. 5. Зависимость величины эффекта ССК ΔT_c от толщины Si_3N_4 -слоёв $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ для трёх серий образцов. Теоретические расчёты соответствуют только значениям $d_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 0, 0.3, 0.6$ и 1.2 нм (точки, соответствующие теоретическим расчётам, соединены сплошными линиями для удобства визуального сравнения с экспериментальными данными). Теоретические расчёты проведены в соответствии с подходом, представленным в работе [39].

для наблюдения эффекта ССК. Этот диапазон обозначен на рис. 3, как заштрихованная область. Как следует из зависимости, представленной на рис. 3, параметры исследуемых структур, в частности толщины С- и И-слоёв, контролируются с высокой точностью.

На рис. 5 показана зависимость эффекта ΔT_c от толщины Si_3N_4 -слоя $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ для трёх серий образцов. Значительные величины эффекта ССК наблюдались для всех серий. Отсутствие эффекта ССК в образцах с большой толщиной И-слоя объясняется подавлением эффекта близости С/Ф. Это подавление возникает из-за значительного ослабления взаимодействия между С- и Ф-слоями, обусловленного их пространственным разделением, о чем свидетельствуют данные, представленные на рис. 3.

Аналогично, эффект ССК не наблюдался в образцах со сверхтонкими И-слоями, где чрезмерно сильный эффект близости С/Ф приводит к почти полному подавлению сверхпроводимости, как показано на рис. 3. Во всех трёх сериях образцов наблюдалась немонотонная зависимость эффекта ССК от толщины слоя Si_3N_4 (см. рис. 5). Эффект ССК отсутствует при большой величине $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$, становится всё более выраженным с уменьшением толщины $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$, достигает оптимального значения при промежуточном $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ и впоследствии уменьшается при минимальном или нулевом значении $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$. Такое поведение подчёркивает критическую роль толщины слоёв в уравнивании эффекта близости С/Ф и поддержании сверхпроводимости, необходимой для наблюдения эффекта ССК. Наибольшие величины эффекта ССК наблюдались для образцов из серии 2, что согласуется с отмеченной областью на рис. 3. Максимальное значение эффекта $\Delta T_c = 0.36$ К, было зафиксировано для образца 2-3. Также для этого образца наблюдался полный эффект ССК (см. рис. 4б).

Примечательно, что максимальные эффекты ССК наблюдались в образцах с толщиной изолирующего слоя $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$, равной приблизительно 0.3 нм. При таком масштабе, приближающемся к атомному, слой может быть неоднородным или нестехиометричным. Хотя всестороннее исследование этих структурных характеристик выходит за рамки данной работы и заслуживает дальнейшего изучения, мы отмечаем, что наши предыдущие исследования с помощью просвечивающей электронной микроскопии подобных ССК структур из аналогичных материалов продемонстрировали отсутствие существенной взаимной диффузии между слоями [28]. В настоящей работе толщина И-слоёв контролировалась по времени напыления, откалиброванного с известной скоростью роста. Таким образом, указанные толщины представляют собой номинальные значения. В то же время мы не можем исключать наличие дефектов в очень тонких И-слоях.

Точное теоретическое описание эффекта ССК в исследуемых структурах представляет значительные трудности из-за сложного характера границ раздела. Хотя в эксперименте возможно формирование изолирующих границ, в настоящее время невозможно точно контроли-

ровать их ключевые характеристики (такие как толщина, однородность, состав) и физические свойства. Подробный теоретический анализ полученных экспериментальных данных представлен в работе [39]. Данный анализ принимает во внимание возможную неоднородность границ (обсуждавшуюся выше) и рассматривает сопротивление интерфейса Ф/С как эффективную характеристику, отражающую локальное усреднённое сопротивление интерфейса.

Теоретические зависимости $\Delta T_c(d_{\text{Si}_3\text{N}_4})$, рассчитанные в соответствии с этой моделью, качественно согласуются с экспериментальными результатами (см. рис. 5). Основные тенденции, наблюдаемые на графиках, можно обобщить следующим образом: сверхпроводимость подавлена при $d_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 0$ нм, увеличение толщины $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ приводит к увеличению эффекта ССК, достигающего пика в определённой точке: при АП-ориентации возникает сверхпроводимость, тогда как при П-ориентации она остаётся подавленной. Дальнейшее увеличение толщины $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ ослабляет эффект близости, в результате чего T_c приближается к своему значению для массивного образца. В то же время величина ΔT_c уменьшается из-за снижения чувствительности к магнитной части системы.

Выводы

Были исследованы магнитные и сверхпроводящие свойства гетероструктур $\text{Fe}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Pb}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Fe}$, где Si_3N_4 представляют собой диэлектрические изолирующие слои контролируемой толщины. Была изучена зависимость величины эффекта ССК от толщин сверхпроводящих и изолирующих слоёв. Полный эффект ССК с величиной $\Delta T_c = 0.36$ К был зарегистрирован для образца с оптимальными параметрами сверхпроводящего (С) и изолирующего (И) слоёв.

Данное исследование основывается на наших предыдущих работах, в которых изучались эффекты ССК в структурах с окисленными интерфейсами Ф/С [37, 38], контроль над которыми был ограничен из-за технологических особенностей изготовления образцов. В настоящей работе удалось целенаправленно управлять параметрами границ Ф/С.

Наблюдение значительных величин эффекта ССК и его особенностей в структурах с различными типами барьеров на границах Ф/С находит качественное объяснение в рамках теории, основанной на эффекте близости С/Ф, однако количественное согласие является лишь частичным. Это может быть связано как с упрощающими предположениями теории, так и со сложной природой реальных границ раздела в эксперименте.

Стоит отметить, что в наших структурах большие величины эффекта (более 0.1 К) достигаются в относительно малых магнитных полях (порядка 1 кЭ). Кроме того, такие выраженные эффекты наблюдались в структурах с традиционными элементарными ферромагнитными и сверхпроводящими материалами, что может упростить процесс создания эффективных ССК-структур для будущих применений в сверхпроводящей спинтронике.

Благодарности

Авторы выражают огромную благодарность А. С. Осину, Я. В. Фоминову и В. Е. Катаеву за полезные дискуссии и ценные советы.

Литература

- Oh S., Youm D., Beasley M.R.: Appl. Phys. Lett. **71**, No. 16, 2376 (1997)
- Tagirov L.R.: Phys. Rev. Lett. **83**, No. 10, 2058 (1999)
- Buzdin A.I., Vedyayev A.V., Ryzhanova N.V.: Europhys. Lett. **48**, No. 6, 686 (1999)
- Ioffe L.B., Geshkenbein V.B., Feigel'man M.V., Fauchère A.L., Blatter G.: Nature (London) **398**, No. 6729, 679–681 (1999)
- Feigel'man M.V.: Phys. Usp. **42**, No. 8, 823 (1999)
- Buzdin A.I.: Rev. Mod. Phys. **77**, No. 3, 935 (2005)
- Linder J., Robinson J.W.A.: Nat. Phys. **11**, No. 4, 307 (2015)
- Eschrig M.: Rep. Prog. Phys. **78**, No. 10, 104501 (2015)
- Ryazanov V.V.: Phys. Usp. **42**, No. 8, 825 (1999)
- Ryazanov V.V., Oboznov V.A., Rusanov A.Yu., Veretennikov A.V., Golubov A.A., Aarts J.: Phys. Rev. Lett. **86**, No. 10, 2427 (2001)
- Gu J.Y., You C.-Y., Jiang J.S., Pearson J., Bazaliy Ya.B., Bader S.D.: Phys. Rev. Lett. **89**, No. 26, 267001 (2002)
- Zdravkov V.I., Lenk D., Morari R., Ullrich A., Obermeier G., Müller C., Krug von Nidda H.-A., Sidorenko A.S., Horn S., Tidecks R., Tagirov L.R.: Appl. Phys. Lett. **103**, No. 6, 062604 (2013)
- Lenk D., Morari R., Zdravkov V.I., Ullrich A., Khaydukov Yu., Obermeier G., Müller C., Sidorenko A.S., Krug von Nidda H.-A., Horn S., Tagirov L.R., Tidecks R.: Phys. Rev. B **96**, No. 18, 184521 (2017)
- Gaifullin R.R., Deminov R.G., Aliyev M.N., Tagirov L.R.: Magn. Reson. Solids **21**, No. 3, 19304 (2019)
- Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A., Schumann J., Kataev V., Büchner B., Fominov Ya.V., Garifullin I.A.: Phys. Rev. B **100**, No. 13, 134511 (2019)
- Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A., Kataev V., Osin A.S., Fominov Ya.V., Garifullin I.A.: Phys. Rev. B **109**, No. 14, 144517 (2024)
- Eschrig M.: Phys. Today **64**, No. 1, 43 (2011)
- Moraru I.C., Pratt W.P., Birge N.O.: Phys. Rev. Lett. **96**, No. 3, 037004 (2006)
- Steiner R., Ziemann P.: Phys. Rev. B **74**, No. 9, 094504 (2006)
- Stoutimore M.J.A., Rossolenko A.N., Bolginov V.V., Oboznov V.A., Rusanov A.Y., Baranov D.S., Pugach N.G., Frolov S.M., Ryazanov V.V., Van Harlingen D.J.: Phys. Rev. Lett. **121**, No. 17, 177702 (2018)
- Pugach N.G., Kupriyanov M.Yu., Vedyayev A.V., Lacroix C., Goldobin E., Koelle D., Kleiner R., Sidorenko A.S.: Phys. Rev. B **80**, No. 13, 134516 (2009)
- Leksin P.V., Garif'yanov N.N., Garifullin I.A., Schumann J., Vinzelberg H., Kataev V., Klingeler R., Schmidt O.G., Büchner B.: Appl. Phys. Lett. **97**, No. 10, 102505 (2010)
- Fominov Ya.V., Golubov A.A., Karminskaya T.Yu., Kupriyanov M.Yu., Deminov R.G., Tagirov L.R.: JETP Lett. **91**, No. 6, 308 (2010)
- Leksin P.V., Garif'yanov N.N., Garifullin I.A., Schumann J., Kataev V., Schmidt O.G., Büchner B.: Phys. Rev. Lett. **106**, No. 6, 067005 (2011)
- Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A., Schumann J., Kataev V., Büchner B., Fominov Ya.V., Garifullin I.A.: Beilstein J. Nanotechnol. **10**, No. 1, 1458 (2019)
- Gu Y., Halasz G.B., Robinson J.W.A., Blamire M.G.: Phys. Rev. Lett. **115**, No. 6, 067201 (2015)
- Singh A., Voltan S., Lahabi K., Aarts J.: Phys. Rev. X **5**, No. 2, 021019 (2015)
- Leksin P.V., Kamashev A.A., Schumann J., Kataev V.E., Thomas J., Büchner B., Garifullin I.A.: Nano Res. **9**, No. 4, 1005 (2016)
- Halterman K., Alidoust M.: Phys. Rev. B **94**, No. 6, 064503 (2016)
- Alidoust M., Halterman K., Valls O.T.: Phys. Rev. B **92**, No. 1, 014508 (2015)
- De Gennes P.G.: Phys. Lett. **23**, No. 1, 10 (1966)
- Li B., Roschewsky N., Assaf B.A., Eich M., Epstein-Martin M., Heiman D., Münzenberg M., Moodera J.S.: Phys. Rev. Lett. **110**, No. 9, 097001 (2013)
- Zhu Y., Pal A., Blamire M.G., Barber Z.H.: Nat. Mater. **16**, No. 2, 195 (2017)
- Deutscher G., Meunier F.: Phys. Rev. Lett. **22**, No. 9, 395 (1969)
- Miao G.-X., Yoon K., Santos T.S., Moodera J.S.: Phys. Rev. Lett. **98**, No. 26, 267001 (2007)
- Luo Y., Samwer K.: Europhys. Lett. **91**, No. 3, 37003 (2010)
- Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A., Kataev V., Osin A.S., Fominov Ya.V., Garifullin I.A.: JETP Lett. **119**, No. 4, 305 (2024)
- Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A., Kataev V., Osin A.S., Fominov Ya.V., Garifullin I.A.: Beilstein J. Nanotechnol. **15**, No. 1, 457 (2024)
- Fominov Ya.V., Golubov A.A., Kupriyanov M.Yu.: JETP Lett. **77**, No. 9, 510 (2003)

ABSTRACTS

Paradigm in radiation physics: conceptual scenarios for modification of the ion-irradiated surface of germanium during pore formation depending on sputtering and swelling

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

The formation of thin surface nanoporous Ge (NanoPGe) layers was studied in the processes of ion sputtering and high-dose ion implantation of a smooth monocrystal *c*-Ge substrate. Irradiation was carried out with $^{209}\text{Bi}^+$ ions with an energy of $E = 18$ keV, as well as $^{209}\text{Bi}^{++}$ ions with $E = 36$ and 72 keV at doses $D = 1.3 \cdot 10^{15} - 1.3 \cdot 10^{17}$ ion/cm². It was found that ion sputtering at $E = 18$ keV produces Bi:NanoPGe layers consisting of densely packed nanowires pressed against each other, while the irradiated surface layer level decreases relative to the original sample to 200 nm. For higher $E = 36$ and 72 keV, in contrast to ion sputtering, a swelling process of the Bi:NanoPGe layers was observed with increasing D , leading to an elevation of the irradiated region of the sample relative to the unirradiated surface by several tens of nanometers. The morphology of the swollen layers consists of thinner nanowires separated by free space. Conceptual physical scenarios for the interaction of accelerated ions with a flat *c*-Ge surface are discussed, determining the nature of the transformation of the morphology and level of the irradiated surface in dependence on D . A classification of fundamental conceptual scenarios (united by a paradigm in radiation physics) for Ge surface modification, accompanied by nanopore formation, under high-dose ion irradiation is proposed. Such modifications were caused by the competing physical processes of sputtering and swelling of the material.

PAGE 24

Nanoporous germanium layers formed by ion-stimulating deposition on thin films

A. L. Stepanov, I. A. Faizrahmanov, V. F. Valeev, A. M. Rogov, V. F. Sotnikova, V. I. Nuzhdin, D. A. Konovalov

The possibility for formation of nanoporous Ge layers – NanoPGe by irradiating thin amorphous *a*-Ge films obtained by ion-stimulated deposition by Ag^+ ions was studied. To produce *a*-Ge films, a monocrystal *c*-Ge target was sputtered by low-energy Xe^+ ions with simultaneous deposition onto a glass substrate made of fused quartz SiO_2 , pre-coated with a metallic conductive Ni layer. Subsequent ion irradiation by Ag^+ ions was performed at an energy of $E = 30$ keV, an ion beam of $J = 5$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, and doses of $D = 2.0 \cdot 10^{16}$ and $6.0 \cdot 10^{16}$ ion/cm². Scanning electron microscopy and optical reflectance spectroscopy were used to analyze the obtained material. It was shown that at a low irradiation dose the surface of *a*-Ge films remains smooth, whereas an increase in the dose leads to the formation of NanoPGe layer, consisting needle-like nanowires randomly located in the plane of the sample surface.

PAGE 35

Ion-beam methods for fabrication of optical diffraction grids based on nanoporous germanium layers

A. L. Stepanov, V. F. Valeev, A. M. Rogov, V. F. Sotnikova, I. A. Faizrahmanov, V. I. Nuzhdin, D. A. Konovalov

Ion-beam methods for the fabrication of optical thin-film diffraction gratings based on nanoporous *c*-Ge are considered. Three experimental methods for creating diffraction elements by irradiation through a mask are tested in the work, namely: (1) ion sputtering of the *c*-Ge surface, (2) ion implantation of the *c*-Ge substrate and (3) ion-stimulated sputtering of nanoporous NanoPGe layers pre-formed by ion implantation.

PAGE 41

Quasi-uniform state of magnetization in planar square-shaped Ni microparticles caused by concavity of sides

D. A. Bizyaev, N. I. Nurgazizov, A. P. Chuklanov, A. A. Bukharaev

Using computer modeling of the local magnetization distribution, the magnetic structure of planar square Ni particles with the set of degrees of side concavity was studied. Due to shape anisotropy, the quasi-uniform magnetization in such particles can be maintained at lateral dimensions of up to 9 μm . Magnetic force microscopy experimentally confirmed that quasi-uniform magnetization in Ni particles can be stable with lateral dimensions of up to 6.6 μm .

PAGE 47

Effect of magnetoelectric nonreciprocity in the submillimeter EPR spectroscopy of LiYF_4 doped by $^{166}\text{Er}^{3+}$ ions

V. F. Tarasov, M. V. Eremin

In a LiYF_4 single crystal monoisotopically doped with ^{166}Er ions, the effect of magneto-electric nonreciprocity was found, which is expressed as a change in the probability of resonant interaction of microwave radiation with the electron spins of erbium ions when the direction of the magnetic field is inverted. The effect is explained by quantum interference of the probability amplitudes of magnetic dipole and electric dipole resonance transitions excited by submillimeter microwave radiation between the ground and the first excited electron doublets of erbium ions. The observed dependences of the interference effect on the direction of the external magnetic field are well reproduced by quantum mechanical calculation.

PAGE 54

High-frequency EPR of Ho^{3+} ion in the LaF_3

G. S. Shakurov, V. V. Semashko, O. A. Morozov

In LaF_3 crystals the EPR spectra of Ho^{3+} ion replacing La^{3+} ion in a C_2 symmetry position were recorded and studied in the subterahertz frequency range. The parameters of splitting in the zero field, hyperfine structure constant and the value of g-factor are determined.

PAGE 58

Thermal and thermobaric effects on magnetic properties of $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4\pm\delta}$ layered perovskites

D. V. Mamedov, Yu. A. Deeva, V. V. Bazhal, T. I. Chupakhina, M. A. Cherosov, R. G. Batulin, T. P. Gavrilova

The Ruddlesden-Popper phase perovskites, with their quasi-2D structure, have become a significant subject of study for their potential use in optoelectronic devices, including solar cells, light-emitting diodes, and photodetectors. In this work, we study the magnetic properties of perovskite oxide compounds $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4\pm\delta}$ with the Ruddlesden-Popper phase structure in their initial state, after annealing at 1473 K, and after thermobaric treatment at 1473 K and 2.5 GPa. Specifically, we investigate possible changes in the magnetic properties of $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4\pm\delta}$, including the valence states of magnetic ions, the effective magnetic moment, and potential structural changes. Annealing likely alters the valence state of magnetic ions ($\text{Ni}^{2+} \rightarrow \text{Ni}^{3+}$), leading to a change in the effective magnetic moment, while structural distortions are minimal. The probable type of magnetic ordering is a canted antiferromagnetic or ferrimagnetic state. Thermobaric treatment of $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4\pm\delta}$ does not change the valence states of magnetic ions compared to the annealed state but induces significant distortions in the crystal structure. These distortions alter interatomic distances and angles, affecting the strength of magnetic interactions. The obtained results deepen the understanding of the influence of post-synthesis processing on magnetic properties and provide an opportunity to optimize the magnetic and electronic properties of layered perovskite oxides for various technological applications.

PAGE 61

Why can the effect of exchange narrowing of the EPR spectrum in dilute solutions of paramagnetic particles not be observed experimentally?

K. M. Salikhov

It is shown that a high spin exchange rate during bimolecular collisions of radicals in dilute solutions and alkali metal atoms in gases is a necessary but still insufficient condition for observing the effect of exchange narrowing of the initially inhomogeneously broadened EPR spectrum. For the exchange narrowing to occur, when the rapid spin exchange practically ceases to contribute to the exchange broadening of the observed uniformly broadened EPR line (spectrum), the spin exchange must be equivalent. This means that when calculating effective collision radii for spin dephasing (spin dephasing, spin decoherence) and for the effect of quantum coherence recoil from an interaction partner (coherence transfer), conditions must be met that allow only the large Heisenberg exchange interaction to be taken into account at the time of the collision and neglect all other interactions such as spin-orbital and hyperfine interaction.

PAGE 66

How to create efficient organic light emitters: studying the photophysical properties of donor-acceptor thermally activated delayed fluorescence emitters

A. A. Sukhanov, A. E. Mambetov, V. K. Voronkova

Compounds based on donor-acceptor (D-A) thermally activated delayed fluorescence (TADF) emitters, hold promise for the creation of a new generation of OLEDs. Knowledge of the mechanisms of TADF in emitters of this type is essential for improving their efficiency. In particular, the role of the photoinduced localized triplet state ^3LE in TADF is crucial. In 2025, a detailed study of a number of new compact D-A dyads was performed using time-resolved (TR) and pulsed EPR techniques. A study of a large number of TADF emitters of the D-A type revealed that the TREPR spectra are the sum of the spectra of two triplets (^3CS and ^3LE), and an increase in the contribution from ^3LE correlates with the TADF efficiency. The first observed electron spin polarization inversion (ESP) of the ^3CS state at long times and the temperature dependence of this effect provide compelling and direct experimental evidence for the spin-vibronic coupling mechanism in TADF. The results of a study of the influence of a heavy atom on the efficiency of TADF emitters are also presented.

PAGE 72

Separability, hidden parameters and quantum correlations of EPR (Einstein-Podolsky-Rosen)-Bohm-Bell pairs

N. K. Solovarov

The separations of the density matrices of EPR-Bohm-Bell pairs are obtained as sums of four equally probable pairs of density matrices of quantum-correlated qubits. This proves the validity of the Einstein-Podolsky-Rosen assumption about the possibility of a statistical model of composite quantum systems with hidden variables (parameters). These hidden parameters turned out to be the relative phases of the wave functions of the qubits. A visualization of the obtained separations in the form of vectors correlated by azimuthal phases on Bloch spheres is proposed.

PAGE 76

Echo phenomena in spin spectroscopy of muons and protons

N. M. Suleimanov, S. A. Moiseev

75 years ago, Erwin Hahn discovered that nuclear spins precessing with different phases in inhomogeneous magnetic fields created by the local environment of these spins can be returned to a coherent state in which they precess in phase with each other by applying a certain sequence of radio frequency pulses to the spin system. This restored coherent state leads to the appearance of a response pulse signal, which E. Hahn called a spin echo. Currently, impressive advances have been made in the spectroscopy study of matter at the atomic and molecular levels with use of this phenomenon. Based on the nuclear spin echo effect discovered by E. Hahn, the methods of magnetic resonance research have reached a modern level of development and widespread distribution. At the same time, a nuclear physics method for studying matter, muon spin spectroscopy, has been actively developing in recent years. The development of research in this direction has led to a conceptually new approach to spin echo generation, when there is no need to use intense RF pulses, and the muon spin echo is excited in a zero magnetic field by applying a single $\pi(180^\circ)$ pulse of a constant magnetic field.

PAGE 79

Structural, optical and photoelectric properties of Si layers with embedded indium and arsenic impurity ions

R. I. Batalov, V. V. Bazarov, E. M. Begishev, N. M. Lyadov, V. F. Valeev, H. A. Novikov, R. F. Likerov

Sequential high-dose implantation of single-crystal Si with In^+ and As^+ ions was performed, followed by steady-state thermal annealing in the solid-phase mode or pulsed ion annealing in the liquid-phase mode. The structural, optical, and photoelectric properties of the implanted layers were studied using scanning electron microscopy, secondary ion mass spectrometry, X-ray diffraction, optical infrared spectroscopy and photoconductivity. It was shown that pulsed annealing leads to deep diffusion of As atoms into Si down to 1 μm , forming a Si:As solid solution, while the In impurity is displaced to the surface. Thermal annealing leads to a slight redistribution of impurities and the formation of secondary InAs and In_2O_3 phases. In both cases, a high electron concentration ($\sim 2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) was achieved, and an intense absorption band with a maximum at 3.6 μm was recorded. The photoresponse spectra of the mesa-diodes at 300 K show a photosensitivity range of 0.5–1.2 μm , comparable to a typical Si photodiode. No photoresponse was detected in the range of 1.2–2.4 μm .

PAGE 84

EPR studies and modeling features of spectra from iron-containing blood proteins

M. I. Ibragimova, A. I. Chushnikov, I. V. Yatsyk, G. G. Gumarov

This paper discusses the features of the EPR spectra of blood proteins containing ferric iron ions in the high-spin state ($S = 5/2$). The capabilities and features of modeling EPR spectra recorded in the X-band in the temperature range from 5 to 80 K for transferrin, methemoglobin, and erythrocyte catalase are demonstrated.

PAGE 89

Butterfly and photon echo amplification in a pulsed magnetic field in $\text{Y}(\text{Lu})\text{F}_4\text{:Er}^{3+}$ crystals

A. M. Shegeda, O. A. Morozov

The paper examines the influence of nanosecond magnetic field pulses on the photon echo signal in YLiF_4 and LuLiF_4 samples activated by Er^{3+} ions. A strong dependence of the photon echo intensity on the magnetic pulse parameters and the direction of change of the external magnetic field $\mathbf{H}$ was found. When magnetic pulses are applied, the echo intensity can increase by a factor of 5–6.

PAGE 96

Modulation of spectral characteristics of the sensor surface of a composite fiber thermal sensor

N. S. Perminov, A. V. Shkalikov

A prototype thermo-optical sensor based on a modified fiber with a textured surface is described and experimentally tested. The processing method created a zone with adjustable roughness, which functions similarly to Bragg grating effects and can be electrically modulated to control phonon-photon interactions. This solution is aimed at improving the spectral characteristics of detection by increasing the active surface area and controlling its properties. The potential for using the device in applications requiring interference-resistant temperature measurement is discussed, as is the compatibility of the proposed modification method with intrafiber light cage technologies in quantum information science.

PAGE 101

Chiral and topological properties of a ring photonic molecule composed of four optical microresonators

N. S. Perminov, S. A. Moiseev

In this study, a theoretical model of a ring-shaped photonic molecule consisting of four high-quality optical microresonators is analyzed. It is shown that introducing chiral asymmetry through a specific selection of phase shifts and coupling coefficients between the elements leads to the formation of a system with non-trivial topological properties. The computational analysis revealed that under an asymmetric distribution of coupling parameters and their phases, the complex spectrum of the system retains a symmetric structure. However, the intensity distributions among individual resonator modes significantly depend on the geometric chirality of the configuration. The possibility of targeted control over the spectral-topological characteristics of the system through the variation of these parameters is theoretically substantiated. In particular, the possibility of inducing states of two-fold and three-fold spectral degeneracy is demonstrated. Such controllable degenerate states are of significant interest for developing methods of recorded information recovery and can serve as a basis for creating efficient quantum memory protocols.

PAGE 109

Automation of specialized magnetic resonance imaging system's settings

V. L. Odivanov, Ya. V. Fattakhov, A. R. Fakhrutdinov, V. A. Shagalov, A. A. Bayazitov

The structure of the specialized magnetic resonance imaging system's software package, software tools for optimizing measurement procedures and automating the settings of MRI equipment during operation, as well as during the development of new components of the receiving and transmitting system are described.

PAGE 115

Forming microstructures on the surface of silicon by powerful light pulses to improve the efficiency of solar cells

B. F. Farrakhov

Various textured surface shapes were obtained on Si wafers by ion implantation followed by pulsed light heating. The effects of certain ion implantation modes with As⁺, In⁺, and Mn⁺ ions and pulsed light heating on the formation mechanism of recrystallized textured periodic microstructures from the molten phase on the Si surface were determined.

PAGE 119

Diagnosis of voice diseases of teachers. Development of a software module for measuring the amplitude and energy of voice formants

A. A. Bayazitov, M. Ya. Fattakhova, R. R. Badrieva, V. L. Odivanov, Ya. V. Fattakhov

The conducted studies of the vocal function of “voice professionals” – university teachers and school teachers – have shown a wide prevalence of voice diseases. The analysis of the results revealed the need to refine some software modules. A software module has been created that allows the development of new methods for the diagnosis of vocal disorders using spectral analysis of voice and magnetic resonance imaging, as well as original methods for the rehabilitation of patients with vocal disorders.

PAGE 122

The synthesis, structure and electrochemical properties of Ge–Ni composite films obtained by magnetron sputtering

V. V. Bazarov, V. F. Valeev, R. R. Garipov, N. M. Lyadov, V. I. Nuzhdin, N. M. Suleymanov, V. A. Shustov, I. V. Yanilkin

Composite films of Ge_xNi_{1-x} ($x = 0.7–1.0$) were synthesized on Si(111) substrates using direct current magnetron sputtering. The elemental composition, phase transformations, and surface morphology were studied using X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM). The initial films were shown to be amorphous; after thermal annealing at 300 °C, a crystalline phase of nickel germanide NiGe was formed. The electrocatalytic activity of samples additionally irradiated with Ni⁺ ions in the ethanol oxidation reaction was studied. It was found that nickel implantation shifts the ethanol oxidation potential to higher values (up to 0.96 V) and increases the current density, with the effect becoming more pronounced with decreasing film thickness.

PAGE 127

Superconducting spin valve effect in Fe/Si₃N₄/Pb/Si₃N₄/Fe heterostructures

A. A. Kamashev, N. N. Garif'yanov, D. A. Arbuzov, A. A. Validov, I. A. Garifullin

The structures of the superconducting spin valve (SSV) Fe/Si₃N₄/Pb/Si₃N₄/Fe (where Si₃N₄ is a dielectric insulating layer of controlled thickness) were investigated. The dependence of the SSV effect magnitude on the thicknesses of the superconducting (S) and insulating (I) layers was studied. An optimal choice of the S and I layer thicknesses enabled the observation of a complete switching between the normal and superconducting states when the mutual orientation of the magnetizations of the ferromagnetic (F) layers was changed from antiparallel to parallel. The maximum SSV effect, equal to 0.36 K, was achieved in an external magnetic field of 1 kOe. The obtained results demonstrate the promise of SSV structures with tunable F/S interface transparency controlled by an insulating interlayer. This opens new opportunities for the development of such systems and their potential application in superconducting spintronic devices.

PAGE 131

ЕЖЕГОДНИКУ – 25 ЛЕТ!

Слово редактора

К. М. Салихов,
академик РАН,
научный руководитель
КФТИ



Четверть века для нашего Ежегодника – это не просто юбилейная дата, а подтверждение того, что проект выдержал проверку временем и стал неотъемлемой частью институтской идентичности.

За эти 25 лет издание превратилось в полноценную историческую летопись, запечатлевшую путь КФТИ от первых шагов в новом тысячелетии до сегодняшних дней,

отмеченных масштабными реформами и поиском новых форм организации науки.

Перелистывая выпуски прошлых лет, мы видим, как смелые идеи становились государственными заданиями, а молодёжные инициативы вырастали в самостоятельные научные направления.

Наш Ежегодник – дань уважения нашему общему труду и тем традициям, которые позволяют нам сохранять устойчивость и уверенно смотреть в будущее, фиксируя каждое значимое достижение родного института.

Предисловие редактора к первому выпуску Ежегодника КФТИ

Учёный совет нашего института решил издавать ежегодник, отражающий основные события в жизни института за год. Первый выпуск посвящается 2001 году. Может возникнуть вопрос, нужно ли это издание, ведь мы и так представляем ежегодный отчёт о научно-исследовательской и научно-организационной деятельности института. Но, с одной стороны, эти отчёты хранятся в архивах и малодоступны. С другой стороны, формат официального отчёта не позволяет дать полное представление обо всех значительных событиях в жизни института. Например, в отличие от отчёта, в ежегоднике более полно будут отражаться не только результаты исследований, но и текущая работа научных сотрудников, незаконченные и продолжающиеся исследования, прикладные работы, итоговые конкурсы научных работ, конкурсы молодых учёных, персоналии. В ежегоднике также будет отражена работа учёных советов, вспомогательных служб института, работа научного семинара, информация о гостях института, о посещении института известными учёными и государственными деятелями, и др.

Ежегодник интересен в нескольких проекциях. Это и отчёт об институте за год, это и часть летописи института. В будущем ежегодник окажет неоценимую помощь при написании истории института. Но ежегодник, несомненно, поможет и в нашей сегодняшней работе. Он поможет лучше осознать достижения и трудности в работе института.



Естественно, что первый выпуск ежегодника – особый. Формат этого выпуска является экспериментальным, в будущем он может быть изменён в соответствии с отзывами на первый выпуск. В первом выпуске при изложении результатов, полученных в 2001 году, даны иногда расширенные формулировки проблем и аннотации результатов, полученных по этой проблеме в предыдущие годы. Это позволяет ежегоднику стать самодостаточным изданием. По тем проблемам, по которым в первом выпуске дано расширенное введение, в последующих вы-

пусках можно будет этого не делать и сосредотачиваться только на новых результатах.

В подготовке этого выпуска ежегодника принимали участие многие сотрудники института. Но я хочу особо выделить научно-организационную работу Учёного секретаря института Виолеты Константиновны Воронковой. Всем, кто подготовил этот выпуск, большое спасибо. Всех физтеховцев поздравляю с рождением ежегодника института.

К. М. Салихов

Поздравление руководителя

С. М. Хантимеров,
к.ф.-м.н., руководитель
КФТИ им. Е. К. Завойского
ФИЦ КазНЦ РАН



Дорогие коллеги, друзья и партнёры Казанского физико-технического института!

В этом году наш Ежегодник отмечает знаменательную дату – 25 лет с момента выхода первого выпуска. Четверть века для академического периодического издания – это не просто красивая цифра, а серьёзный рубеж, подтверждающий, что проект выдержал проверку временем, реформами и сменой поколений.

Когда в 2001 году по инициативе К. М. Салихова и при поддержке Учёного совета вышел первый том, перед коллективом стояла чёткая задача: создать не сухой формальный отчёт для архива, а живую, доступную летопись жизни КФТИ. Сегодня, перелистывая страницы очередного выпуска, я с уверенностью могу констатировать: эта задача решена блестяще. Ежегодник превратился в полноценный научно-информационный и исторический документ, который фиксирует каждый значимый шаг нашего института – от смелых фундаментальных гипотез до их реализации в рамках государственных заданий и конкурсных грантов РНФ, от первых шагов аспирантов до вручения Международной премии им. Е. К. Завойского и защиты докторских диссертаций.

Особая ценность издания заключается в его органичном сочетании строгой отчётности и живой науки. Здесь, в разделе “Научные сообщения” рождаются и “обкатываются” смелые гипотезы, здесь первые публикации аспирантов становятся надёжным стартом для больших статей в ведущих мировых журналах.

Отдельно хочу отметить социальную миссию издания. Наука делается людьми, и разделы “Персоналии”, “Памяти...”, а также репортажи о культурных и спортивных мероприятиях создают ту самую атмосферу преемственности, без которой невозможна устойчивая работа научного коллектива. Юбилейные материалы, истории ветеранов, фотографии с семинаров и новогодних встреч сохраняют душу института, передавая следующим поколениям не только знания, но и ценности научного братства.

Подготовка каждого тома – это результат кропотливой, часто невидимой, но абсолютно необходимой работы редакционной команды. Я глубоко признателен ответственным и техническим редакторам, корректорам и всем сотрудникам, кто на протяжении четверти века обеспечивает стилистическое единообразие, научную точность и своевременный выпуск издания. Спасибо вам за профессионализм, терпение и творческую отдачу.

25-летие Ежегодника – это повод оглянуться назад с благодарностью и посмотреть вперёд с уверенностью. Ежегодник КФТИ остаётся надёжным зеркалом нашей деятельности, инструментом внутреннего диалога и мостом во внешний научный мир.

Поздравляю всех сотрудников, авторов и читателей с этим юбилеем. Пусть Ежегодник продолжает жить, развиваться и вдохновлять новые поколения физтеховцев на смелые идеи, честный труд и верность научным традициям. В добрый путь к новым томам нашей общей летописи!

Работа Учёного совета по обсуждению идеи Ежегодника и принятию решения о его издании отражена в приводимых ниже выписках из протоколов заседания Учёного совета.

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Казанский научный центр
КАЗАНСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ВЫПИСКА из ПРОТОКОЛА № 16 от 4 мая 2001 года
заседания Ученого Совета института

Председатель: Салихов К.М.

Секретарь: Курбатова Н.В.

Присутствовали: 18 членов Ученого Совета из 20: Салихов К.М., Воронкова В.К., Бухараев А.А., Гайнутдинов Х.Л., Гарифуллин И.А., Жихарев В.А., Кессель А.Р., Лисин В.Н., Моисеев С.А., Овчинников И.В., Самарцев В.В., Соловаров Н.К., Таланов Ю.И., Тарасов В.Ф., Тейтельбаум Г.Б., Хайбуллин И.Б., Хлебников С.Я. Шакирзянов М.М.,

(4) – (2) СЛУШАЛИ: Воронкову В.К. об издании оттисков наших работ в виде ежегодника .

ПОСТАНОВИЛИ: Информация к активному размышлению.

Председатель УС

Салихов К.М.

Ученый секретарь

Воронкова В.К.

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Казанский научный центр
КАЗАНСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ВЫПИСКА из ПРОТОКОЛА № 24 от 5 сентября 2001 года
заседания Ученого Совета института

Председатель: Кессель А.Р.

Секретарь: Курбатова Н.В.

Присутствовали: 12 членов Ученого Совета из 20: Воронкова В.К., Бухараев А.А., Гайнутдинов Х.Л., Кессель А.Р., Лисин В.Н., Моисеев С.А., Осокин Д.Я., Петухов В.Ю., Соловаров Н.К., Таланов Ю.И., Тарасов В.Ф., Тейтельбаум Г.Б., Шакирзянов М.М.

(4)-(3) СЛУШАЛИ: Воронкову В.К. об издании ежегодника КФТИ. Главный редактор – Салихов К.М.

ПРЕДЛОЖЕНИЕ 1 (Воронкова В.К.): Каждое подразделение должно выделить своего представителя в эту редакционную комиссию.

ПРЕДЛОЖЕНИЕ 2 (Бухараев А.А.): Предварительно выработать формат издания и это поручить маленькой комиссии из 3-х чел.

СЛУШАЛИ: Кесселя А.Р. об идее этого издания.

ПОСТАНОВИЛИ: Создать «комиссию по формату» в составе: 1) Бухараев А.А.

2) Воронкова В.К.

3) Тарасов В.Ф.

4) Гайнутдинов Х.Л.

Голосование: “ЗА” - единогласно.

Председатель

Кессель А.Р.

Ученый секретарь

Воронкова В.К.

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Казанский научный центр
КАЗАНСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ВЫПИСКА из ПРОТОКОЛА № 33 от 9 ноября 2001 года
заседания Ученого Совета института

Председатель: Салихов К.М.
 Секретарь: Курбатова Н.В.

Присутствовали: 15 членов Ученого Совета из 20: Салихов К.М., Воронкова В.К., Бухараев А.А., Гайнутдинов Х.Л., Кессель А.Р., Лисин В.Н., Моисеев С.А., Овчинников И.В., Осокин Д.Я., Петухов В.Ю., Самарцев В.В., Соловаров Н.К., Тарасов В.Ф., Хлебников С.Я., Шакирзянов М.М.

(2)-(2) СЛУШАЛИ: Воронкову В.К. об утверждении ред. коллегии по выпуску «Ежегодника КФТИ»:

- | | |
|------------------------------------|----------------------|
| 1) Салихов К.М. – главный редактор | |
| 2) Тарасов В.Ф. | 9) Жихарев В.А. |
| 3) Воронкова В.К. | 10) Гайнутдинов Х.Л. |
| 4) Мосина Л.В. | 11) Вишневская Г.П. |
| 5) Ахмин С.М. | 12) Фаттахов Я.В. |
| 6) Шегеда А.М. | 13) Черников С.К. |
| 7) Бухараев А.А. | 14) Лобков В.С. |
| 8) Вавилова Е.Л. | 15) Калачев А.А. |

ПОСТАНОВИЛИ: Утвердить. Голосование: “ЗА” – единогласно.

Председатель Ученого Совета

Салихов К.М.

Ученый секретарь

Воронкова В.К.



В. К. Воронкова,
 д.ф.-м.н., г.н.с., руководитель
 лаборатории спиновой физики
 и спиновой химии

Поздравляю!!!!

Двадцать пятый выпуск Ежегодника, даже не верится. Но двадцать четыре тома уже стоят рядом в шкафу у меня, у Кева Минуллиновича Салихова и у многих сотрудников института. Главное, эти сборники теперь встречают нас при входе в институт: смотрите, читайте, завидуйте – это летопись нашего института.

Эти сборники – воплощение проекта Кева Минуллиновича, одного из его проектов, которые изменили наш институт. Важно, что в реализации этого проекта приняли участие почти все сотрудники, в этом его особенность и ценность. Я горжусь, что приняла активное участие в становлении Ежегодника и внесла свой вклад в его

развитие. В первые годы всё было непросто, надо было выработать определённый формат издания, определиться с разделами и их содержанием, направлять сотрудников в нужное русло при написании ими научных статей для Ежегодника. Трудности преодолеваются и забываются, результат остаётся.

Вот первый выпуск сборника, он немного отличается по цвету, всё же первый, но по дизайну, который создал Сергей Михайлович Ахмин, и по структуре, по разделам, всё, как и в наши дни. Это замечательно! Значит, в первый год всё правильно продумали, чтобы полно отражать жизнь института. Жизнь требует развития, надеюсь, всё будет развиваться только в лучшую сторону.

Команда, которая делает Ежегодник, изменилась за эти 25 лет, но многие работают с первого дня. Много сил в своё время отдала Ежегоднику Нина Алексеевна Карташёва, сейчас она на пенсии, но мы с благодарностью вспоминаем её труд.

Не буду перечислять команду, которая сегодня создаёт Ежегодник, все их знают. Желаю им больших успехов, сил. Это ответственно – отражать самые важные результаты, события, факты, которые определяют жизнь и успехи института, которые делают историю института.

Всех поздравляю с двадцать пятым выпуском, особенно Кева Минуллиновича Салихова, и огромное ему спасибо, что он предложил издавать Ежегодник и принял участие в реализации этой замечательной идеи.

* * *

В. Ф. Тарасов,
д.ф.-м.н., г.н.с.
лаборатории
радиоспектроскопии
диэлектриков



Как быстро летит время. Казалось бы, совсем недавно Кев Минуллинович Салихов, будучи директором КФТИ, выступил с инициативой создать печатную летопись жизни института. Учёный совет института эту инициативу поддержал. В результате готовится в печати двадцать пятый выпуск Ежегодника.

В своей вступительной статье к первому выпуску Ежегодника К. М. Салихов подчеркнул, что каждый выпуск представляет часть летописи института, и может оказать большую помощь при написании истории института. С другой стороны, Ежегодник может быть полезным и в текущей научной и научно-организационной деятельности сотрудников института.

Прошло 25 лет, и я с уверенностью могу констатировать, что обе поставленные цели успешно достигнуты. В выпусках Ежегодника собран обширный фактический материал обо всех сторонах деятельности института. Заинтересованный человек легко может узнать о том, как в течение этих лет менялась структура института, какие научные достижения в институте считались важными, как

проходили научные конференции и другие важнейшие мероприятия, организованные институтом.

Исключительно важен и интересен мне раздел “Научные сообщения”. Когда у меня возникает какой-то научный вопрос, ответ на который можно получить у компетентного сотрудника института, полезно бывает сначала ознакомиться с уже опубликованными им научными результатами. Это делает последующий диалог более конкретным и продуктивным. В этой связи хочу отметить большую важность того, что все выпуски Ежегодника доступны в электронном виде. Это позволяет быстро проводить электронный поиск интересующих материалов.

Науку делают люди, и раздел “Персоналии” даёт прекрасную возможность рассказать о работающих сотрудниках института в их юбилейные даты и позволяет вспомнить о бывших сотрудниках, которых уже нет с нами.

Деятельность сотрудников в институте не ограничивается выполнением служебных обязанностей. Немалую роль играют проводимые в институте культурные и спортивные мероприятия, которые также подробно освещаются в Ежегоднике. Хочу особо выделить репортажи о торжественных заседаниях, посвящённых встрече Нового года, иллюстрированные замечательными фотографиями. Вообще говоря, наличие в Ежегоднике большого числа качественных фотографий очень украшает это издание.

В заключение я хотел бы поздравить всех сотрудников института с тем, что у нас уже четверть века выпускается такое замечательное издание. Конечно, особые поздравления тем людям, благодаря которым идея о создании Ежегодника была воплощена в жизнь, живёт и развивается. Я не буду перечислять здесь все фамилии. Они напечатаны в каждом выпуске Ежегодника.

* * *

Р. И. Баталов,
к.ф.-м.н., с.н.с.,
руководитель лаборатории
интенсивных радиационных
воздействий



Ежегодник КФТИ незаменим, когда знакомишь коллег, посещающих институт, со структурой организации, основными направлениями исследований, ведущихся в КФТИ, с публикациями сотрудников и их участием в научных мероприятиях, грантах, патентах и преподавательской деятельности. Ядром Ежегодника являются научные сообщения сотрудников всех подразделений института, на базе которых происходит “обкатка” имеющегося теоретического и экспериментального материала для написания в дальнейшем полноформатных научных статей.

Сердечно поздравляю редакцию Ежегодника с его двадцатипятилетием!

Ежегодник: становление

С. М. Ахмин,
к.ф.-м.н., руководитель
редакционно-издательского
отдела ФИЦ КазНЦ РАН



С середины 1990-х годов помимо планомерной работы по выпуску журнала *Applied Magnetic Resonance* редакция журнала активно вела работу по реализации других издательских проектов различной сложности. Так, например, в те годы были подготовлены и вышли в свет книги: “Евгений Константинович Завойский” материалы к биографии (Унипресс 1998), “Грани сотрудничества” к 10-летию сотрудничества Казанского и Гиссенского университетов (Унипресс 1999), Коновалов А. И. “Казань и Российская академия наук” (Унипресс 1999), Сборник отчётов фонда НИОКР АН РТ (Унипресс 1998).

К 2000 году подобных проектов сотрудниками редакции было реализовано более десяти. Но, хотя вся работа от разработки макета до типографии выполнялась в КФТИ, права на издание приходилось передавать сторонним издательствам. Чтобы ликвидировать эту “несправедливость”, было принято решение о получении физтехом лицензии на издательскую деятельность, и в 2000 году издательство КФТИ КазНЦ РАН был зарегистрировано в Российской книжной палате.

В том же 2000 году под редакцией Кева Минуллиновича Салихова и Виолеты Константиновны Воронковой была подготовлена и вышла в свет первая книга в издательстве КФТИ КазНЦ РАН: “Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского” справочное издание (Физтех-Пресс 2001). Сборник содержал материалы, отражающие

деятельность структурных подразделений института по состоянию на конец 2000 года, и включал некоторый справочный материал. Там ещё не было иллюстраций и отсутствовали научные сообщения, но в этом издании уже просматривалась структура будущего Ежегодника. Сборник вышел весной 2001 года, и той же весной на Учёном совете КФТИ впервые прозвучало предложение об издании научных сообщений в виде Ежегодника.

По мере уточнения структуры и объёма будущего издания в редакции разрабатывался его макет. В поисках решения мне пришлось походить по библиотекам. Прямых аналогов Ежегоднику найти не удалось, но изучение библиотечных фондов показало, что наиболее подходящей формой представления материала являются Труды или Вестники различных институтов. Так был выбран размер издания и вариант двухколоночной вёрстки.

Непосредственная работа над макетом первого Ежегодника велась с особым тщанием. Поскольку обязательные экземпляры, отсылаемые в Книжную палату, попадали на полки ведущих библиотек страны, а часть тиража планировалось разослать напрямую в дружественные институты, было понимание того, что работу надо выполнить так, чтобы достойно представить КФТИ и как институт, и как молодое издательство. Но не менее важным было и то, как примут тираж первого Ежегодника сотрудники физтеха, большинство из которых были авторами статей. Несомненной удачей, определившей облик и даже судьбу Ежегодника, стала обложка, которую исполнил большой друг физтеха, автор логотипа КФТИ, талантливый художник-график из Новосибирска Игорь Анатольевич Аксёнов.

Кампания по сбору материалов и написанию статей развернулась осенью 2001 года. Эту кампанию возглавила Виолета Константиновна Воронкова, и ей активно помогала Нина Алексеевна Карташёва. Именно они обеспечили своевременное написание сотрудниками КФТИ научных сообщений и способствовали наполнению материалом других рубрик. Будучи убеждёнными сторонниками идеи Ежегодника, они не только собирали, но и редактировали авторский материал, вычитывая его при получении и на этапе доредакционной подготовки.

Тираж Ежегодника был изготовлен весной 2002 года. Благодаря обложке Ежегодник выглядел привлекательно, его хотелось взять в руки, рассмотреть, узнать, что внутри. Сборник, полученный из типографии, произвёл на сотрудников физтеха в целом хорошее впечатление, его полиграфическое исполнение никого не разочаровало и даже добавило мотивации к началу работы над следующим выпуском. Авторы быстро и с удовольствием разобрали тираж по лабораториям, более того, руководство института взяло с собой несколько экземпляров на ежегодное собрание РАН.

Таким образом, редакция *Applied Magnetic Resonance* успешно справилась с задачей по подготовке к выходу в свет первого Ежегодника КФТИ и уже вернулась к привычному расписанию работы, когда вдруг в середине





2002 года меня пригласил к себе директор ИОФХ Олег Герольдович Синяшин и попросил оказать содействие в организации издания ежегодника Института органической и физической химии им. А. Е. Арбузова. Предложение было неожиданным, но очень привлекательным. В

перспективе оно открывало возможность издания серии ежегодников всех институтов Казанского научного центра. Такую возможность упускать было нельзя, и, поразмыслив и перераспределив свои силы, сотрудники редакции взялись за эту работу.

Первый Ежегодник ИОФХ вышел в свет в декабре 2003 года. В предисловии к нему Олег Герольдович отметил: “Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского первым начал издавать ежегодник, тем самым дав некий образец другим институтам КазНЦ. Не скрою, именно выход ежегодника КФТИ послужил толчком к началу аналогичной работы в ИОФХ”.

К сожалению, остальные институты Казанского научного центра так и не смогли поддержать инициативу КФТИ, и серия ежегодников ограничилась лишь двумя. Вместе с тем, эти ежегодники, пройдя непростой 25-летний издательский путь, доказали свою полезность и даже необходимость, что вселяет уверенность в продолжении их издания в будущем. Единственное, что хотелось бы пожелать Ежегоднику, это чтобы его печатная версия стала наконец полноцветной.

Ежегодник как процесс

С. Г. Львов,
заместитель руководителя
редакционно-издательского
отдела ФИЦ КазНЦ РАН



Над подготовкой Ежегодника к выходу в свет, приданию ему как полиграфическому изданию законченного вида трудится техническая команда – редакция Ежегодника.

Ежегодник позволяет читателю представить научную деятельность института во всей её полноте. Его содержание можно разделить на две основные части. Одна часть – научно-исследовательская, формирующая секцию “Научных сообщений”, и вторая – научно-информационная, содержащая всю информацию о важнейших событиях, достижениях в прошедшем году, научно-организационной работе, полную статистическую информацию по публикациям сотрудников, грантовой поддержке, структуре и работе института.

Следует отметить, что как при старте Ежегодника КФТИ, так и на протяжении всех последующих 25

лет, техническая команда опиралась на свой опыт, приобретённый при работе с журналом *Applied Magnetic Resonance*, вся допечатная подготовка которого более десяти лет осуществлялась в редакционно-издательской группе КФТИ под общим производственным контролем издательства Шпрингер (Вена Нью-Йорк). Такой опыт обусловил высокие стандарты и требования, реализуемые в процессе подготовки Ежегодника к печати.

Одним из факторов, задающих конечный вид издания, является соблюдение единого стилевого пространства во всех размещаемых материалах: текстовых, табличных, графических, формульных. И конечно, наиболее сложной задача соблюдения такого единообразия проявляется при обработке материалов научных сообщений, содержащих, как правило, все эти элементы. А таких сообщений в каждом номере, если взять среднее за все годы, около 30. Поэтому очень важным является качество предоставляемого авторами в редакцию материала, корректное соблюдение выработанных Требований для авторов. Нужно отметить, что Требования по степени подробности являются проекцией требований большинства научных журналов, и подготовка научной статьи в Ежегодник является прекрасной “тренировкой” такого умения, особенно для молодых учёных и аспирантов, а иногда ещё и студентов, в чём за эти годы мы могли многократно убедиться. Другим важным выводом, который можно вынести из опыта такой работы, является заключение о том, что корректное соблюдение требований к форме изложения и представления материала

соответствует и правильному смысловому его наполнению и изложению. А отклонение и нарушение, казалось бы, чисто формальных требований, очень часто выявляет нечёткое, путаное изложение в научном сообщении. Таким образом, наша работа заключается не только в верстке и допечатной подготовке представленных статей, но часто оборачивается тесным взаимодействием с научными сотрудниками по смысловой доработке статей. И мы очень благодарны авторам за внимательное и заинтересованное отношение к данной работе.

Подготовка научно-информационной части Ежегодника требует системного подхода, планирования и взаимодействия с различными подразделениями нашего института. В течение всего года собирается информация о конференциях, семинарах, подписанных соглашениях и полученных грантах, о визитах гостей, защите диссертаций, о наградах, присуждённых сотрудникам института, и многом другом.

Ключевую роль в сохранении памяти о людях, благодаря которым состоялся наш институт, играет раздел “Персоналии”. Здесь печатаются статьи о сотрудниках института как по радостным датам их юбилеев, так и некрологи. Пожалуй, этот раздел можно назвать “сердцем” нашего издания. Дела и судьбы сотрудников формируют живую историю института, столь важную для становления будущих поколений учёных. В конце раздела приводится перечень материалов по персоналиям с первого по двадцать пятый выпуск.

Нельзя не отметить и тот факт, что Ежегодник выходит в двух вариантах – электронном цветном, и печатном чёрно-белом, что подразумевает этап адаптации исходных цветных иллюстраций к печатному варианту в градациях серого и высоком разрешении.

Мы с благодарностью относимся к нашим коллегам из АО “Информационно-издательский центр”, и прежде всего Гульнар Мубаракшоновне Барышниковой, заместителю генерального директора АО ИИЦ. Высокий профессионализм сотрудников АО ИИЦ, творческий неформальный подход к делу, внимание к деталям, строгий контроль качества и четкое соблюдение сроков обеспечивают изготовление тиража нашего Ежегодника на самом высоком уровне.

Если первые двадцать лет каждый выпуск Ежегодника представлял собой отдельное издание со своим уникальным



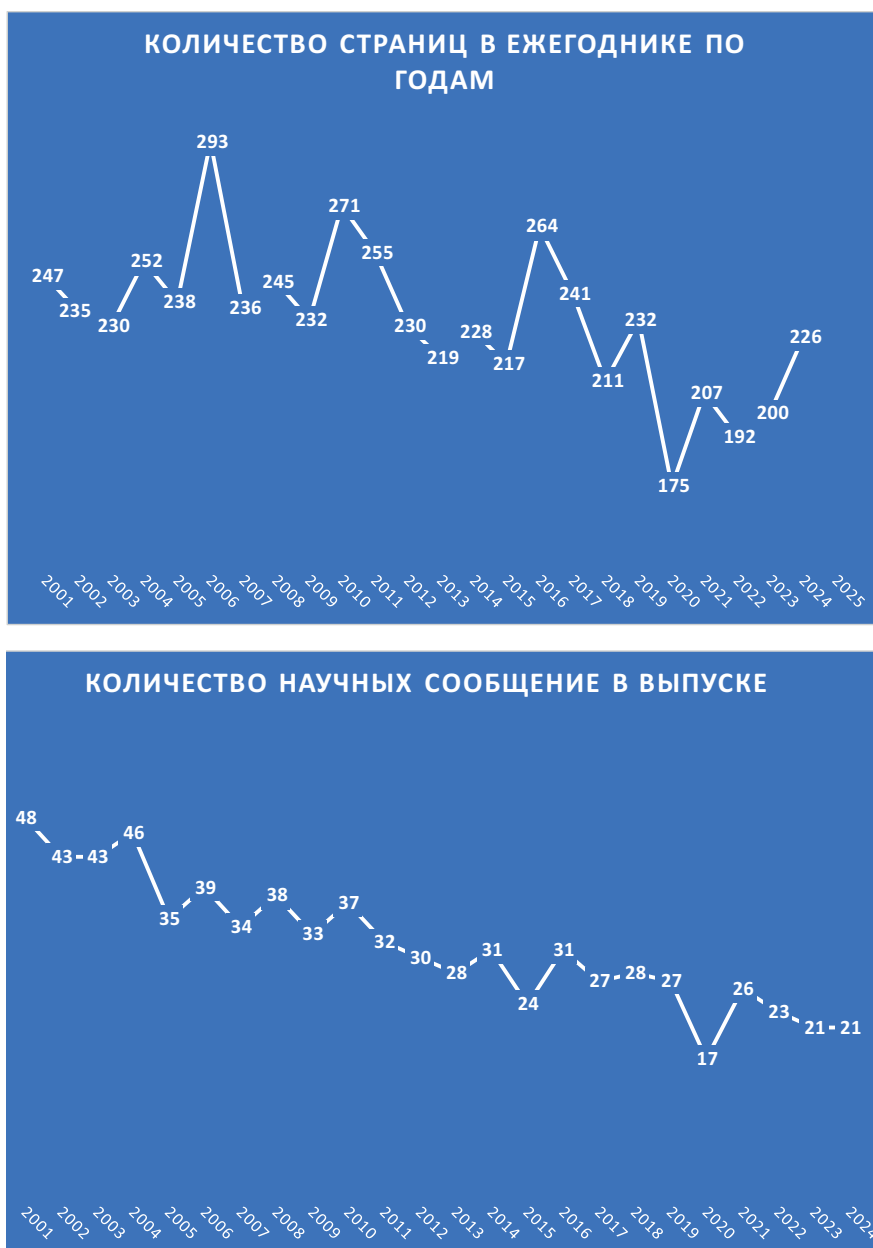
номером ISBN, то с 2022 года он стал периодическим изданием с единым номером ISSN. Научным сообщениям стали присваиваться индексы DOI. То есть уже сейчас преодолеваются формальные препятствия на пути к дальнейшей поступательной эволюции институтского научного издания.

Ещё раз хотим поздравить всех сотрудников нашего института с 25-м выпуском Ежегодника, поблагодарить за заинтересованное, творческое его наполнение! Некоторое представление о проделанной совместной работе можно получить на приводимых статистических графиках.

И в заключение: в настоящее время допечатная подготовка Ежегодника выполняется следующим составом сотрудников:

- подготовка блока научных сообщений, редактирование и верстка: Сергей Глебович Львов,
- подготовка общей научно-информационной и статистической части, редактирование и верстка: Ольга Борисовна Яндуганова,
- научное, грамматическое и стилистическое редактирование: Ляйля Васильевна Мосина,
- техническое редактирование на финальной стадии, подготовка к сдаче в типографию: Сергей Михайлович Ахмин.

Немного статистики



Над Ежегодником работали:

Редакторы-составители

2001–2005: Салихов К.М.
 2006–2021: Воронкова В.К.
 2021–2024: Гаврилова Т.П.
 2024, 2025: Савостина Л.И.

Ответственные редакторы

2001, 2006–2016: Ахмин С.М.
 2002–2005: Воронкова В.К.
 2015–2025: Яндуганова О.Б.

Редакторы

2001–2015: Карташёва Н.А.
 2001–2025: Мосина Л.В.
 2002–2006, 2015–2025: Ахмин С.М.
 2016–2021: Воронкова В.К.
 2018–2025: Львов С.Г.
 2004–2008: Яндуганова О. Б.

Технические редакторы

2001–2006, 2015, 2017–2025: Львов С.Г.
 2004–2008, 2013: Ильматова Д.И.
 2003, 2009–2016: Яндуганова О.Б.
 2007: Панарина Н.Ю.

Алфавитный указатель персоналий (2001–2025 гг.)

Абдрахманов Р.С.	2019	Ибригамова М.И.	2024
Авхадиева Н.В.	2018	Иванова Г.И.	2020
Альтшулер С.А.	2001, 2011	Иванова Т.А.	2010
Альтшулер Т.С.	2011	Ильин Л.М.	2020
Аминова Р.М.	2008	Карсалова Н.А.	2015
Анашкин В.Н.	2015	Карташёва Н.А.	2025
Андреева А.И.	2014, 2024	Кессель А.Р.	2003, 2005, 2015
Аникин А.Н.	2024	Кирсанов В.А.	2015
Анкушев А.А.	2019	Козырев Б.М.	2005
Антагулова Р.С.	2021	Константинов В.Н.	2019
Асадуллин Я.Я.	2018	Концевая О.В.	2019
Ахмин С.М.	2024	Копвиллем У.Х.	2003, 2013
Бариев Р.З.	2001, 2020	Корепанов В.Д.	2018
Баязитов Р.М.	2016	Корнишин М.С.	2020
Березов В.М.	2007	Коротков С.Ф.	2005, 2007, 2010
Бикчантаев И.Г.	2003	Куковицкий Е.Ф.	2015, 2025
Блатт А.П.	2017	Куприянова О.О.	2024
Блатт М.Л.	2009	Курбатова Н.В.	2022
Богданова Х.Г.	2010, 2015, 2019	Куркин Н.Н.	2022
Бухарасв А.А.	2018	Куркина И.П.	2021
Валиев К.А.	2011	Лисин В.Н.	2016
Вишневская Г.П.	2005, 2010, 2015, 2020	Лисин Н.А.	2019
Владимирцев Ю.В.	2017, 2018	Лобков В.С.	2016, 2022
Водопьянов Б.П.	2018	Лучкина С.А.	2021
Воронкова В.К.	2017	Манапов Р.А.	2008, 2015
Воронова Л.В.	2017	Матюнина Л.Г.	2017
Гайнутдинов И.В.	2024	Медведев Л.И.	2014
Гайнутдинов Х.Л.	2017	Мейкляр В.П.	2015
Гайнутдинова С.С.	2022	Мигачев С.А.	2017, 2024
Галяутдинов М.Ф.	2010, 2020	Митин А.В.	2018
Галяметдинов Ю.Г.	2018	Мосина Л.В.	2019
Гарифуллин И.А.	2016	Московская А.К.	2017
Гарифьянов Н.С.	2010, 2020	Мусин В.М.	2022
Гатауллин О.Ф.	2017	Мухтасарова Х.Л.	2017
Гильманов А.Н.	2015	Муштари Х.М.	2020
Голенева В.М.	2019	Обыночный А.А.	2012
Голенищев-Кутузов В.А.	2002, 2007, 2012, 2017, 2022, 2024	Овчинников И.В.	2005, 2010, 2015, 2020, 2024
Горожанин В.А.	2018	Осокин Д.Я.	2007, 2009
Грезнев Ю.С.	2009	Панина Т.Н.	2019
Грезнев Ю.С.	2023	Петрашень В.Е.	2007
Григорьев В.П.	2019	Петухов В.Ю.	2020
Губайдуллина А.З.	2025	Ривкинд А.И.	2011
Губайдуллин Ф.Ф.	2020	Роль-Ширяева В.А.	2018, 2021
Гурьянова О.М.	2020	Романов В.С.	2007, 2017
Домрачева Н.Е.	2018, 2021	Сабурова Р.В.	2019
Донская И.С.	2012, 2014	Садыков И.И.	2020
Дюльдев И.Н.	2012	Садыков Н.Р.	2019
Жеглов Е.П.	2017	Салихов К.М.	2006, 2011, 2016, 2021
Жихарев В.А.	2017	Самарцев В.В.	2009, 2014, 2019, 2021
Зарипов М.М.	2004, 2009, 2016, 2019	Саможенова Е.П.	2020
Зуйков В.А.	2013	Сафин И.А.	2007
		Сафин Р.Ш.	2017

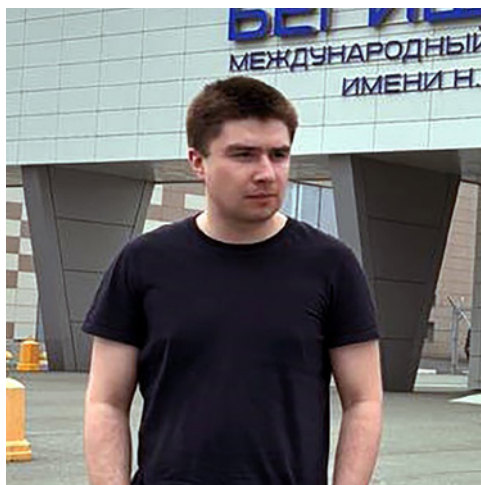
Сафина И.А.	2002
Сиразетдинова И.П.	2021
Ситдикова Х.М.	2020
Соловаров Н.К.	2013, 2023
Спиваковская А.Н.	2011, 2021, 2024
Сулейманов Н.М.	2020
Тагиров Л.Р.	2024
Таланов Ю.И.	2022
Тарасов В.Ф.	2017
Тейтельбаум Г.Б.	2016, 2022
Туриянский Е.А.	2015
Усачев А.Е.	2021
Файзрахманов И.А.	2022
Файзуллин М.А.	2009, 2014
Фалин М.Л.	2013, 2023
Фаттахов Я.В.	2025
Хабибуллин Б.М.	2004, 2013, 2014
Хайбуллин И.Б.	2007, 2017
Хаймович Е.П.	2008, 2010
Халиуллин Г.Г.	2018
Хамидуллин Б.И.	2017

Харахашьян Э.Г.	2004, 2014
Хасанова Л.Х.	2019
Хисамова Э.Р.	2024
Хлебников С.Я.	2016
Хлебникова Т.А.	2020
Чеботарев Н.Г.	2014
Черкасов Ф.Г.	2011, 2019
Черников С.К.	2012
Шагалов В.А.	2025
Шакирзянов М.М.	2013, 2021
Шакиров И.М.	2020
Шамонин Ю.Я.	2020
Шамуков Н.А.	2020
Шахмуратов Р.Н.	2022
Шегеда А.М.	2016
Штелик Дитмар	2007
Штырков Е.И.	2006, 2011, 2016, 2021
Шустов В.А.	2022
Яблоков Ю.В.	2003, 2008, 2012, 2013, 2023
Яфаев Н.Р.	2003, 2008, 2013, 2023

АСПИРАНТЫ И МОЛОДЫЕ УЧЁНЫЕ

Премии и награждения

– Бегишев Евгений Михайлович, м.н.с. лаборатории радиационной физики, стал лауреатом премии КФТИ им. Б. М. Козырева среди молодых учёных 2025 года.



– Железнякова Диана Евгеньевна, м.н.с. лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники, стала лауреатом премии КФТИ им. Н. С. Гарифьянова среди аспирантов 2025 года.



– Эндерова Татьяна Николаевна, м.н.с. лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники, награждена Дипломом победителя конкурса докладов на I Итоговой конференции молодых учёных КФТИ им. Е. К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН.



– Камашев Андрей Андреевич, руководитель лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники КФТИ им. Е. К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, удостоен благодарности за вклад в продвижение образа современной российской науки в медиапространстве.



- Митюшкин Евгений Олегович, лаборант-исследователь лаборатории квантовой оптики в алмазах, стал победителем конкурса Республиканских научных премий для поддержки молодых учёных в Республике Татарстан 2025 года.

Победители конкурса “Лучший молодой учёный/аспирант ФИЦ КазНЦ РАН 2025”

В номинации “Лучший молодой учёный в области физических, технических и математических наук”:

- Камашев Андрей Андреевич: “Экспериментальное исследование сверхпроводящих спиновых клапанов” – I место

В номинации “Лучший аспирант в области физических, технических и математических наук”:

- Митюшкин Евгений Олегович: “Мультимодальный сенсор на базе микростержня $\text{NaYf}_4:\text{Yb,Er}$ ” – II место
- Бегишев Евгений Михайлович: “Магнитный мемристор на основе рутила (TiO_2), содержащего имплантированную примесь кобальта” – III место

Аспирантура

В 2025 году в аспирантуру поступили три человека:

Железнякова Диана Евгеньевна (направленность подготовки – Физика магнитных явлений, руководитель Таланов Ю.И., д.ф.-м.н.)

Хамидуллин Ильдар Ниязович (направленность подготовки – Физика конденсированного состояния, руководитель Гимазов И.И., к.ф.-м.н.)

Эндерова Татьяна Николаевна (направленность подготовки – Физика магнитных явлений, руководитель Сахин В.О., к.ф.-м.н.)

Евгений Филиппович Куковицкий. К 80-летию со дня рождения

Евгений Филиппович Куковицкий приехал в Казань из Хабаровска в 1963 году, чтобы учиться в Казанском государственном университете (КГУ). Учёба в университете прерывалась на три года службой в армии. В 1971 году он окончил университет и поступил в аспирантуру Казанского физико-технического института КФАН СССР в лабораторию физики металлов, которой руководил к.ф.-м.н. Э. Г. Харахашьян. Тема работы была связана с изучением электронного парамагнитного резонанса парамагнитных ионов в матрицах простых металлов и поэтому Куковицкому было поручено наладить выращивание металлических монокристаллов, легированных, прежде всего, редкоземельными элементами. Первые монокристаллы Cu:Er и Mg:Er и первые спектры ЭПР были получены только к концу второго года аспирантуры. В это же время от директора института профессора М. М. Зарипова поступило предложение оставить аспирантуру и перейти на работу в недавно созданную группу роста кристаллов в качестве руководителя. В своём напутствии Максут Мухамедзянович отметил, что в университете он исследовал ЭПР ионов переходных элементов во фторидных кристаллах; теперь же необходимо освоить в институте выращивание кристаллов кислородных соединений с внедрением переходных ионов. Первыми такими кристаллами стали кристаллы магний-алюминиевой шпинели с кобальтом $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Co}$, выращенные методом Чохральского из иридиевых тиглей (Уланов В.А.). Выращивание этих кристаллов из расплава является сложным и трудоёмким процессом ввиду очень высокой температуры плавления (2135°C). Несколько позже из раствора в расплаве были получены кристаллы цинковой шпинели с кобальтом $\text{ZnAl}_2\text{O}_4:\text{Co}$ (Миронов В.Н., Горчакова Л.). Кроме шпинелей выращивались также кристаллы алюмината лантана ($\text{LaAlO}_3:\text{Cr}$), шеелита CaWO_4 , ниобата лития LiNbO_3 . Одновременно продолжалась работа по выращиванию металлических монокристаллов (Куковицкий Е.Ф.). Упомянем некоторые из монокристаллических объектов, созданных его руками.



Евгений Филиппович Куковицкий

Это прежде всего монокристаллы простых металлов (Cu , Ag , Au , Mg , Be , Al , Bi), двойных и тройных сплавов с парамагнитными примесями редкоземельных элементов (Gd , Er) и переходных металлов (Ni , Mn др.). В группе роста кристаллов были получены также кристаллы вольфрамовых бронз Na_xWO_3 (метод электрокристаллизации из расплавов солей) и кристаллы сверхпроводящих станидов LaRh_xSn_y (из раствора в расплаве). Эти образцы кристаллов использовались для изучения электронной структуры примесных ионов и их влияние на физические свойства материалов с металлической проводимостью. Исследования проводились с помощью техники ЭПР в лаборатории физики металлов, которой руководил Э. Г. Харахашьян.

С наступлением эры высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) (1987 г.) Евгений Филиппович и возглавляемая им с середины 70-х годов группа роста кристаллов переключились по решению учёного совета на синтез керамик и выращивание кристаллов соединений основного семейства кислородных высокотемпературных сверхпроводников, в том числе $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ и $\text{YBaCu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Усилиями С. Г. Львова были получены многочисленные кристаллы этих соединений с размером до $5 \times 5 \times 1 \text{ мм}^3$. Получаемые образцы отличались высоким качеством, чистотой фазового состава и позволили лаборатории физики перспективных материалов, возглавляемой Г. Б. Тейтельбаумом, долгое время удерживать позицию

на переднем фронте исследований ВТСП материалов в России, побеждать в конкурсах на финансировании из РФФИ, публиковать многочисленные статьи в солидных журналах (ЖЭТФ, Physical Review B), защищать диссертации.

Работа над сверхпроводниками продолжалась более двух десятилетий. В 2012 году по предложению Г. Б. Тейтельбаума Е. Ф. Куковицкий переключился на синтез только что появившихся в поле зрения экзотических материалов – топологических изоляторов. Начиная с самых простых соединений Bi_2Se_3 и Bi_2Te_3 . Для улучшения транспортных свойств кристаллов потребовалось усложнение химического состава, сначала до тетрадимита $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$, потом всё сложнее, в конце концов дело дошло до кристаллов с большим количеством элементов, $\text{Bi}_{1.08}\text{Sn}_{0.02}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$ (BSSTS). Результатом долгой и кропотливой работы Евгения Филипповича по отработке методики стали образцы кристаллов BSSTS высокого качества и с рекордными транспортными параметрами. Их проводимость целиком определяется поверхностным топологическим состоянием в большом температурном диапазоне ($T < 100$ K), а в фотоэлектронном спектре (ARPES) отчётливо проявляется конус Дирака, который также однозначно свидетельствует о наличии топологического состояния. Тот факт, что кристаллы, выращенные Е. Ф. Куковицким, являются лучшими среди всех материалов этого семейства, изготовленных в нашей стране, подтверждается многочисленными запросами на их получение со стороны известных учёных, работающих в крупных научных центрах: Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В. Л. Гинзбурга (ФИАН), Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Объединённый институт ядерных исследований (Дубна) и др.

Ещё одно большое направления деятельности Е. Ф. Куковицкого с середины 90-х годов – выращивание углеродных нанотрубок. Эту работу он начал по собственной инициативе и добился существенных успехов в ней. Надо отметить, что в данной области он не только осваивал известные методы, но и изобретал и развивал свои идеи. В частности, им предложен метод выращивания углеродных нанотрубок с использованием полимеров в качестве прекурсоров. При реализации этой идеи в качестве углеродсодержащего источника использовались продукты пиролиза полиэтилена. Он провёл исследование механизма каталитического роста углеродных нанотрубок на поддерживающих подложках из металлического никеля. Эти структуры привлекли внимание разработчиков вакуумной эмиссионной электроники как перспективная основа для низковольтных автоэлектронных эмиттеров. Используя пиролиз полиэтилена, Е. Ф. Куковицкий синтезировал углеродные нанотрубные слои толщиной

20–30 мкм на никелевой фольге, поверхность которой была активирована механической полировкой. Измерения автоэмиссионных характеристик, выполненные в Институте радиотехники и электроники РАН (г. Москва), показали, что на таких образцах плотность эмиссионного тока достигает значений до ~ 1 А/см².

Евгений Филиппович всегда внимательно следит за тем, как используются его кристаллы. Он активно участвует в их исследовании, или, по крайней мере, болеет всей душой за результаты исследований. Поэтому он является автором или соавтором многочисленных статей с результатами, полученными на его кристаллах. Их так много, что невозможно сосчитать (больше ста). И в то же время он – категорический противник диссертаций, так как считает, что время, потраченное на написание диссертации, подготовку документов, на защиту – это большая потеря. Потеря времени, которого всегда не хватает для выполнения более важных задач. В частности, много времени требуется на изучение литературы, когда приступаешь к выращиванию новых кристаллов, которые до этого не выращивал (у Е. Ф. Куковицкого большая библиотека). Потом следует бесконечная череда экспериментов, из которых только те, которые сделаны в конце поискового этапа, являются успешными. А ещё требуется проектировать и изготавливать разнообразные вакуумные и термические конструкции для специфического синтеза, для различных видов термохимической обработки синтезированных соединений и выращенных кристаллов, для получения наночастиц на поддерживающих подложках и т.п. Основательный вклад в синтез и химический анализ ВТСП-керамик внесла О. М. Гурьянова. Использование химических методов получения наночастиц никеля и кобальта также её заслуга. Большое значение для работы группы роста кристаллов имело наличие внутри группы термических, дифракционных и микроскопических методов исследования синтезированных веществ и выращенных кристаллов. Неоценимо важную роль в вопросах первичной характеристики и экспериментального исследования структурных свойств полученных материалов сыграли сотрудники группы Н. А. Саинов и В. А. Шустов. Тесное деловое сотрудничество и взаимодействие между сотрудниками группы всегда было следствием той дружественной атмосферы, которую создавал и постоянно поддерживал внутри коллектива Е. Ф. Куковицкий. Спаянные многолетней плодотворной работой, сотрудники бывшей группы роста кристаллов до сих пор поддерживают тесные деловые и дружеские контакты между собой.

В заключение приведу одну фразу из характеристики Е. Ф. Куковицкого, которую написал ещё в 1990 году Г. Б. Тейтельбаум: “Он отличается одержимостью в работе и стремлением к поиску новых путей, причём последнее качество иногда наносит ущерб поставленным задачам”.

*С пожеланием долгой и плодотворной жизни,
Ю. И. Таланов*

Яхъя Валиевич Фаттахов. К 70-летию со дня рождения

22 марта 2025 года исполнилось 70 лет со дня рождения Яхьи Валиевича Фаттахова. Он родился в селе Кадряково Мензелинского района Тат. АССР. С 1962 по 1972 год он учился в школе в Казани, а с 1972 по 1977 год – на физическом факультете Казанского государственного университета (КГУ) по специальности радиофизика и электроника. После окончания учёбы Я. В. Фаттахов получил распределение на кафедру радиоэлектроники КГУ, где проработал в должностях инженера и младшего научного сотрудника до 1980 года. Его работа была связана с разработкой оборудования и проведением исследований на нефтяных месторождениях Республики Татарстан.

В 1980 году Яхъя Валиевич в порядке перевода поступил на работу на должность инженера в лабораторию физики твёрдого тела Казанского физико-технического института Казанского филиала АН СССР. Только что в 1974 году было открыто явление наносекундного лазерного отжига. Это было время дискуссий о механизме эффекта. Научным направлением работы Я. В. Фаттахова стало исследование процессов взаимодействия пучков быстрых ионов и мощных оптических импульсов с поверхностью твёрдых тел. Вначале был этап самодельных установок для импульсного отжига. Была сделана установка с длительностью импульса 4 мс на базе больших конденсаторных батарей блока накачки лазера и ламп-вспышек. Затем появились первые заводские установки импульсного отжига производства Фрязино и Зеленограда. Яхъя Валиевич сумел модернизировать серийную установку УОЛ.П-1 и получил возможность генерации мощных импульсов некогерентного света с длительностями от 20 мс до 20 с. Установка не имела аналогов в мире. Уникальные возможности установки позволили использовать её для модификации кремния, арсенида галлия, германия, силицидов, некоторых сплавов и высокотемпературных сверхпроводников. Часть работ выполнялась по заданию Научно-исследовательского института молекулярной электроники и завода “Микрон”, Зеленоград.

В 1983–1987 гг. Яхъя Валиевич учился в заочной аспирантуре по специальности физика твёрдого тела. Темой его аспирантской работы было исследование электрических и фотоэлектрических свойств ионно-легированных слоёв, подвергнутых импульсному отжигу. Кандидатская диссертация на тему “Структура и электрофизические параметры ионно-легированных слоёв Si и GaAs, подвергнутых импульсному отжигу” была защищена в 1990 году. Работа Я. В. Фаттахова в области физики твёрдого тела была весьма плодотворной. Полученные им результаты неоднократно упоминались в годичных отчётах АН СССР в качестве важнейших достижений года, а в 1988 году Я. В. Фаттахову, И. Б. Хайбуллину и



Яхъя Валиевич Фаттахов

коллегам из Института физики полупроводников СО РАН и Центрального института ядерных исследований АН ГДР была присуждена Международная премия Президиума АН СССР и Президиума АН ГДР за лучшую совместную работу “Разработка физических основ ионно-импульсной модификации материалов микроэлектроники”.

Другим направлением научно-технической деятельности Я. В. Фаттахова было создание и внедрение в медицинскую практику магнитно-резонансных томографов. Первый действующий медицинский томограф МРТ-0.02-КФТИ, в сертификации которого Я. В. Фаттахов принимал непосредственное участие, был установлен в многопрофильной больнице № 7 в Казани. А в 2000 г. Я. В. Фаттахов кардинально изменил основное направление своей научной деятельности и стал заведующим вновь образованного отдела медицинской физики и входящей в него лаборатории методов медицинской физики (ММФ). С этого времени основные свои усилия Я. В. Фаттахов направлял на создание и внедрение в медицинскую практику магнитно-резонансных томографов.

Каждый последующий томограф был серьёзной модернизацией. Было принято решение увеличить индукцию магнитного поля основного магнитного поля в три раза.

Первый томограф с индукцией магнитного поля 0.06 Тл был изготовлен для Тукаевской ЦРБ (Набережные Челны) в феврале 2002 года. Монтаж и настройка томографа в этой больнице были очень серьёзной работой для всей команды лаборатории. Первый пациент был обследован в апреле 2002 года.

Затем был этап сертификации томографа в соответствии с законодательством Российской Федерации. Эта работа заняла полтора года. Было получено регистрационное удостоверение Минздрава РФ и сертификат соответствия.

В 2006 году был запущен в работу томограф в неврологическом отделении Бугульминской ЦРБ. В 2008 г. клинике им. А. В. Вишневского КГМУ был сдан в эксплуатацию модернизированный магнитно-резонансный томограф ТМР-0.06-КФТИ. Всего в различных клиниках Республики Татарстан были установлены четыре разра-



Лауреаты государственной премии Республики Татарстан 2005 года и приглашённые (слева направо): А. А. Гильманов, А. Р. Фахрутдинов, Р. У. Апаков, М. Ш. Шаймиев, М. К. Михайлов, К. М. Салихов, В. А. Шагало, К. Ш. Зиятдинов, В. Н. Анашкин, Я. В. Фаттахов.

ботанных в КФТИ томографа. На них было обследовано свыше 30 тысяч пациентов.

В 2011 году Я. В. Фаттахов был назначен также директором малого инновационного предприятия “Градиент МРТ”, созданного в КФТИ РАН в рамках реализации Федерального закона от 02.08.2009 года № 217-ФЗ для практической реализации наработок КФТИ КазНЦ РАН в области магнитно-резонансной томографии. За эти годы предприятием успешно выполнены разработки оригинальных электронных блоков и программного обеспечения для МРТ КФТИ, успешно выполнен проект ФСИ по программе “Старт 1 – Цифровые технологии”.

В настоящее время в лаборатории ММФ под руководством Я. В. Фаттахова ведётся разработка специализированного травматологического томографа с магнитным полем 0.4 Тл.

С 2022 по 2024 год коллектив под руководством Я. В. Фаттахова модернизировал протонный томограф для работы на ядрах ксенона, разработал специальное оборудование и методики и совместно с коллегами из Госкорпорации Росатом выполнил впервые в России эксперименты по визуализации лёгких лабораторных животных с применением гиперполяризованного ксенона. Эти работы сейчас продолжаются, что позволяет разработать отечественную методику для диагностики пациентов с COVID без лучевой нагрузки.

Научные и научно-технические достижения Я. В. Фаттахова были отмечены различными наградами. Помимо уже упоминавшейся международной премии АН СССР и АН ГДР, в 2004 году он был награждён Почётной грамотой

РАН и профсоюза работников РАН, а в 2005 году медалью “В память 1000-летия Казани”. В том же 2005 году ему в составе авторского коллектива была присуждена Государственная премия Республики Татарстан в области науки и техники за работу “Разработка, изготовление и внедрение медицинского магнитно-резонансного томографа ТМР-0.06-КФТИ”. В 2009 году Яхъя Валеевичу вместе с коллегами из КФТИ была присуждена Премия имени профессора Дж. Ф. Гиббонса, IEEE, NY, USA “За вклад в технологию лазерного отжига”.

Я. В. Фаттахов ведёт активную научно-организационную работу. Он более десяти лет является членом оргкомитетов и экспертных жюри конференций “Молодёжь и инновации Татарстана”, конференций “Идель” в рамках программы УМНИК Фонда содействия инновациям.

Я. В. Фаттахов является активным участником мероприятий по увековечиванию памяти академика К. А. Валиева, проводимых с 2011 года в рамках поручения Раиса Республики Татарстан Р. Н. Минниханова. Он – член оргкомитета и жюри Ежегодной научно-практической конференции им. академика К. А. Валиева.

За время работы в институте Я. В. Фаттахов показал себя как высококвалифицированный научный сотрудник и организатор научной деятельности, обладающий профессиональным авторитетом.

В свои 70 лет Я. В. Фаттахов полон творческих сил и ведёт активную научно-техническую деятельность. Хочется пожелать ему хорошего здоровья и творческого долголетия.

В. Ф. Тарасов

Альфия Закировна Губайдуллина. К 70-летию со дня рождения

В 2025 году исполнилось 70 лет Альфии Закировне Губайдуллиной, работающей в Казанском физико-техническом институте им. Е. К. Завойского Российской академии наук с 1990 года. Начинаясь её трудовая деятельность в нашем институте с должности инженера лаборатории химической физики. В 1992 году она была переведена на должность инспектора-референта и стала активным помощником директора института К. М. Салихова. В её обязанности входила организация работы приёмной дирекции, включая учёт писем из других организаций, заявлений от сотрудников и других документов, поступающих в дирекцию. В 1996 году в связи с изменением номенклатуры сотрудников бюджетных организации она была переведена на должность документоведа, а с ноября 2008 года её должность стала называться секретарь директора. Значительная часть обязанностей А. З. Губайдуллиной состоит в организации рабочего времени директора в части, касающейся взаимодействия с сотрудниками института во время личных встреч и производственных совещаний. Со всеми своими задачами в роли организатора работы приёмной дирекции института Альфия Закировна успешно справляется. Её знания и опыт работы с документами позволяют ей успешно выполнять и обязанности заведующей канцелярией, когда это необходимо.

За свою работу в институте Альфия Закировна была награждена Почётной грамотой Российской академии наук и профсоюза работников РАН, а в юбилейном для неё 2025 году она была награждена муниципальной наградой города Казани – Благодарность мэра Казани.

Альфия Закировна очень доброжелательна к окружающим. Никто в институте никогда не видел её в раздражённом состоянии. Это очень ценные качества для человека, работа которого связана с постоянным общением



Альфия Закировна Губайдуллина

с людьми. Своё отношение к Альфии Закировне научные сотрудники института в полной мере выразили, присудив ей в 2015 году Почётную премию им. М. Л. Блатта. Эта премия присуждается научными сотрудниками института сотрудникам ненаучных подразделений в знак своей признательности и уважения тем из них, кто многие годы добросовестно трудился в институте, неформально подходя к своему делу.

Есть поговорка, что не надо искать добро от добра. Видимо, с этим связано то, что за время работы Альфии Закировны секретарём директора успело смениться несколько дирекций: три директора и четыре заместителя директора по научной работе.

Особо хотелось бы отметить, что благодаря заботе Альфии Закировны приёмная нашего института является замечательным мини-садиком причудливых комнатных растений и цветов. Это очень радует глаз и умиротворяет.

В завершение хочется пожелать Альфии Закировне хорошего здоровья и активного долголетия.

К. М. Салихов, В. Ф. Тарасов

Нина Алексеевна Карташёва. К 70-летию со дня рождения

21 октября 2025 года исполнилось 70 лет Нине Алексеевне Карташёвой. Нина Алексеевна пришла в Казанский физико-технический институт в 1980 году, сразу после окончания исторического факультета Казанского государственного университета, и проработала в КФТИ практически до конца 2015 года.

Н. А. Карташёва родилась в городе Ивантеевке Московской области, который знаменит открытием первой фабрики по производству бумаги в России. Возможно, этот факт повлиял на судьбу Нины Алексеевны, и где бы она ни работала за время своей трудовой деятельности, она имела дело с бумагами, в основном с деловыми бумагами.

Нина Алексеевна окончила в 1973 году казанскую среднюю школу № 137, а в 1974 году поступила на историко-филологический факультет КГУ по специальности “история”, который закончила в 1980 году. Училась на вечернем отделении, поэтому одновременно начала работать. Первый опыт – на кондитерской фабрике “Заря”, где она работала коробочницей.

С 1974 года трудовая деятельность Нины Алексеевны уже связана с архивной работой. Сначала она – архивно-технический сотрудник Центрального государственного архива историко-политической документации Республики Татарстан, но в конце того же года становится старшим архивариусом в СКТБ Медфизприбор (самостоятельное конструкторско-технологическое бюро медицинских и физиологических приборов), где отвечала за учёт и сохранность конструкторской документации. Н. А. Карташёва проработала в этом бюро до перехода в 1980 году в Казанский физико-технический институт. В КФТИ КФАН СССР её принимают заведующей научным архивом, и практически сразу направляют на курсы повышения квалификации в Московский государственный историко-архивный институт по специальности архивоведение, которые она с отличием заканчивает в 1982 году. Архивное дело, Казанский физико-технический институт для неё стали главными в трудовой деятельности, хотя должности и название организации изменялись. Это был период больших изменений в стране. В июне 1991 года Н. А. Карташёву переводят заведующей архивом Казанского научного центра АН СССР, но уже в мае 1992 года её принимают заведующей архивом КФТИ имени Е. К. Завойского Казанского научного центра РАН переводом из Президиума КазНЦ РАН. Это был не просто перевод, архив был возвращён в структуру КФТИ. Н. А. Карташёва сумела привести архив в надлежащий порядок и организовала его эффективную работу. История архива нашего института непростая, она была подробно описана Н. А. Карташёвой в Ежегоднике за 2003 год.



Нина Алексеевна Карташёва

В 1999 году администрация выводит из штатного расписания должность заведующего архивом и Н. А. Карташёву переводят на должность главного библиотекаря с возложением обязанностей заведующей архивом. В декабре 2001 года Нину Алексеевну переводят на должность главного специалиста архива КФТИ. В конце 2001 года в институте создаётся Отдел научно-технической информации, и Н. А. Карташёва назначается с 1 января 2002 года ведущим инженером ОНТИ. Дополнительно на неё возлагаются обязанности главного специалиста архива.

Со 2 декабря 2008 года должность Н. А. Карташёвой стала называться “ведущий инженер по НТИ и ведению архива”. Начиная с 2002 года, обязанности Нины Алексеевны существенно расширились: теперь, кроме ведения архива, она занималась регистрацией научно-исследовательских работ и отчётов института; подготовкой материала для сайта института; подготовкой материала для издания тематического ежегодника института, были и другие обязанности. Особенно большая работа выполнялась в связи с подготовкой Ежегодника. В 2001 году Учёный совет КФТИ поддержал предложение К. М. Салихова ежегодно издавать сборник, который отражал бы все важные события института, научную деятельность сотрудников. Первый номер Ежегодника, отражающий жизнь института в 2001 году, был издан в 2002 году. В первые годы отработывался стиль Ежегодника, много сил занимала подготовка материалов, и Нина Алексеевна принимала активное участие в этом. При подготовке материала для Ежегодника Нина Алексеевна много общалась с сотрудниками института, и, несмотря на её настойчивость в некоторых вопросах, сотрудники отмечали её тактичность. Её грамотность, пунктуальность, трудолюбие и ответственность внесли заметный вклад в то, что Ежегодник своевременно выпускался.

Но как уже было сказано, Нина Алексеевна продолжала заниматься архивом, она занималась архивом с первого до последнего дня работы в КФТИ. В её обязанности



Нина Алексеевна во время поездки в Елабугу на теплоходе.

который был опубликован в Ежегоднике за 2006 год (стр. 226–245). Это история института в фактах и документах, она полезна сейчас и будет полезна в будущем. Н. А. Карташёва также собрала и обработала личный фонд чл.-корр. АН СССР Б. М. Козырева.

Нина Алексеевна – творческий человек. В 2000 году она в соавторстве со С. А. Лучкиной опубликовала статью “А. М. Вилькен – педагог и библиофил”. (Материалы Всероссийской научно-практической конференции “Музей в системе

ценностей евразийской культуры”, 25–28 сентября 2000 г. – Казань: РИЦ “Школа”, 2000, с. 147–150. Кроме того, она опубликовала восемь статей в сборниках Ежегодника за разные годы*.

В 2015 году Н. А. Карташёва уволилась из института по собственному желанию в связи с выходом на пенсию. Нина Алексеевна продолжает вести активный образ жизни. Так держать! Желаем крепкого здоровья, бодрости духа и новых ярких впечатлений и встреч.

А. И. Андреева, В. К. Воронкова

входило комплектование архива документами, образующимися в результате деятельности института, обеспечение их сохранности, учёт, списание, выдача справок. Архив содержался в полном порядке. Всё это благодаря профессионализму Нины Алексеевны, её трудолюбию, ответственности. Её добросовестный труд многократно отмечался благодарностями дирекции. В 2004 году Нина Алексеевна стала лауреатом премии М. Л. Блатта. Премия была присуждена за многолетний труд и содержание архива в образцовом порядке. В 2005 году Н. А. Карташёва была награждена Почётной грамотой Российской академии наук и Профсоюза работников Российской академии наук “За многолетний добросовестный труд на благо российской науки и в связи с 60-летием Казанского научного центра. Н. А. Карташёва всегда пользовалась уважением сотрудников института, в разные годы исполняла общественные нагрузки, была заместителем председателя комиссии профкома по социальному страхованию, многие годы вела работу с ветеранами института как член комиссии.

За годы работы Н. А. Карташёва проявила себя как инициативный сотрудник. Ярким примером этого является собранный и подготовленный на основании архивных документов материал к 60-летию образования института “Хронология истории Казанского физико-технического института имени Е. К. Завойского КазНЦ РАН (1945–2000)”,

-
- * 1. Карташёва Н.А.: Международные связи. Ежегодник 2001, с. 218–219.
 - 2. Н.А. Карташёва Н.А.: Международное сотрудничество. Ежегодник 2002, с. 206–207.
 - 3. Карташёва Н.А.: Архив Казанского физико-технического института имени Е. К. Завойского КазНЦ РАН. Ежегодник 2003, с. 203.
 - 4. Карташёва Н.А.: Лаборатория полупроводников КФТИ. Ежегодник 2004, с. 208–209.
 - 5. Карташёва Н.А. и др.: Минрахман Абдрахманович Файзуллин. К 80-летию со дня рождения. Ежегодник 2009, с. 166–167
 - 6. Карташёва Н.А. и др.: Минрахман Абдрахманович Файзуллин. К 85-летию со дня рождения. Ежегодник 2014, с. 158.
 - 7. Карташёва Н.А.: Инесса Сергеевна Донская. К 70-летию со дня рождения. Ежегодник 2014, с. 168.
 - 8. Карташёва Н.А., Мухтасарова Х.Л.: Лариса Васильевна Воронова. К 70-летию со дня рождения. Ежегодник 2017, с. 153.

Валерий Александрович Шагалов. К 70-летию со дня рождения

14 декабря 2025 г. исполнилось 70 лет нашему коллеге Валерию Александровичу Шагалову, научному сотруднику лаборатории методов медицинской физики.

Свою трудовую деятельность Валерий Александрович начал на заводе “Оргсинтез” сразу после окончания средней школы № 102 г. Казани. Работая на заводе, он поступил на физический факультет Казанского государственного университета им. В. И. Ульянова-Ленина на специальность “Радиофизика” на вечернее отделение. Затем перевёлся на дневное обучение. Дипломную работу Валерий Александрович выполнял под руководством доцента Р. А. Даутова при кураторстве ст. преподавателя К. С. Сайкина на кафедре радиоэлектроники.

После успешного окончания физического факультета он остался работать в университете, на кафедре радиоастрономии физического факультета, где занимался изучением распространения радиоволн в атмосфере, участвовал в экспедициях по стране.

В 1980 году Валерий Александрович перешёл работать в лабораторию ядерного магнетизма КФТИ под руководством И. А. Сафина в группу Д. Я. Осокина, где занимался ядерным квадрупольным резонансом. Именно там он сложился как специалист в области цифровой техники. Группа Д. Я. Осокина занималась ЯКР исследованиями ядер ^{14}N и развитием метода ЯКР. Результатом этого этапа трудовой деятельности В. А. Шагалова стала разработка и изготовление совместно с Д. Я. Осокиным, В. Л. Ермаковым и Р. Х. Курбановым импульсного ЯКР спектрометра с цифровым управлением для создания многоимпульсных последовательностей.



Валерий Александрович Шагалов

В 90-е годы прошлого века КФТИ претерпел различные трансформации и преобразования, что отразилось практически на всех сотрудниках института. Были созданы новые направления научной деятельности и, соответственно, лаборатории. В. А. Шагалов продолжил свою деятельность талантливого экспериментатора во временном коллективе, который возглавил Ф. Ф. Губайдуллин, для разработки отечественного низкополевого ЯМР-томографа. Когда в середине 90-х годов в КФТИ создавалась группа для разработки магнитно-резонансного томографа, вопрос с кандидатурой на роль разработчика цифровых устройств был решён однозначно – Шагалов В.А.

Дальнейшую свою трудовую деятельность Валерий Александрович продолжил во вновь образованной лаборатории методов медицинской физики под руководством Яхьи Валиевича Фаттахова, сначала в должности главного специалиста, а затем научного сотрудника.



Работа в проблемной радиоастрономической лаборатории КГУ. 1980 г.



Военные сборы.



А. Н. Аникин, А. Р. Фахрутдинов, В. Л. Одиванов, А. А. Баязитов, Я. В. Фаттахов, В. А. Шагалов, Д. А. Коновалов. 2025 г.

За прошедшие годы при активном и плодотворном участии Валерия Александровича коллективом лаборатории были разработано и изготовлено несколько магнитно-резонансных томографов с резистивными магнитами: с индукцией магнитного поля 0.02 Тл для городской больницы № 7 г. Казани (1997 г.), затем несколько аппаратов с индукцией магнитного поля 0.06 Тл для Тукаевской ЦРБ г. Наб. Челны (2002 г.), для Бугульминской ЦРБ г. Бугульма (2005 г.), для клиники КГМУ г. Казани (2007 г.).

На этих томографах за время их эксплуатации проведены обследования и поставлены диагнозы нескольким десяткам тысяч пациентов. Каждый из созданных томографов проработал в различных клиниках не менее 10 лет.

В 2005 г. Валерий Александрович стал лауреатом Государственной премии РТ в области науки и техники за разработку и изготовление магнитно-резонансных томографов в составе коллектива авторов.

В настоящее время Валерий Александрович активно участвует в разработке магнитно-резонансного томографа с индукцией магнитного поля 0.4 Тл на постоянном магните, принимает участие в исследованиях, проводимых на опытном образце этого томографа.

Свою работу Валерий Александрович выполняет профессионально и безупречно. У сотрудников лаборатории Валерий Александрович пользуется заслуженным уважением и авторитетом, к нему можно обратиться за любым советом и помощью. Его можно охарактеризовать как человека ответственного, который по любому вопросу не говорит, не подумав. Кроме того, Валерий Александрович известен как большой книголюб, человек очень начитанный, с которым интересно поговорить на различные темы.

Друзья и коллеги от всего сердца поздравляют Валерия Александровича с юбилеем, желают крепкого здоровья, благополучия, успехов в работе и долголетия!

*А. Р. Фахрутдинов, О. И. Гнездилов,
А. И. Андреева*



НАУЧНО–ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

О работе Учёного совета

2025 год был богат на события не только научного плана, но и организационного. В повестке заседаний Учёного совета традиционно были научные доклады сотрудников института о проделанной работе, доклады по материалам докторских диссертаций, доклады гостей института, активно обсуждались текущие дела, связанные с жизнью института и требующие голосования членов Учёного совета. Особое значение имели ключевые административные изменения: в 2025 году состоялись выборы руководителя КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН, а также плановое переизбрание состава Учёного совета. Всего за год было проведено 34 заседания Учёного совета очно и онлайн.

О молодёжи. Результатом реализации гранта Академии наук Татарстана для молодых кандидатов наук, планирующих защиту докторской диссертации, в 2025 году стали две защиты докторских диссертаций – Камашева Андрея Андреевича, старшего научного сотрудника лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники, на тему: “Экспериментальное исследование сверхпроводящих спиновых клапанов” и Никифорова Виктора Геннадьевича, ведущего научного сотрудника лаборатории квантовой оптики в алмазах, на тему “Лазерное управление низкочастотной динамикой и процессами переноса энергии в молекулярных изотропных средах”. Ещё трое грантополучателей АН РТ представили на Учёном совете доклады по материалам своих докторских диссертаций: Суханов Андрей Андреевич – “ЭПР-спектроскопия спиновых кластеров и фотовозбужденных донорно-акцепторных систем”, Зарипов Руслан Булатович – “Развитие спектроскопии электронного парамагнитного резонанса для изучения процессов декогерентности”, Яцык Иван Владимирович – “Влияние стехиометрии, распределения ионов по кристаллографическим позициям на фазовые переходы в сложных оксидах” и Хантимеров Сергей Мансурович – “Функциональные наноструктуры и композиты на их основе для современных химических источников тока: синтез и физико-химические свойства”. Желаем нашим коллегам успехов и скорой защиты!

Победителями конкурса на именные премии КФТИ для молодых учёных и аспирантов в 2025 году, который состоялся 14 мая, стали: в конкурсе на Премию им. Н. С. Гарифьянова – Железнякова Диана Евгеньевна, младший научный сотрудник лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники (с осени 2025 года аспирант КФТИ 1-го года обучения), в конкурсе на Премию им. Б. М. Козырева – Бегишев Евгений Михайлович, аспирант КФТИ 2-го года обучения, младший научный сотрудник лаборатории радиационной физики.

В январе Учёный совет выдвинул Гимазова И.И., Гарипова Р.Р., Камашева А.А., Морозову А.С. для участия в конкурсе на соискание медалей РАН с премиями для молодых учёных, в сентябре рекомендовал Бегишева Е.М. для участия в конкурсе на соискание Молодёжной премии им. Е. К. Завойского 2025 года, в ноябре – Митюшкина Е.О., Морозову А.С. и Попова Д.В. для участия в конкурсе молодёжных научных премий РТ.

По инициативе Совета молодых учёных и специалистов КФТИ в конце октября этого года после длительного перерыва возобновила работу Итоговая конференция молодых учёных КФТИ. В рамках мероприятия был проведён конкурс на лучший доклад. Победителем стала Эндерова Т.Н., которая получила возможность финансовой поддержки для представления результатов на научной конференции в следующем году. Второе место заняла Слесарева Ю.В., а третье место – Ханов Н.Т.

О гостях. 22 января 2025 года участником второго заседания Учёного совета был гость нашего института – Циберкин Кирилл Борисович, сотрудник Пермского государственного национального исследовательского университета (г. Пермь). Он представил слушателям доклад на тему “Коллективная динамика материалов со слабой магнитной связью и углеродных композитов” по материалам будущей докторской диссертации (которую он успешно защитил в сентябре 2025 года). В 2025 году Учёный совет утвердил несколько отзывов ведущей организации на кандидатские диссертации Маркелова Д.А. и Кожокару И.

О выдвижениях. В ноябре состоялось выдвижение кандидатур для представления их к награждению мун-

ципальными и ведомственными наградами Российской Федерации, Республики Татарстан и г. Казани на 2026 год. 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 физики ферроиков и функциональных материалов Мамина Рината Файзрахмановича и доктора технических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории молекулярной радиоспектроскопии Туранова Александра Николаевича, на поощрение Министерства науки и высшего образования РФ – “Благодарность Министерства науки и высшего образования РФ” доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории квантовой оптики в алмазах Никифорова Виктора Геннадьевича, на нагрудный знак “Ветеран” доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники Гарифьянова Надира Нургаязовича, на ведомственные награды Министерства образования и науки Республики Татарстан – знак отличия “Отличник сферы образования и науки Республики Татарстан” доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники Камашева Андрея Андреевича и кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории спиновой физики и спиновой химии Суханова Андрея Анатольевича, “Почётная грамота Министерства образования и науки Республики Татарстан” начальника планово-экономического отдела Хабибуллину Валентину Ивановну, на поощрение Республики – “Благодарность Раиса Республики Татарстан” кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории методов медицинской физики Фаттахова Яхью Валиевича, “Благодарность Кабинета Министров” кандидата технических наук, научного сотрудника лаборатории нанооптики и наноплазмоники Коновалова Дмитрия Александровича и доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории физики ферроиков и функциональных материалов Вавилову Евгению Леонидовну, на муниципальные награды города Казани – “За труд и доблесть на благо Казани” Курбатову Надежду Васильевну и Петрова Сергея Ивановича, “Благодарность Мэра Казани” – Ильматову Диляру Вячеславовну.

О научных результатах и отчётах. Первые заседания в начале февраля традиционно посвящаются Дню российской науки (отмечается 8 февраля) и проведению устной и стендовой сессии физической секции Итоговой конференции ФИЦ КазНЦ РАН. По результатам конкурса были определены лучшие доклады: одна работа заняла первое место, две работы поделили второе место, и третье место разделили три работы. В начале ноября прошло обсуждение важнейших результатов 2025 года, было отобрано пять наиболее значимых результатов,

из них два результата были отправлены от института в отделение физических наук Российской академии наук. В начале декабря состоялись слушания отчётов по государственному заданию в рамках двух фундаментальных тем под руководством член-корр. РАН Калачёва А.А. и д.ф.-м.н. Тагирова Л.Р.

О жизни и развитии института. 29 января, в преддверии выборов руководителя института, Учёный совет заслушал доклад С. М. Хантимерова об основных результатах его деятельности в должности руководителя КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН за период с марта 2021 по январь 2025 года. По результатам тайного голосования было принято решение выдвинуть кандидатуру Сергея Мансуровича на новый срок. В феврале 2025 года С. М. Хантимеров был официально утверждён в должности руководителя КФТИ.

В апреле заместитель руководителя по научной деятельности Т. П. Гаврилова представила отчёт администрации о финансово-хозяйственной деятельности института.

В конце 2025 года ФИЦ КазНЦ РАН выиграл конкурс на получение гранта Академии наук Татарстана на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования научных и научно-педагогических работников образовательных организаций высшего образования, научных и иных организаций к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ. В рамках этого гранта был утверждён план развития кадрового потенциала ФИЦ КазНЦ РАН, в который вошли сотрудники КФТИ, планирующие в ближайшее время защищать свои докторских диссертации: Кандрашкин Ю.Е., Лапаев Д.В. и Хайбуллин Р.И. Желаем успехов и скорой защиты!

О составе Учёного совета. В марте 2025 года в связи с истечением полномочий предыдущего состава состоялись выборы членов Учёного совета. Основной этап выборов прошёл 19 марта на собрании научных работников КФТИ. Кандидатуры выдвигались от лабораторий, согласно Положению об Учёном совете, членом совета может быть работник института, имеющий учёную степень. Из 30 претендентов, подтвердивших согласие баллотироваться в члены Учёного совета, в результате тайного голосования в состав Учёного совета КФТИ вошли: Вавилова Е.Л., Воронкова В.К., Гаврилова Т.П., Гарифьянов Н.Н., Ерёмина Р.М., Зарипов Р.Б., Камашев А.А., Никифоров В.Г., Степанов А.Л., Тагиров Л.Р., Таланов Ю.И., Тарасов В.Ф., Файзрахманов И.А., Хайбуллин Р.И., Шакуров Г.С., Шахмуратов Р.М. Несколько членов совета вошли без процедуры выборов (по статусу или должности): Гарипов Р.Р. – председатель Совета молодых учёных и специалистов КФТИ, Калачёв А.А. – член-корр. РАН, Савостина Л.И. – учёный секретарь, Салихов К.М. – академик РАН, Хантимеров С.М. – руководитель КФТИ. Всего в обновлённый Учёный совет КФТИ вошёл 21 человек. Традиционно на первом заседании Учёного совета в новом составе (26 марта 2025 года) председателем был избран Калачёв А.А. и заместителем председателя – Таланов Ю.И. Бессменным

техническим секретарём Учёного совета осталась Курбатова Надежда Васильевна.

О статистике. Ключевым направлением работы Учёного совета в 2025 году оставалось обсуждение научных исследований, проводимых в институте. Всего было проведено 34 заседания Учёного совета (очно и онлайн). При этом все заседания Учёного совета посетили д.ф.-м.н. Воронкова В.К., к.ф.-м.н. Гарипов Р.Р., к.ф.-м.н. Савостина, на одно меньше – д.ф.-м.н. Таланов Ю.И. и

на два меньше – д.ф.-м.н. Файзрахманов И.А., д.ф.-м.н. Шахмуратов Р.М., д.ф.-м.н. Гарифьянов Н.Н., к.ф.-м.н. Зарипов Р.Б. В течение года было сделано 52 научных доклада, из них было заслушано шесть докладов по материалам докторских диссертаций: Никифоров В.Г., Суханов А.А., Зарипов Р.Б., Яцык И.В., Хантимеров С.М., Циберкин К.Б.

Л. И. Савостина

Семинар памяти Г. Б. Тейтельбаума

Третий семинар, посвящённый Григорию Бенционовичу Тейтельбауму, состоялся 22 декабря 2025 года. Далеко не все докладчики, приглашённые на семинар из разных городов России и Европы, смогли приехать в Казань и лично присутствовать и выступать в конференционном зале КФТИ. Но благодаря пока ещё действующему интернету, удалённые докладчики смогли изложить свои научные идеи и обсудить их с коллегами, собравшимися в зале и подключившимися к семинару с помощью программы Zoom. Большинство выступавших когда-то работали в лаборатории физики перспективных материалов (ЛФПМ) под руководством Григория Бенционовича. Другие, хотя и не были сотрудниками этой лаборатории, но активно сотрудничали (и продолжают сотрудничать) с ней, выступали с научными докладами на нашем лабораторном семинаре.

Один из них, Александр Сергеевич Мельников, нижегородский и в то же время московский физик-теоретик, выступил online с докладом на тему “Альтермагнетизм и сверхпроводимость в гибридных структурах”. Интерес слушателей к его докладу обусловлен тем, что в нём автор описал явления, происходящие на границе сверхпроводника и необычного магнитного материала – альтермагнетика. Этот материал появился в поле зрения исследователей совсем недавно и сразу привлёк внимание как экспериментаторов, так и теоретиков сочетанием таких свойств, как отсутствие спонтанной намагниченности, характерное для антиферромагнетиков, и спин-зависимая зонная структура. А. С. Мельников находится в числе учёных, активно изучающих эти новые материалы.

Второй докладчик, Катаев Владислав Евгеньевич, бывший сотрудник ЛФПМ, который в настоящее время занимается изучением экзотических магнитных систем в Дрездене, в Институте имени Лейбница. Его выступление, посвящённое радиоспектроскопическим исследованиям спиновой динамики и магнетонных возбуждений в квази-двумерных ван-дер-ваальсовских магнетиках. Эти материалы по структуре представляют из себя набор магнитных слоёв атомной толщины, химически слабо связанных между собой. Они позволяют путём измене-

ния химического состава и кристаллической структуры реализовать разнообразные низкоразмерные магнитные системы, которые хорошо описываются известными спиновыми теоретическими моделями, такими как модель Изинга и XY-модель. Помимо чисто научного интереса, эти материалы имеют хорошую перспективу использования в спинтронике, так как позволяют управлять их магнитным состоянием и спиновым транспортом с помощью внешних магнитных полей.

Следующий доклад был представлен online Я. В. Фоминовым, сотрудником Института теоретической физики имени Л. Д. Ландау (г. Черноголовка). Яков Викторович на протяжении многих лет осуществляет теоретическую поддержку экспериментальных исследований лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники КФТИ, направленных на создание и развитие сверхпроводящего спинового клапана. Он является соавтором многих статей, опубликованных вместе с И. А. Гарифуллинным и А. А. Камашевым. Его рассказ был посвящён новому быстроразвивающемуся направлению сверхпроводниковой электроники, которое называется “диодный эффект в сверхпроводниках”. Рассказ Я. В. Фомина касался одной из возможных реализаций этого явления – диодного эффекта в асимметричных СКВИДах. Докладчик объяснил, почему этот эффект слабо проявляет себя в амплитуде сверхпроводящего тока через ниобиевый мостик, но значительно сильнее – в сдвиге ступенек Шапиро, где асимметрия при изменении направления тока легко наблюдается.

Сергей Васильевич Демишев из Института физики высоких давлений РАН (г. Троицк) посвятил свой доклад особенностям магнитной структуры и фазовых переходов необычного по своим свойствам соединения – силицида марганца. Подробно описав его магнитную фазовую диаграмму, Сергей Васильевич обратил внимание слушателей на возможный фазовый переход от состояния с одиночными скирмионами к упорядоченной решётке этих экзотических магнитных образований. Здесь он провёл аналогию поведения магнитных вихрей с вихрями Абрикосова в сверхпроводниках. В конце своего



выступления докладчик сделал небольшой экскурс в область флуктуационных фазовых переходов, сопроводив его несколькими иллюстрациями из числа недавних экспериментальных результатов исследования магнетиков, в которых флуктуационные процессы играют заметную роль. Большое число вопросов со стороны слушателей показало значительный интерес публики к представленному в докладе материалу.

Гиният Гатиятович Халиуллин, бывший сотрудник ЛФПМ КФТИ, работающий в настоящее время в Институте Макса Планка (г. Штутгарт), в online режиме рассказал слушателям про физические основы своей теории, объясняющей возникновение высокотемпературной сверхпроводимости в двухслойных никелатах. Ключевым моментом его теории является совершенно необычное взаимодействие: обмен магнитными возбуждениями – триплонами. Этот обмен обеспечивает большую константу электрон-электронного взаимодействия λ , что и создаёт условия, необходимые для образования куперовских пар и формирования сверхпроводящего состояния в никелатах. Стоит отметить, что, несмотря на большое расстояние между докладчиком и слушателями и на технические трудности, рассказ Гинията Гатиятовича прозвучал очень душевно и был воспринят не только с интересом, но и с нескрываемой симпатией.

Последним свой доклад представил (в режиме online) Рустем Ифхович Хасанов, также бывший сотрудник ЛФПМ, ныне работающий в институте Поля Шерера

в Швейцарии (д. Виллиген). Как и Г. Г. Халиуллин, он рассказал про сверхпроводящие свойства никелатов, но несколько иного состава, $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$. Это семейство так называемых трёхслойных соединений, в которых сверхпроводящее состояние возникает под действием внешнего давления более 15 ГПа при температуре около 30 К. Исследования, выполненные большим научным коллективом с использованием изощрённых экспериментальных методов, таких как мюонная спиновая спектроскопия и дифракция нейтронов, обнаружили влияние различных параметров порядка, в том числе волн зарядовой и спиновой плотности, на формирование сверхпроводимости.

На этом докладе заседание семинара завершилось. Слушатели, присутствовавшие в зале и участвовавшие в семинаре с помощью сети интернет, проявили большой интерес к представленным работам и дали им высокую оценку. В частности, положительные отзывы прозвучали от профессора КФУ Ю. Н. Прошина, учёного секретаря Совета по физике низких температур РАН Е. Г. Николаева (Институт физических проблем, г. Москва), заведующего отделом Объединённого института ядерных исследований (г. Дубна) Ю. М. Шукринова и других. Организаторы семинара выразили надежду на то, что его высокий научный уровень удастся поддержать и в будущем, что мы продолжим приглашать известных учёных с интересными и актуальными докладами.

Ю. И. Таланов

Международная онлайн конференция “СПИН-2025: Смена парадигмы спинового обмена”, 17–20 июня 2025 года

С 17 по 20 июня 2025 года в онлайн форме была проведена конференция нового формата “СПИН 2025: смена парадигмы спинового обмена” (SPIN-2025 Spin Exchange: Transition to a New Paradigm). Отличительной чертой данной конференции было желание обстоятельно и всесторонне обсудить парадигму спинового обмена. Идея и тематика конференции лежат в исследованиях последних лет, посвящённых смене парадигмы спинового обмена и его проявления в ЭПР спектроскопии в разбавленных растворах парамагнитных частиц.

В 2019 году К. М. Салихов обобщил накопленные к тому времени результаты и предложил новую парадигму спинового обмена в растворах парамагнитных частиц и его проявления в ЭПР-спектроскопии [1–3]. Новая парадигма ввела в рассмотрение ряд качественных изменений в получившую распространение модель спинового обмена в таких системах. Новыми положениями являются: коллективные моды движения спинов в разбавленных растворах, спиновый поляритон, неэквивалентный спиновый обмен, смешанная форма индивидуальной резонансной линии, нетривиальная “интерференция” вклада обменного взаимодействия парамагнитных частиц при бимолекулярных столкновениях и дальнедействующего диполь-дипольного спин-спинового взаимодействия в парамагнитную релаксацию спинов.

Распространённая парадигма позволяет в хорошем приближении описать концентрационную зависимость уширения линий дискретного спектра ЭПР парамагнитных частиц в условиях сравнительно медленного спинового обмена. Но в концентрационное уширение линий дают вклад два процесса: спиновый обмен и спин-спиновое диполь-дипольное взаимодействие парамагнитных частиц. Проблема разделения вкладов этих двух механизмов в уширение и, в результате, определение скорости бимолекулярного спинового обмена из данных ЭПР была решена новой парадигмой спинового обмена.

Сравнение распространённой модели спинового обмена [4, 5] с новой парадигмой спинового обмена [1–3, 6] показывает, что фактически только небольшая часть из положений распространённой парадигмы перешла и в новую парадигму. Остальные не выдержали испытания новыми теоретическими и экспериментальными фактами, появились совершенно новые положения.

За последние годы новая парадигма спинового обмена получила дальнейшее развитие, были выявлены теоретически и подтверждены экспериментально важные детали [7–17]. Но некоторые положения новой парадигмы спинового обмена ещё требуют более детальной разработки. К этим положениям можно отнести, например, теорию эффекта насыщения спектров ЭПР в мощных

микроволновых полях, изучение нутации спинов в разбавленных растворах парамагнитных частиц.

Добавленные в новую парадигму положения не являются тривиальными, как, например, образование коллективных мод движения спинов электронов в разбавленных растворах в результате случайных бимолекулярных столкновений парамагнитных частиц. Поэтому большинство научного сообщества не спешило менять простую, привычную, непоследовательную модель на новую парадигму спинового обмена. Но есть и сторонники. Например, статья Barney L. Bales et al. [12] начинается с абзаца:

“Спиновый обмен, изучаемый методом ЭПР и вносящий значительный вклад в наше понимание бимолекулярных столкновений в растворах на протяжении многих лет [1, 2], претерпел небольшую революцию с 2016 года благодаря теоретической работе Салихова, предложившего смену парадигмы в наших представлениях о проявлениях спинового обмена с использованием нитроксильных радикалов. За последние 8 лет он предсказал ряд эффектов, существенно отличающихся от общего понимания спектральных проявлений спинового, некоторые из которых совершенно контринтуитивны (необычны, по мнению Салихова), а некоторые из них уже были подтверждены экспериментально. Например, только в течение последнего года предложенный им поляритон, образованный между спиновыми модами и микроволновым полем, был экспериментально продемонстрирован [7–10]”.

Тот факт, что научное сообщество не делает поспешных выводов и второпях не меняет распространённую парадигму на новую, совершенно нормальное явление. Так и должно быть в науке, новая модель, новая теория должна пройти всестороннее обсуждение в научном сообществе. Поэтому Центром развития научной методологии в КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН в 2025 году был проведён ряд мероприятий, на которых новая парадигма спинового обмена, прошла несколько “испытаний”:

- была проведена международная конференция “Смена парадигмы спинового обмена” с единственной целью обстоятельно обсудить парадигму спинового обмена,
- детальные обсуждения новой парадигмы спинового обмена состоялось на конференции “Спиновая физика, спиновая химия и спиновая технология” 5–9 октября 2025 г в Санкт-Петербурге,
- новая парадигма спинового обмена была заслушана и внимательно рассмотрена в Отделении физических наук РАН на заседании Бюро ОФН РАН 11 октября 2025 года,
- новая парадигма спинового обмена прошла испытания и получила поддержку на коллоквиуме в Институте

теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН 14 октября 2025 года в Черногловке,

- новая парадигма также была хорошо поддержана на общеинститутском семинаре в Институте прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН 7 ноября 2025 года в Нижнем Новгороде.

Новая парадигма позволяет эффективно использовать в качестве модельного процесса бимолекулярный процесс спинового обмена для изучения других бимолекулярных процессов. В частности, она позволяет с большей точностью определять частоту бимолекулярных столкновений в сложных системах – например, в растворах полимеров и биологических средах.

Кроме того, новая парадигма спинового обмена дала важные результаты в различных видах спектроскопии. Она показала, что форма индивидуальной резонансной линии поглощения в любой спектроскопии может быть несимметричной лоренцевской линией поглощения, если в релаксацию квантовой когерентности даёт вклад механизм спектральной диффузии. Новая парадигма спинового обмена показала, что эффект обменного сужения может быть использован для получения Бозе газа квазичастиц возбуждённых состояний намагнитенности спинов в разбавленных растворах парамагнитных частиц даже при комнатных температурах [18]. Новая парадигма спинового обмена даёт возможность по-новому трактовать механизм формирования коллективных состояний Дикке в оптике.

Формат конференции “Спин-2025: Смена парадигмы спинового обмена” отличается от традиционных очных и онлайн конференций.

Необычным форматом являлось то, что до начала конференции все 104 зарегистрированных участника конференции получили распространённую и новую парадигмы спинового обмена для ознакомления. Ряд коллег прислали свои вопросы ещё до начала конференции. Четыре заседания по 3–4 часа были посвящены полностью только обсуждению этих парадигм.

Участники конференции весьма положительно оценили пользу от этой конференции. Были собраны письменные отзывы участников, 91.7% из которых отмечают:

- высокое качество научного материала,
- ценность дискуссий и возможности сосредоточиться на одной теме,
- полезность нового формата,
- вдохновение для собственной исследовательской работы,
- подтвердили желание участвовать в будущих встречах.

Вот несколько примеров того, как участники отзывались об этой конференции:

“Интернет семинар о спиновом обмене – попытка вернуть в науку существенный дух обсуждения концепций, а не только конкретные результаты”.

“Подробное обсуждение одного вопроса позволило обсудить все стороны проблемы. Предварительное (до конференции) знакомство с основными аспектами проблемы и возможность прослушать доклады ещё раз в

записи позволили всем участникам лучше понять новую парадигму”.

“Организация была превосходной. Онлайн-формат конференции оказался очень удобным. Лекции и отчёты конференций, размещённые на Rutube, позволяли мне компенсировать моё отсутствие на некоторых встречах”.

“Огромное спасибо профессору Салихову и всем участникам за возможность принять участие. Я непосредственно этой темой не занимаюсь, изучаю центры ЭПР в кристаллах, в том числе обменные взаимодействия между ними. Но мне было очень полезно послушать и лучше понять спиновый обмен. И очень удобно, что были записи, которые можно было прослушать заранее. Сразу было бы сложно понять суть дискуссии. Желаю организаторам и участникам успехов в дальнейшей работе”.

Итоги проведения конференции в новом формате:

- Конференция “Спин-2025. Смена парадигмы спинового обмена” дала возможность обсудить в деталях основные положения новой парадигмы.
- Труды этой конференции были опубликованы как специальный выпуск журнала “Applied Magnetic Resonance”.

Принимая во внимание отмеченные выше факты положительного восприятия новой парадигмы спинового обмена в разбавленных растворах парамагнитных частиц научным сообществом, можно утверждать, что в 2025 году фактически произошла смена парадигмы спинового обмена и его проявления в спектроскопии электронного парамагнитного резонанса.

Пришла пора применять новую парадигму спинового обмена.

Благодарности

Я очень благодарен всем участникам этой конференции за интерес, ценные вопросы и комментарии. Большое спасибо сопредседателям конференции: Н. Чумаковой, А. Кокорину, С. Травину (Москва, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН) и Р. Зарипову, а также Р. Гарипову за видео- и ИТ-поддержку (Казань, Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского, ФИЦ КазНЦ РАН). Особая благодарность А. Салиховой и команде за технический и организационный доступ к формату проведения конференции, который создал условия для плодотворного обсуждения теоретических основ сегодняшней модели спинового обмена в разбавленных растворах.

Литература

1. К. М. Салихов: Состояние теории спинового обмена в разбавленных растворах парамагнитных частиц. Новая парадигма спинового обмена. УФН **189**, 1017–1043 (2019)
2. K. M. Salikhov: Fundamentals of Spin Exchange. Story of a Paradigm Shift. Springer, Switzerland, 2019.
3. K. M. Salikhov: New paradigm of spin exchange and its manifestations in EPR spectroscopy. Appl. Magn. Reson. **51**, 297–325 (2020)

4. Yu. N. Molin, K. M. Salikhov, K. I. Zamaraev: Spin Exchange. Principles and Applications in Chemistry and Biology. Springer-Verlag, NY (1980)
5. K. M. Salikhov: Widespread model (paradigm) of spin exchange and its manifestation in EPR spectroscopy in dilute solutions of radicals. *Appl. Magn. Reson.* **56**, 1077–1097 (2025)
6. M. M. Bakirov, I. T. Khairuzhdinov, K. M. Salikhov, R. N. Schwartz, B. L. Bales: The Effect of power saturation on the line shapes of nitroxide spin probes under the influence of spin-exchange and dipole-dipole interactions studied by CW EPR. *Appl. Magn. Reson.* **53**, 1275–1315 (2022)
7. B. L. Bales, M. Peric, I. Dragutan, M. K. Bowman, M. M. Bakirov, R. N. Schwartz: Experimental observation of a peculiar effect in saturated electron paramagnetic resonance spectra undergoing spin exchange. *Magnetic polariton?* *J. Phys. Chem. Lett.* **13**, 10952–10957 (2022)
8. K. M. Salikhov, M. M. Bakirov, R. B. Zaripov, I. T. Khairutdinov: Experimental confirmation of the formation of a spin polariton in dilute solutions of paramagnetic particles. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **25**, 17966–17977 (2023)
9. B. L. Bales, M. Peric, R. N. Schwartz: Experimental observation of a peculiar effect in electron paramagnetic resonance spectra for nitroxides undergoing fast spin exchange: Emission. *J. Phys. Chem. Lett.* **15**, 2082–2088 (2024)
10. B. L. Bales, M. Peric, R. N. Schwartz: Experimental studies of power-saturated spin modes of nitroxides in liquids. *Appl. Magn. Reson.* **55**, 1115–1127 (2024)
11. B. L. Bales, M. Peric, R. N. Schwartz, M. M. Bakirov, I. T. Khairutdinov. A comparison of pulse and CW EPR T_2 -relaxation measurements of an inhomogeneously broadened nitroxide spin probe undergoing Heisenberg spin exchange 2. The intercept discrepancy. *J. Magn. Reson.* **368**, 107771 (2024)
12. К. М. Салихов. Экспериментальное подтверждение новой парадигмы спинового обмена в разбавленных растворах парамагнитных частиц. *Известия РАН. Серия физическая* **89**, 1558–1567 (20025).
13. K. M. Salikhov. Further development of new paradigm of the spin exchange and its manifestations in EPR spectroscopy in dilute solutions of radicals. *Appl. Magn. Reson.* **56**, 1099–1130 (2025)
14. M. M. Bakirov, R. B. Zaripov, I. T. Khairutdinov, K. M. Salikhov. Experimental observation of collective modes of electron spin magnetization motion in dilute solution of ^{14}N nitroxide radicals. *Appl. Magn. Reson.* **56**, 1131–1143 (2025)
15. I. T. Khairutdinov, K. M. Salikhov, M. M. Bakirov, R. B. Zaripov. Mixed shape of EPR spectrum lines under conditions of slow spin exchange. *Appl. Magn. Reson.* **56**, 1145–1153 (2025)
16. R. B. Zaripov, M. M. Bakirov, I. T. Khairutdinov, K. M. Salikhov. Confirmation of the spin exchange paradigm in diluted solution of nitroxide radical: Spin polariton formation. *Appl. Magn. Reson.* **56**, 1155–1161 (2025)
17. S. O. Travin, K. M. Salikhov: On the Application of the new spin exchange paradigm to numerical modeling of EPR spectra. *Appl. Magn. Reson.* **56**, 1163–1180 (2025)
18. K. M. Salikhov. New approach to the formation of a Bose-Einstein condensate. *Appl. Magn. Reson.* **56**, 213–228 (2024)

К. М. Салихов

Международная премия им. Е. К. Завойского 2025

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 2025 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), Вольфганг Любитц (Мюльхайм/Рур, 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 2025 года.

В результате широкого обсуждения всех кандидатур решение комитета было единодушным – лауреатом премии 2025 был выбран профессор Цзянфэн Ду (Китайский научно-технологический университет, Хэфэй, КНР), заместитель министра образования КНР, президент Азиатско-Тихоокеанского общества ЭПР. Премия профессору Цзянфэн Ду присуждена за выдающиеся достижения в области магнитно-резонансной спектроскопии на основе спиновых кубитов.

С момента присуждения этой премии, высокого звания лауреата были удостоены 44 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,



Вручение диплома Международной премии им. Завойского 2025 года. Слева направо: Премьер-министр Республики Татарстан А. В. Песошин, профессор Цзянфэн Ду, академик РАН К. М. Салихов.

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, 2021, и 2024 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 Неделя науки в Республике Татарстан, которая проходила в смешанном формате, подразумевающем как физическое, так и онлайн участие в её работе. Церемония вручения премии состоялась 30 сентября в здании Академии наук Республики Татарстан. Открыл торжественное мероприятие директор ФИЦ КазНЦ РАН, член-корреспондент РАН Алексей Алексеевич Калачёв. Он предоставил слово председателю Международного комитета по вручению премии им. Завойского академику РАН Кеву Минуллинвичу Салихову, который объявил решение комитета. Премьер-министр Республики Татарстан Алексей Валерьевич Песошин вручил диплом Международной премии им. Завойского и медаль профессору Цзянфэн Ду и сердечно поздравил лауреата. В церемонии награждения приняли участие помощник Раиса Республики Татарстан Альберт Харисович Гильмутдинов, вице-президент АН РТ Айнура Ахатович Тимерханов, и Первый проректор – проректор по научной деятельности Казанского федерального университета профессор Дмитрий Альбертович Таюрский.

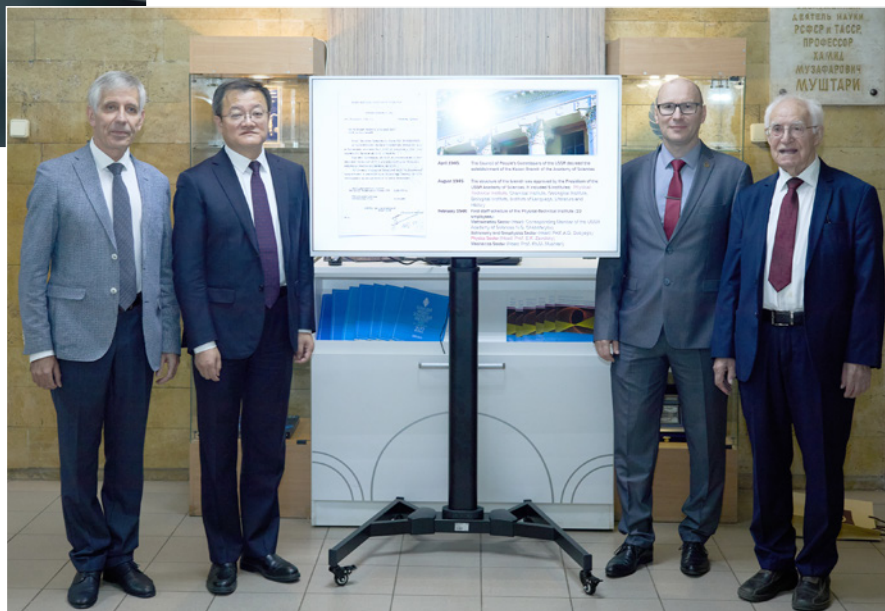
Руководитель Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН Сергей Мансурович Хантимеров вручил подарок профессору Цзянфэн Ду от института и поздравил его.



Руководитель КФТИ им. Е. К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН С. М. Хантимеров вручил подарок от института профессору Цзянфэн Ду.



Визит гостей из КНР в КФТИ им. Е. К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН в рамках проведения Недели науки города Казани. 29–30 сентября 2025 года.



Слева направо: директор ФИЦ КазНЦ РАН А. А. Калачёв, заместитель министра образования КНР Цзянфэн Ду (Китайский научно-технологический университет, Хэфэй, КНР), руководитель КФТИ С. М. Хантимеров, научный руководитель КФТИ К. М. Салихов.

В ответном слове профессор Цзянфэн Ду поблагодарил Международный комитет по вручению премии им. Завойского за высокую честь и сделал научный доклад по теме своих исследований, которые были достойно оценены научной общественностью.

Лауреат посетил музей Е. К. Завойского в КФУ, а также лаборатории КФТИ им. Е. К. Завойского и ознакомился с направлениями проводимых там исследований.

*Л. В. Мосина,
учёный секретарь комитета
по присуждению премии им. Е. К. Завойского*

Журнал “Applied Magnetic Resonance”

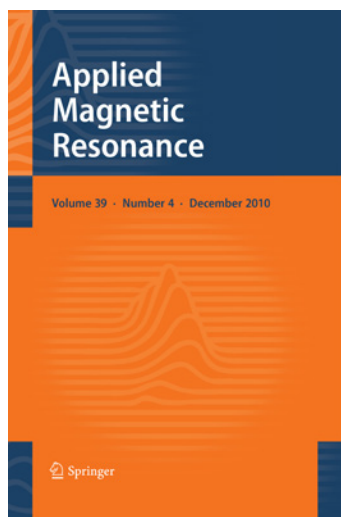
Международный журнал “Applied Magnetic Resonance” – один из первых научных журналов в нашей стране, печатающийся на английском языке и посвящённый приложениям магнитного резонанса в физике, химии, биологии, медицине, геохимии, экологии и т.д.

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 общественности и издательства Шпрингер, выпускается один том (двенадцать выпусков).

Impact factor журнала: 2024 – 1.1.



Журнал индексируется в BFI List, Baidu, CLOCKSS, CNKI, CNPIEC, Chemical Abstracts Service (CAS), Chinese Academy of Medical Science (CAMS), 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, Ovid Discovery, Portico, ProQuest, SCImago, SCOPUS, Science Citation Index Expanded (SCIE), TD Net Discovery Service, Wanfang, eLibrary.ru.

“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, мёссбауэровской 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 2025 году редакцией подготовлен 56-й том журнала, состоящий из двенадцати выпусков. Среди них – специальный выпуск, посвящённый восьмидесятилетию открытия ЭПР Е. К. Завойским в Казани (части II и III, в 2024 году вышла часть I), в котором содержатся статьи, подтверждающие молодость и потенциал ЭПР и указывающие на ещё более захватывающие перспективы развития этого метода и его разнообразных применений. Этот спецвыпуск подготовили гости-редакторы профессора Гарет и Сандра Итоны (Университет Денвера, США), и Кев М. Салихов (КФТИ им. Е. К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, Россия).

Некоторые актуальные 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. Чижином (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия) и Муратом С. Тагировым (Казанский федеральный университет, Казань, Россия).

Профессор Кев М. Салихов (КФТИ им. Е. К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, Россия) подготовил спецвыпуск “Спиновый обмен: переход к новой парадигме”. Эта область науки переживает уникальный момент перехода от широко распространённой парадигмы к новой. К настоящему времени накоплено достаточное количество экспериментальных наблюдений и теоретических решений, которые заставили пересмотреть устоявшиеся представления. Новая парадигма спинового обмена не только обобщила имеющиеся на тот момент знания, но и выдвинула ряд предсказаний. За последние пять лет ряд предсказаний был подтверждён экспериментально. Этот спецвыпуск призван стать краеугольным камнем в теории спинового обмена и его проявлений в ЭПР-спектроскопии.

Специальный выпуск, посвящённый известному учёному, профессору Джону Р. Пилброу по случаю его 85-летия, отражает заслуженное признание огромного вклада Джона Р. Пилброу в развитие спектроскопии ЭПР. Цель этого специального выпуска: собрать самые передовые достижения и исследовать будущие вызовы магнитного резонанса, включая, помимо прочего: воспоминания о великом учителе, наставнике, друге; передовые экспериментальные или теоретические методы; применение в материаловедении; спиновую химию и соответствующие области применения; ЭПР с биологическими последствиями; квантовую науку/технологии, включая квантовые вычисления. Спецвыпуск подготовили профессор Лоренс Берлинер (Университет Денвера и Университет Огайо, США) и доктор Саймон С. Дрю (Университет Мельбурна, Австралия).

Ноябрьский номер специального выпуска посвящён 65-летию известного учёного, лауреата международной премии им. Е. К. Завойского 2019 года профессора Хитоши Охта, отмеченного за выдающийся вклад в терагерцовую аппаратуру ЭПР в сильных полях и применения в физике твёрдого тела. Цель спецвыпуска – отметить многочисленные достижения Хитоши Охты в области ЭПР-спектроскопии в терагерцовом диапазоне и сильных магнитных полях. Рассматриваемые темы включают: ЭПР-спектроскопию в терагерцовом диапазоне и сильных магнитных полях; новые экспериментальные или теоретические методы для квантовых спиновых систем и материалов с сильными электронными корреляциями; ядерную поляризацию с использованием электронных спинов; передовые методы ЭПР-спектроскопии и визу-

ализации с биологическими последствиями; спиновую химию и соответствующие приложения для радикалов и возбуждённых состояний. Этот выпуск подготовили гостевые редакторы профессора Тадааки Икома (Университет Ниигаты, Япония), Владислав Катаев (Институт

исследований твёрдого состояния и материалов им. Лейбница, Дрезден, Германия), и Томас Приснер (Институт физической и теоретической химии Франкфуртского университета имени Гёте, Германия).

*Л. В. Мосина,
заместитель главного редактора*

“EPR newsletter”: на пороге нового десятилетия 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).

Заключительными аккордами великолепной симфонии в честь 80-летия открытия ЭПР были премия Завойского 2024 года, присуждённая Роберту Г. Гриффину (США) и Анатолию Ф. Ванину (Россия) за выдающийся вклад в развитие методологии ЭПР и её применение в биохимии и живых организмах, а также специальный выпуск журнала “Applied Magnetic Resonance” о праздновании 80-летия ЭПР, подготовленный в частях I, II и III Гаретом Р. Итоном, Сандрой С. Итон и Кевом М. Салиховым, почётными членами МОЭ (<https://link.springer.com/journal/723/volumes-and-issues/55-9>; <https://link.springer.com/journal/723/volumes-and-issues/56-1>; <https://link.springer.com/journal/723/volumes-and-issues/56-5>)

В 2025 году редакция подготовила один двойной выпуск и два одиночных выпуска нашего издания [2–4]. Двойной номер “EPR newsletter” гостеприимно представил свои страницы для резюме докладов молодого поколения исследователей ЭПР: Илени Сетта, Цзичэня Вана, Косукэ Хигаши, Михаила Колоколова, и Юи Исиавы, Чжана Ци ([2], стр. 6–11) о своих исследованиях, которые были отмечены премиями МОЭ и премиями Общества Науки и Технологии Электронного Спина Японии на соответствующих конференциях. Энтузиазм и энергия

молодых учёных вселяют в нас большой оптимизм относительно будущего ЭПР.

С грустью мы простились с нашими наставниками и выдающимися учёными: Клаусом Мёбиусом, Нобору Хиротой, Алексом Пайнсом и Ральфом Вебером ([2], стр. 14–31). Более тридцати лет Клаус Мёбиус, лауреат Международной премии им. Завойского 1994 года, был частью вселенной “EPR newsletter”, и было очень приятно осознавать, что он всегда был готов дать совет, помочь и поддержать. Клаус Мёбиус высоко ценил роль нашего издания как информационного бюллетеня, освещающего деятельность МОЭ для широкой научной общественности. Разнообразные материалы от Клауса Мёбиуса были изюминкой многих выпусков нашего издания. Ральф Вебер был душой и сердцем рубрики “Tips and Techniques” и соавтором многих важных статей. Вдохновляет то, что эта хорошая традиция фирмы Bruker BioSpin продолжается в статье Тимоти Дж. Келлера ([2], стр. 32, 33). Наша благодарная память сохранит память о Клаусе Мёбиусе, Нобору Хироте, Алексе Пайнсе и Ральфе Вебере на долгие годы.

Полагаю, аспиранты и их научные руководители были очень рады узнать о новой инициативе МОЭ по учреждению грантов на поездки для аспирантов на конференции, спонсируемые МОЭ ([2], стр. 4). Первыми победителями стали Янник Лимбах и Марвин Ленджер, которые посетили EUROMAR 2025, и Эхсан Ширдель Тазехканд и Трент МакГенри, которые приняли участие в летней школе Европейской Федерации ЭПР-групп 2025. Победители грантов МОЭ должны подготовить короткую статью для нашего издания о своём опыте участия в работе конференции. Статья Марвина опубликована в этом номере ([3], стр. 15). Несомненно, счастливая улыбка на лице Марвина активизирует поток молодых исследователей, стремящихся принять участие в конкурсе на этот грант, и способствует повышению узнаваемости нашего общества.

Идея Сонги Хан ввести новую рубрику под названием “Meet our Sponsor” оказалась блестящей. Первым героем



этой рубрики стал Эрик Брайертон, Virginia Diodes (31/3, стр. 6, 7), за ним последовали Ю Хэ, CIQTEK (32/3-4, стр. 7, 8), Евгений Крюков, Cryogenic Ltd (32/3-4, стр. 9, 10), и Джек Х. Фрид, лауреат Международной премии им. Завойского 1998 года, ACERT (33/1-2, стр. 4, 5). Было замечательной находкой добавить личностную характеристику и получить ответ на вопрос о том, какая история стоит за оборудованием и программным обеспечением, которые мы используем в наших исследованиях. В этом году мы приветствовали нового главного спонсора МОЭ, компанию LINEV Systems, Inc., и предоставили слово её основателю и генеральному директору Владимиру Линеву ([3], стр. 3, 4). На самом деле, было бы лучше сказать, что мы приветствовали возвращение главного спонсора МОЭ, поскольку компания LINEV Systems ранее была известна как компания ADANI Systems, которая поддерживала МОЭ более пяти лет в прошлом. Интервью с Олафом Шиманом и Патрисом Берте, лауреатами медалей МОЭ 2025 года, также придали их научным работам их личные черты. То же самое можно сказать и о статьях научных руководителей Марины Ди Валентин, Киминори Маэды, Клаудии Тайт и Марины Беннати об успехах их студентов Даниэле Панарити, Акихиро Татено, Максимилиана Майлендера, Лоренцо Катини и Аннемари Кель, соответственно ([3], стр. 5–14). Особая благодарность Гуннару Йешке, лауреату Международной премии им. Завойского 2014 года, за его продолжающееся сотрудничество с нашим изданием ([3], стр. 16, 17).

Как и вы, я считаю, что обещание есть обещание. И как же осторожно следует обещать что-либо, чтобы не испытывать дискомфорта, когда по каким-либо причинам обещание не может быть выполнено! Именно это и произошло со мной. В своей редакционной статье к выпуску [3] я анонсировала отчёт Янника Лимбаха о

гранте МОЭ на поездки, но вы не найдёте его в выпуске [4]. В последний момент было принято решение обновить его отчёт в соответствии с шаблоном, который мы используем для отчётов о наградах МОЭ для постеров молодых учёных, то есть добавить характеристику Янника, данную его научным руководителем. Надеюсь, вы согласитесь, что эти характеристики демонстрируют замечательное взаимодействие между учеником и наставником, полное гармонии, взаимного уважения и понимания (см., например, дуэты Джулиана Строппа и Даниэля Клозе, а также Ананда Анилкумара и Джейсона Сидабраса ([4], стр. 10, 11)).

К счастью, два других обещания выполнены прямо в выпуске [4]! Обратите внимание на отчёт о ежегодном общем собрании МОЭ 2025 ([4], стр. 3–5), которое состоялось в рамках 58-й ежегодной Международной конференции группы ЭПР Королевского химического общества в Лондоне, Великобритания ([4], стр. 17, 18). Отчёт о ежегодном общем собрании МОЭ 2025 несомненно показывает, что разнообразная деятельность нашего общества повышает его узнаваемость и привлекательность для сообщества исследователей в области магнитного резонанса. От всей души поздравляем лауреатов премий 2025 года, связанных с достижениями в области магнитного резонанса ([4], стр. 7–9)! Многие из них – давние друзья нашего издания, о которых неоднократно писали в наших выпусках, и которые внесли большой вклад в его развитие. На мой взгляд, если вы просмотрите любой из наших старых выпусков, вероятность встретить кого-либо из них на их страницах очень высока. И вы, безусловно, найдёте эту встречу и поучительной, и интересной, и удивительной. Специальное поздравление Цзяньфэну Ду, лауреату Международной премии им. Завойского 2025 года, отмеченному за выдающиеся достижения в области магнитно-резонансной спектроскопии на основе спиновых

кубитов. Профессор Цзянфэн Ду детально рассказал о развитии применения методов ЭПР учёными КНР ([2], стр. 12, 13).

Рада поблагодарить всех авторов статей в “EPR newsletter”, руководителей МОЭ и нашу замечательную команду ассоциированных редакторов: Кэндис Клуг, Хитоши Ота и Сабину Ван Дорслаер, а также нашего талантливого технического редактора Сергея Ахмина. Особая благодарность редакторам отдельных рубрик: Джону Пилброу (“EPR newsletter” Anecdotes), Кэндис Клуг (New EPR Faculty), Вольфгангу Любицу, лауреату Международной премии им. Завойского 2002 года (Guest

of the Issue) и Стефану Штоллю (Software). И я никогда не устану повторять девиз наш девиз: “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 2024. Ежегодник (Салихов К.М., Хантимеров С.М., ред.), с. 173–175. Казань: ФИЦ КазНЦ РАН, 2024.
2. EPR Newsletter 35, no. 1-2 (2025)
3. EPR Newsletter 35, no. 3 (2025)
4. EPR Newsletter 35, no. 4 (2025)

*Л. В. Мосина,
главный редактор*

Премия Блатта

12 ноября Учёный совет КФТИ (протокол № 28) принял решение о присуждении Премии им. М. Л. Блатта за 2025 год Хисамову Артуру Рауфовичу.

Артур Рауфович Хисамов работает в институте с 1983 года. С этого времени он неизменно трудится в отделе информационной безопасности, телекоммуникационных и сетевых технологий. В настоящее время он является руководителем этого отдела. А. Р. Хисамов и возглавляемый им отдел стабильно работают, на высоком уровне обеспечивая важнейшее направление производственной жизни нашего института. Без стабильно работающих телекоммуникаций сейчас невозможно представить ни научную работу, ни функционирование института как организации.

Артура Рауфовича отличает ровное, очень позитивное и доброжелательное отношение к коллегам, стремление помочь при возникновении у них каких-либо вопросов и проблем. При обращении он оперативно старается найти ответ и разрешить возникающие у сотрудников проблемы.

Много лет А. Р. Хисамов является членом профсоюзного комитета института, где отвечает за учёт в финансовых вопросах, активно и заинтересованно участвует во всех делах профсоюзной организации. Огромную работу Артур Рауфович выполняет как председатель комиссии по базе отдыха КФТИ. Во многом благодаря его усилиям наша база отдыха успешно функционирует на радость сотрудникам института и членам их семей.



Артур Рауфович Хисамов

Поздравляем Артура Рауфовича, благодарим за высокий профессионализм, доброжелательное отношение и готовность помочь своим коллегам и сотрудникам, желаем крепкого здоровья, сил и успехов в выполнении многочисленных и столь важных для нашего института обязанностей!

*С. Г. Львов,
председатель комиссии по присуждению премии
им. М. Л. Блатта*

Когда наука отдыхает: как прошёл первый чемпионат физтеха по стрельбе из лука

Тёплый вечер 18 июня 2025 года выдался необычным: тихий внутренний двор КФТИ им. Е. К. Завойского, где обычно слышны лишь шелест листвы и негромкие разговоры коллег, неожиданно превратился в настоящий стрелковый клуб. В этот день здесь впервые прошёл открытый чемпионат по стрельбе из лука – яркое мероприятие, которое сумело собрать вместе и молодых сотрудников, только начинающих свой путь в науке, и опытных учёных с мировыми именами, и представителей вспомогательных подразделений, без которых немислима повседневная жизнь института. Все они отложили в сторону отчёты, приборы и графики, чтобы выйти на рубеж и проверить свою меткость.

Идея мероприятия оказалась более чем успешной: участников пришло действительно много, а конкуренция развернулась нешуточная. Соревнования проходили в несколько этапов, и каждый подход к мишени сопровождался напряжённым вниманием зрителей. Согласно регламенту, каждый стрелок выполнял по три пристрелочных выстрела, чтобы приноровиться к луку и ветру, а

затем – три зачётных, от которых зависела судьба наград. Сумма набранных очков шла в копилку личного зачёта, и с каждым выстрелом интрига только нарастала.

Особый интерес вызвал командный турнир между подразделениями. Согласно регламенту, команда состояла из трёх человек, а итоговый результат складывался из лучших выстрелов каждого участника. К вопросу формирования сборных лабораторий подошли со всей серьёзностью: в составы попали самые меткие стрелки, уже успевшие проявить себя в личных состязаниях и доказать, что на них можно положиться в ответственный момент.

В личном зачёте соревнования прошли в двух возрастных категориях. Среди молодых сотрудников (до 35 лет) лучший результат показала Юлия Витальевна Слесарева из лаборатории физики ферроиков и функциональных материалов – её выстрелы отличались завидной стабильностью и точностью. В категории “Наставники” (от 36 лет) победу уверенно одержал Андрей Викторович Шкаликов из лаборатории нелинейной оптики, подтвердив, что опыт и выдержка – тоже важное оружие. Но



Победители командного и личного зачётов: Ликеров Р.Ф., Попов Д.В. Гаврилова Т.П., Слесарева Ю.В., Шкаликов А.В., Бегишев Е.М.: все с подземной или надземной частями лука.



Запоминайте лица, они прогуливали работу на глазах у руководителя (он контролировал).



В самую луковичку – стрелы долетели благодаря точным расчётам А. А. Камашева.

главный приз за командную меткость забрала лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков в составе Татьяны Павловны Гавриловой, Родиона Фаридовича Ликерова и Даниила Владимировича Попова – их слаженность и точность не оставили соперникам шансов.

Атмосферу июньского вечера поддерживали не только спортивный азарт и дружеские подбадривания, но и прохладительные напитки, которые помогали освежиться между подходами к мишени. Организаторы позаботились и об оригинальных призах: каждый участник получил в качестве памятного трофея самую настоящую луковичу – намёк на главный атрибут турнира и символ меткости. А победителей ждал особый сюрприз: целый луковый букет, который вызвал улыбки и аплодисменты зрителей!

Физтех доказал: точность нужна не только в научных формулах, расчётах и экспериментах, но и в стрельбе из лука. Этот вечер подарил институту новые эмоции, неожиданные таланты и поводы для гордости. Ждём новых встреч у мишеней – надеемся, что следующее состязание соберёт ещё больше участников и подарит не меньше ярких моментов!

Д. Е. Железнякова, Т. П. Гаврилова

Итоги 2025 года: торжественное собрание сотрудников КФТИ

25 декабря 2025 года сотрудники института собрались в актовом зале на ежегодную торжественную встречу по подведению итогов уходящего года. По доброй традиции перед началом был организован небольшой фуршет с шампанским и мандаринами. И конечно же, состоялась фотосессия с Дедом Морозом.

После того как ведущие объявили о начале торжественного вечера, все собравшиеся исполнили гимн института. Затем слово было предоставлено Сергею Мансуровичу Хантимерову, руководителю КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН. Поздравив сотрудников с наступающим Новым годом, Сергей Мансурович перешёл к подведению итогов работы института в уходящем году. Поблагодарив коллектив за многолетний добросовестный труд, он отметил юбиляров, а также представил новых сотрудников и вновь поступивших аспирантов. В этом году ряды института пополнили шесть аспирантов: Эндерова Татьяна Николаевна, Железнякова Диана Евгеньевна, Хамидуллин Ильдар Ниязович, Митюшкин Евгений Олегович, Желева Евгения Богдановна, Арбузов Данила Андреевич. Сергей Мансурович пожелал им больших успехов и новых достижений. Он также рассказал о научных итогах года, отметив победителей конкурсов Российского научного фонда, Фонда науки и технологий Республики Татарстан, Академии наук Республики Татарстан, а также упомянул новые хозяйственные проекты.

От научных достижений Сергей Мансурович перешёл к поздравлениям сотрудникам, защитившим докторские (Никифоров В.Г., Камашев А.А.) и кандидатские (Гафарова А.Р.) диссертации в 2025 году. Также он отметил сотрудников, получивших государственные награды и звания:

- Почётное звание “Почётный работник науки и высоких технологий Российской Федерации” – Воронкова В.К., Таланов Ю.И., Хантимеров С.М.;
- Медаль “За доблестный труд” – Гарифуллин И.А.;
- Знак отличия “За безупречную службу Казани” – Мосина Л.В.;
- Благодарность Мэра Казани – Ахметгалиева А.М., Губайдуллина А.З.;
- Почётная грамота Казани – Куркина Н.Г.;
- Благодарность Минобрнауки РФ – Гайнутдинов Х.Л., Шакуров Г.С.;
- Знак отличия “Отличник сферы образования и науки” (МОН РТ) – Степанов А.Л., Фалин М.Л., Хамидуллин Б.Ш., Шустов В.А.;
- Благодарность Кабинета Министров РТ – Хайбуллин Р.И., Сулейманов Н.М.

Кроме того, было отмечено проведение в стенах КФТИ семинара памяти Григория Бенционовича Тейтельбаума.

Ещё одним важным событием уходящего года стала “Kazan Science Week 2025” (Неделя науки города Казани). В

её рамках прошли международные конференции “Advanced Laser Technologies”, “Superconductivity in nanostructures 2025”, “Modern Development of Magnetic Resonance 2025”, а также состоялось вручение Международной премии имени Е. К. Завойского. Лауреатом премии стал профессор Цзянфэн Ду, заместитель министра образования КНР, он получил премию за выдающиеся достижения в области магнитно-резонансной спектроскопии на основе спиновых кубитов. Сергей Мансурович поблагодарил молодых учёных КФТИ за помощь в организации этих мероприятий. Завершая своё выступление, Сергей Мансурович также остановился на хозяйственных итогах года, отметив проведённый весенний субботник и ремонтные работы в ряде кабинетов института.

Эстафету от руководителя подхватили ведущие – Сахин Василий Олегович, старший научный сотрудник лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники, и Гайнуллина Лейсан Зиннуровна, ведущий специалист по кадрам.

По сложившейся традиции на сцену пригласили члена профкома КФТИ Львова Сергея Глебовича для вручения премии имени М. Л. Блатта. Этой наградой научные сотрудники выражают признательность и уважение коллегам из вспомогательных подразделений, многие годы добросовестно трудившимся в институте. В 2025 году лауреатом премии стал Хисамов Артур Рауфович, начальник отдела информационной безопасности, телекоммуникационных и сетевых технологий.

Затем ведущие перешли к достижениям молодых учёных. Были отмечены победители различных научных конкурсов. Митюшкин Евгений Олегович (лаборатория квантовой оптики в алмазах) стал победителем конкурса республиканских научных премий для поддержки молодых учёных РТ.

В конкурсе “Лучший молодой аспирант ФИЦ КазНЦ РАН” призовые места заняли сотрудники КФТИ:

I место – Эндерова Татьяна Николаевна (лаборатория проблем сверхпроводимости и спинтроники);

II место – Попов Даниил Владимирович (лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков) и Гатауллина Рамиля Мансуровна (лаборатория квантовой оптики в алмазах).

Лауреатом премии им. Б. М. Козырева стал Бегишев Евгений Михайлович (лаборатория радиационной физики), лауреатом премии им. Н. С. Гарифьянова – Железнякова Диана Евгеньевна (лаборатория проблем сверхпроводимости и спинтроники). Также в октябре на итоговой конференции молодых учёных победителем в конкурсе на лучший доклад стала Эндерова Татьяна Николаевна.

Молодёжь в этом году активно участвовала не только в конкурсах, но и в организации “Kazan Science Week 2025” – Недели науки города Казани, которая, вопреки



По доброй традиции перед началом был организован небольшой фуршет с шампанским и мандаринами. И конечно же, состоялась фотосессия с Дедом Морозом.



названию, длилась целых две недели. Словом, скучать не приходилось: эти две недели прошли насыщенно, ярко и действительно интересно.

Продолжила свою работу творческая лаборатория “Творечник” под руководством Дианы Железняковой. Она была создана в 2024 году при поддержке руководства института и совета молодых учёных. За год в “Творечнике” прошло 43 мероприятия – от творческих вечеров и мастер-классов до кинопоказов и игротек. Все они помогали молодым учёным отвлечься от лабораторных будней, лучше узнать друг друга и просто хорошо провести время. 16 апреля состоялся шашечный турнир, где почётные места заняли Митюшкин Евгений, Железнякова Диана и Яцык Иван. Ещё одним увлечением стала стрельба из лука – тренировки в рамках “Творечника” проходили регулярно. Их кульминацией стал открытый чемпионат института 18 июня. Соревновались и в личном, и в командном зачёте, причём участники шутили, что стреляют “как из лука,

так и по луку”. Победителями стали: среди молодых учёных – Юлия Слесарёва, среди наставников – Андрей Шкаликов, а в командном зачёте – лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков. “Творечник” продолжает доказывать: наука и творчество – отличные союзники. Пожелав “Творечнику” новых творческих успехов, ведущие перешли к развлекательной части вечера.

Музыкальным сюрпризом вечера стало выступление Лейсан Гайнуллиной. Она подарила гостям зажигательную песню “Сандугачлы таннар” (“Соловьиные рассветы”) – произведение талантливой певицы и композитора Сюмбель Билаловой. Зрители встретили номер бурными аплодисментами и с удовольствием отбивали ритм, создавая в зале по-настоящему праздничную атмосферу. После музыкальной паузы настал самый долгожданный и сказочный момент – церемония награждения победителей конкурса на лучшее новогоднее оформление комнат. В этом году девять коллективов института проявили настоящую фантазию:



Эстафету от руководителя подхватили ведущие – Сахин Василий Олегович, старший научный сотрудник лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники, и Гайнуллина Лейсан Зиннуровна, ведущий специалист по кадрам.



Праздничный вечер набирал обороты – из зрителей все превратились в активных участников.

сверкали гирлянды, красовались праздничные композиции, а некоторые кабинеты превратились в маленькие зимние сказки. Жюри было непросто, но выбор сделан. I место заслуженно получила комната 415 – лаборатория физики и химии поверхности. Их новогоднее оформление покорило всех своей гармонией и вниманием к деталям. II место – у комнаты 413, где творчески потрудились группа

государственных закупок и материально-технического снабжения. III место разделили сразу два участника: комната 307 (отдел кадров) и библиотека. Оба коллектива создали уютную праздничную атмосферу, которая не оставила равнодушными ни жюри, ни коллег.

Праздничный вечер набирал обороты – из зрителей все превратились в активных участников. Гостей ждала

целая серия интерактивных форматов, где каждый мог проявить себя, блеснуть эрудицией или просто от души повеселиться. Первым испытанием стал Квиз – командная интеллектуально-развлекательная викторина, которая мгновенно завладела вниманием зала. Задания были подобраны так, чтобы и голову поломать, и посмеяться: от научных фактов до новогодних филь-



В 2025 году лауреатом премии стал Хисамов Артур Рауфович, начальник отдела информационной безопасности, телекоммуникационных и сетевых технологий.



Музыкальным сюрпризом вечера стало выступление Лейсан Гайнуллиной.

Сотрудники лаборатории нелинейной оптики на новогоднем вечере.



мов и забавных жизненных ситуаций. Вопросы сыпались один за другим, а в зале кипели нешуточные страсти: участники горячо обсуждали варианты, радовались правильным ответам и подшучивали над соперниками. Квиз оказался не просто развлечением, а отличным способом вспомнить, что наука и юмор – отличные союзники. К концу игры стало ясно: проигравших нет, потому что главный приз – отличное настроение и новые поводы для улыбок.

После интеллектуального сражения настало время для отдыха и улыбок. Ведущие включили видеоролик – блиц-интервью с сотрудниками института, которое подготовили организаторы вечера. Главный сюрприз заключался в том, что вопросы, прозвучавшие в ролике, не совпадали с теми, что задавались во время съёмок. Это неожиданное несоответствие создало отличный простор для юмора и добавило видео особого шарма. Темы были самыми разными: новогодние желания, научные мечты и забавные рабочие моменты. А ответы получились ещё разнообразнее – от философских размышлений до искромётных шуток. В зале то и дело вспыхивал смех – зрители с удовольствием наблюдали за знакомыми лицами на экране, угадывали, кто что скажет, и радовались каждому остроумному ответу. Ролик стал настоящей “вишенкой на торте”: неожиданно, весело и очень по-домашнему тепло.

Атмосфера волшебства продолжилась игрой в “Тайного Санту”. Коллеги с волнением и улыбками вручали друг другу небольшие, но очень душевные подарки. После

этой тёплой паузы ведущие объявили “Музыкальное бинго”. Участники с азартом угадывали знакомые мелодии, напевали любимые песни и наперебой заполняли свои карточки. Знакомые новогодние хиты звучали один за другим, и в зале воцарилась по-настоящему праздничная, живая атмосфера.

А завершился вечер очень трогательно. На большом экране показали блиц-опрос, в котором сотрудники института честно и с улыбкой рассказали, чем запомнился уходящий год, и поделились самыми сокровенными новогодними пожеланиями. Кто-то мечтал о новых открытиях, кто-то – о простом человеческом счастье, а кто-то просто пожелал коллегам здоровья и удачи.

Этот видеоролик стал идеальной финальной точкой – тёплой, искренней и объединяющей.

Подготовка и проведение торжественного вечера – от создания презентаций и видеороликов до праздничного оформления, музыкального и технического сопровождения – были осуществлены силами Совета молодых учёных и специалистов КФТИ при поддержке руководства.

*Л. З. Гайнуллина,
фотограф А. М. Шегада*

СМИ о сотрудниках института

Как разработки учёных повлияли на нашу жизнь?¹

Тема ток-шоу “Точка опоры” в прямом эфире на ТНВ



В обсуждении принимали участие:

- **Андрей Камашев**, руководитель лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники КФТИ им. Е. К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, кандидат физико-математических наук, лучший молодой учёный Республики Татарстан 2023 г.;
- **Анна Морозова**, научный сотрудник лаборатории физики и химии поверхности КФТИ им. Е. К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, кандидат химических наук;
- Эльвира Ахметгалиева, доцент кафедры медицинской инженерии КНИТУ-КХТИ, кандидат технических наук;
- Ирек Мухаматдинов, старший научный сотрудник Института геологии и нефтегазовых технологий КФУ, кандидат технических наук, лауреат премии Президента РФ для молодых учёных за 2022 год;
- Павел Петров, инженер Центра композиционных технологий КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева;
- Сергей Никифоров, старший преподаватель кафедры лазерных и аддитивных технологий КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева, победитель конкурса “Лучший молодой преподаватель Казани 2023 г.” среди вузов.

¹ Телеканал ТНВ, передача “Точка опоры”. 14 января 2025 г. Ведущая Светлана Кадырова
https://vk.com/kaznc_ran?w=wall-205673092_478

Дан старт Международному году квантовой науки и технологии²

Делегация Российской академии наук приняла участие в торжественной церемонии открытия Международного года квантовой науки и технологии, прошедшей 4–5 февраля в штаб-квартире ЮНЕСКО в Париже (Франция).

Российскую академию наук на церемонии представили директор ФИЦ “Казанский научный центр РАН” член-корреспондент РАН Алексей Калачёв и руководитель Троицкого обособленного подразделения ФИАН им. П. Н. Лебедева РАН член-корреспондент РАН Андрей Наумов.

2025 год объявлен Организацией Объединённых Наций Международным годом квантовой науки и технологии в ознаменование 100-летия квантовой механики. С момента появления гипотез и теорий, утверждающих, что материя и энергия в микромире (на уровне отдельных атомов, электронов, фотонов) ведут себя удивительным образом, необъяснимым с помощью классических уравнений физики, к настоящему времени квантовая наука достигла впечатляющих успехов.

Многие современные технологии, устройства и инструменты основаны на квантовых принципах – в том

числе лазеры (квантовые генераторы света), спутниковая навигация (ГЛОНАСС, GPS), телекоммуникационное оборудование, источники и детекторы света, устройства микроэлектроники, компьютеры и робототехника, энергетика, новые медицинские технологии.

Выдающиеся достижения в области квантовой науки и технологий отмечены многочисленными Нобелевскими премиями, среди которых достойное место занимают результаты российских и советских учёных – членов Академии наук. Впечатляющие перспективы обещают и современные разработки – квантовые вычислители, квантовые коммуникации и криптография, квантовая сенсорика.

Эти и целый ряд других научных вопросов обсудили в ЮНЕСКО представители нескольких десятков стран мира, в том числе нобелевские лауреаты Анн Л’Юилье, Ален Аспе, иностранный член РАН Серж Арош, Уильям Филлипс, президент Международной комиссии по оптике профессор Эрик Розес, президент международного общества ОРТИСА иностранный член РАН Герхард Лёйхс и другие авторитетные учёные. Широко были представлены



² Управление пресс-службы РАН. 4 февраля 2025 г.
<https://new.ras.ru/activities/news/dan-start-mezhdunarodnomu-godu-kvantovoy-nauki-i-tehnologii/>

научные и общественные организации, национальные академии наук, профессиональные сообщества, научные издательства, инновационные компании. Торжественную церемонию открыла Лидия Брито – заместитель генерального директора ЮНЕСКО по естественным наукам.

Помимо фундаментальных результатов квантовой науки и инструментальных достижений квантовых технологий, особое внимание на проведённых в рамках церемонии открытия лекциях, панельных дискуссиях и круглых столах уделялось роли науки в устойчивом развитии международных отношений, образовании и воспитании. Также были затронуты вопросы смены технологического уклада в связи с появлением качественно новых технологий, а также вопросы новой философии науки и этики технологического развития. Так, в своём выступлении Алан Аспе отметил важность доведения результатов фундаментальных исследований до реального продукта,

популяризации науки и научного метода. Учёный остановился на концепции “выхода” фундаментальной науки за пределы лабораторий благодаря различным инструментам популяризации научных знаний.

На встрече была отмечена важность проведения подобных мероприятий как для привлечения внимания к прорывным фундаментальным научным направлениям, так и в деле взаимовыгодного сотрудничества разных стран, решения сложных политических вопросов через установление международных научных контактов.

В течение 2025 года под эгидой ЮНЕСКО будут проводиться многочисленные мероприятия, посвящённые квантовым наукам и технологиям, в том числе при участии Российской академии наук. Важность развития квантовой науки и технологий в России неоднократно отмечалась на правительственном уровне и в профильном научном совете РАН.

Революция в диагностике и медицинских имплантатах. Учёные открыли новые биосовместимые пьезоэлектрические материалы³

Исследователи Химического института имени А. М. Бутлерова Казанского федерального университета, совместно с учёными из ФИЦ “Казанский научный центр Российской академии наук”, сделали значительный прорыв в области органических пьезоэлектрических материалов.

В ходе исследования, возглавляемого директором химического института Маратом Зиганшиным, были выявлены перспективные органические соединения – дипептиды, способные к самосборке в разнообразные биосовместимые микро- и наноструктуры с уникальными свойствами.

Пьезоэлектрические материалы, преобразующие механическую энергию в электрическую, давно вызывают интерес учёных благодаря своему потенциалу для различных приложений. Однако большинство неорганических материалов, таких как цирконат-титанат свинца, не являются биосовместимыми и могут представлять угрозу для живых организмов. В отличие от них, обнаруженные дипептиды могут использоваться для создания безопасных биосовместимых имплантатов и диагностических средств.

В рамках программы стратегического академического лидерства “Приоритет-2030”, команда исследователей,

включающая Суфию Зиганшину, Елену Кудрявцеву и сотрудников ФИЦ КазНЦ РАН Анну Морозову, Надежду Курбатову и Анастасу Бухараева, сосредоточилась на разработке технологии масштабируемого получения микрокристаллов и микростержней из дипептидов. Методика управления размером структур на примере лейцил-фенилаланина и фенилаланил-лейцина позволила получить объекты с требуемыми размерами и пьезоэлектрическими свойствами.

Результаты исследования показали, что дипептиды могут генерировать электрическую энергию с коэффициентами 71 пм/В и –73 пм/В для структур на основе фенилаланил-лейцина, и 87 пм/В и –19 пм/В для микрокристаллов лейцил-фенилаланина. Эти значения превосходят ранее изученные показатели для дифенилаланина.

В дальнейшем учёные планируют создать композиционный материал на основе гибкой матрицы с внедрёнными дипептидными пьезоэлектриками, что откроет новые горизонты в медицине и электронике.

Исследования были поддержаны субсидией Казанского федерального университета в рамках государственного задания в сфере научной деятельности. Подробности опубликованы в журнале Applied Materials Today.

³ Газета Поиск. 27 февраля 2025 г.
<https://poisknews.ru/medicizina/revolyuciya-v-diagnostike-i-medicinskih-implantatah-uchenye-otkryli-novye-biosovmestimye-pezoelektricheskie-materialy/>

Физика для жизни. “Всевидающий” газ и сверхпроводниковый “пирог”⁴

Что, если не наука, продвигает человечество вперёд, делает нашу жизнь более комфортной? Наш рассказ – о некоторых разработках учёных из Казанского физико-технического института имени Завойского Федерального исследовательского центра “КазНЦ РАН”. Результаты их исследований уже в обозримом будущем должны качественно изменить окружающий нас мир.

Как газ улучшил “зрение” томографа

В лаборатории методов медицинской физики КФТИ имени Завойского занимаются созданием современного оборудования для магнитно-резонансной томографии. Один из новых и очень актуальных проектов – разработка технологии МРТ лёгких с применением гиперполяризованного ксенона.

Для начала о том, почему это важно. Помните шутку: “Пройдут годы, но вы всегда с точностью сможете сказать, где вы находились в любой из дней весны 2020-го”? Да, подавляющее большинство из нас в то время безвылазно сидело по домам из-за пандемии ковида. Очень многим не повезло столкнуться с вирусом лично. И часть из тех, кто так заболел, наверняка обследовалась на компьютерном томографе. И, может, даже не один раз.

Компьютерная рентгеновская томография – на сегодня стандартная методика диагностики при ковиде. Метод достаточно информативен, но у него есть некоторые помехи. Скажем, исследования Колумбийского университета (США) показывают: на 10 тысяч обследований на КТ приходится восемь случаев связанного с этой процедурой рака. Всё-таки компьютерный томограф – это облучение, хоть и не слишком большое.

– Метод МРТ не даёт лучевой нагрузки на организм, к тому же он гораздо более информативен, чем КТ, – рассказывает заведующий лабораторией методов медицинской физики Яхья Фаттахов. – Но магнитно-резонансный томограф при сканировании обследуемого не видит его лёгкие из-за того, что они наполнены воздухом. Там мало протонов, на регистрацию которых настроен томограф. В результате МРТ при обследовании показывал вместо лёгких как будто чёрную дыру.

В то же время гиперполяризованный газ – гелий или ксенон – может выступить контрастным веществом, благодаря которому томограф будет способен “разглядеть” лёгкие. Яхья Фаттахов вспоминает: у КФТИ уже были попытки провести совместные с Казанским университетом эксперименты с использованием поляризованного газа, но не ксенона, а гелия. Задача вызвала большой инте-

рес, так как её решения ждали специалисты не только в медицине, но и в геологии, ведь с помощью такого газа можно исследовать нефтяные керны. И принцип был тот же – использовать газ как контрастное вещество, визуализирующее некие внутренние полости.

Перенести эксперименты в медицинскую сферу, используя вместо гелия гиперполяризованный ксенон, казанским физикам в 2022 году предложил один из институтов “Росатома”.

У лаборатории методов медицинской физики уже был большой опыт в разработке томографов. Небольшой коллектив в тесной кооперации с другими татарстанскими институтами и предприятиями создал четыре томографа на всё тело человека, было обследовано свыше 30 тыс. пациентов. А около десяти лет назад в лаборатории создали портативный магнитно-резонансный томограф отдельно для исследования суставов. Возможно, именно успешные работы в этой области привлекли внимание “Росатома”, который в поисках по России научных партнёров для новой разработки обратился именно в КФТИ имени Завойского.

Физики модернизировали свой томограф, разработали программное обеспечение, позволяющее ему работать с использованием ксенона. Работали в содружестве с учёными из других институтов Федерального исследовательского центра РАН и из КФУ, а также с медиками из КГМУ и медицинской академии.

Эксперименты с газом проводили на лабораторных крысах. Конечно, заставить животное вдохнуть газ и задержать на несколько секунд дыхание нереально, так что использовали наркоз, а ксенон в крысиные лёгкие подавали по системе ИВЛ.

Заметим, кстати, что все эксперименты проходили с одобрения комиссии по биоэтике, которая действует при ФИЦ “КазНЦ РАН”, и все животные остались живы.

А результаты исследователей очень порадовали.

– Мы увидели, что подобное неинвазивное обследование с применением гиперполяризованного газа показывает структуру и процесс функционирования лёгких с такой высокой детализацией, которую невозможно получить при помощи обычной МРТ и любых других методов, – говорит Яхья Фаттахов. – И обследовать по этой методике можно пациентов не только с ковидом, но и с астмой, обструктивными болезнями лёгких. При этом человек не получает лучевую нагрузку. Кроме того, чувствительность метода не зависит от силы магнитного

⁴ Общественно-политическое издание “Татарстан”. 4 марта 2025 г. <https://protatarstan.ru/news/dobroe/fizika-dlia-zizni>



Младший научный сотрудник Альфис Баязитов настраивает аппаратуру томографа.

поля МРТ-сканера, а это даёт потенциальную возможность использовать недорогие низкополевые томографы, и процедура МРТ существенно дешевле, становится более доступной.

Теперь участники эксперимента надеются, что исследования будут продолжены и в перспективе российские пациенты получают необходимую и безопасную диагностику.

По рецепту слоёного теста

Все мы пользуемся электронными приборами. Каждый год они всё более совершенствуются. Особенно это заметно на компьютерной технике – наши ноутбуки и смартфоны, становясь компактнее и легче, при этом работают всё быстрее, и функций у них всё больше. Но ведь нельзя улучшать их вечно?..

– Количество транзисторов, расположенных на чипах современной полупроводниковой электроники, от года к году растёт по экспоненте, – рассказывает заведующий лабораторией проблем сверхпроводимости и спинтроники КФТИ имени Завойского Андрей Камашев. – Но у этого процесса есть предел, и он достаточно близок. А значит, в обозримом будущем их быстродействие перестанет расти.

Одна из альтернатив современной электронике – сверхпроводящая спинтроника, технология, основанная на применении сверхпроводящих материалов. Приборы на сверхпроводниках способны работать гораздо быстрее и энергоэффективнее.

– Ещё в конце девяностых годов прошлого века в США была предложена модель сверхпроводящего спинового клапана – нового вида транзистора, который мог бы заменить современные транзисторы, – поясняет

Андрей Камашев. – Но первый экспериментальный образец такого клапана создали в 2010 году именно в нашей лаборатории. Несколько лет физики подбирали материалы, искали оптимальные параметры конструирования системы...

Речь, поясняет Андрей Камашев, не идёт о каких-то принципиально новых сверхпроводящих материалах – они были известны и раньше. Всё дело именно в новых системных их сочетаниях, конструктивных особенностях, которых прежде не применяли. Спинновый клапан – это своего рода слоёный “пирог”, тонкоплёночная структура, каждый слой в которой – толщиной в несколько нанометров. Вот над тем, как сочетать эти слои, подобрать их оптимальный размер, и работают казанские физики.

После того как был создан первый образец, учёные из лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтро-



Заведующий лабораторией проблем сверхпроводимости и спинтроники КФТИ имени Завойского Андрей Камашев.

ники значительно продвинулись в своих экспериментах. В прошлом году в одном из высокорейтинговых научных журналов они опубликовали статью, где показали, что эффективность разработанной ими системы выросла по сравнению с первыми опытами в 60 раз.

– Конфигурация, которую мы предложили, обладает некоторыми уникальными особенностями, – говорит Андрей Камашев. – В перспективе наши разработки могут использоваться для решения сложных математических, криптографических задач, которые требуют многоуровневых расчётов, моделирования больших систем.

Учёные говорят: на повседневную жизнь сверхпроводниковые спиновые клапаны, обладающие повышенным быстродействием, вряд ли прямо сегодня окажут большое влияние – человеку пока вполне достаточно тех скоростей и функций, которые уже доступны, например, его смартфону. Но давайте вспомним, что ещё лет 50 назад бытовала абсолютная уверенность: никому и ни для чего дома не понадобится персональный компьютер... Так что не исключено, что со временем сверхскоростные и энергоэффективные спины станут и частью повседневной бытовой электроники.

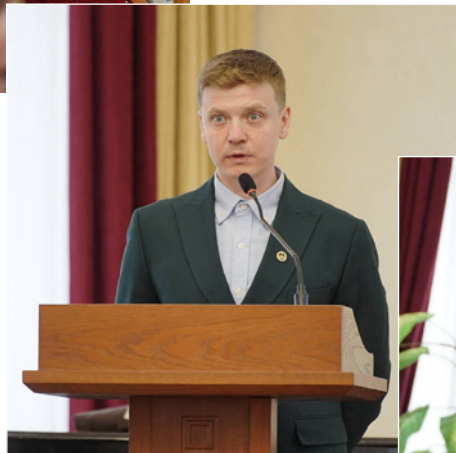
В Казанском научном центре РАН выберут лучшего молодого учёного и аспиранта⁵

В Казанском научном центре Российской академии наук (РАН) стартовал финал конкурса на звание лучшего молодого учёного и аспиранта по итогам 2024 года. Призовой фонд составит 450 тыс. рублей.

“Главной особенностью нашего конкурса стала мультидисциплинарность. Молодые учёные выступают перед специалистами по разным направлениям. Важно не только продемонстрировать глубину научных публикаций, но и донести важность исследований до тех, кто не является

специалистом в этой области”, – отметил директор Казанского научного центра РАН Алексей Калачёв.

Сегодня все 29 претендентов выступают со своими научными докладами, а имена победителей назовут завтра. Оценивать конкурсантов будет жюри из 12 учёных, представляющих разные направления.



⁵ Татаринформ. 8 апреля 2025 г. Фото: Владимир Васильев.
<https://www.tatar-inform.ru/news/v-kazanskom-nauchnom-centre-ran-vyberut-lucsego-molodogo-ucenogo-i-aspiranta-5979724>

Сюжет о конкурсе “Лучший молодой учёный (аспирант) Казанского научного центра РАН 2024”⁶

Лучшего молодого учёного по итогам прошлого года назвали в Казани. В научном центре Российской академии наук прошёл финал конкурса. С докладами выступили учёные в области физических, технических, математических, биологических и химических наук. Было представлено 29 исследований. Необходимо было продемонстрировать не только глубину разработок, но и объяснить их важность для экономики.



Алексей Калачёв, директор ФИЦ КазНЦ РАН: “Особенность нашего конкурса в том, что мы, как мультидисциплинарный научный центр, обращаем внимание на усиление взаимосвязи различных направлений науки”.



Дмитрий Жарков, руководитель молодёжной лаборатории оптических сенсоров для интегральной фотоники: “Если молодой учёный со студенческих лет начинает работать в науке, то у него уже даже во время обучения появляется определённый доход. Работа не требует отрыва от учёбы, ему достаточно приходить после занятий на 4–5 часов, и давать определённые научные результаты. Его включают в различные проекты, и, заканчивая учёбу, он имеет преимущество перед теми, кто только начинает свой трудовой путь”.

Молодёжь пошла в науку⁷

Конкурс для молодых учёных КазНЦ РАН проводится ежегодно, в нём принимают участие представители различных научных областей – физики, химии, математики, биологии... В этом году призовой фонд составил 450 тыс. рублей. 29 претендентов-финалистов выступили перед жюри со своими научными докладами. В итоге победителями стали 18 человек, между которыми и разделили призовые. Таким образом в научном центре стимулируют молодые таланты.

По словам руководителя молодёжной лабораторией “Оптические сенсоры для интегральной фотоники” КазНЦ РАН (её представители также участвовали в конкурсе) Дмитрия Жаркова, прошли те времена, когда способная молодёжь не шла в науку, опасаясь бедности.

– В последнее время тенденции изменились, молодёжь приходит и, самое главное, остаётся в науке после защиты дипломов. Если раньше часто было так, что человек, защитив диплом, уходил в свободное плавание, в коммерцию, то сейчас государственные меры поддержки позволяют ему работать дальше. Когда я заканчивал вуз в 2011 году, в науке оставались единицы, – вспомнил Жарков. – Потом появились гранты, субсидии, сертификаты на жильё... Можно прийти в фонд поддержки науки, федеральный или региональный, например, в Фонд науки и технологий РТ, с любой идеей, выступить и получить

⁶ Телеканал РОССИЯ–Татарстан. 10 апреля 2025 г.

⁷ Общественно-политическая газета Республика Татарстан. 22 апреля 2025 г.
<https://rt-online.ru/najti-i-unichtozhit-molodye-uchenye-v-kazani-sozdayut-nanonositeli-dlya-ubijstva-rakovykh-kletok/>

достаточно серьёзную поддержку, в том числе на аренду помещения, оборудования. Сейчас можно заниматься только наукой без подработок.

Директор Казанского научного центра Российской академии наук, член-корреспондент РАН Алексей Калачёв подтвердил, что молодёжь сейчас действительно пошла в науку, но нельзя сказать, что в большом количестве. К тому же в учёном мире идёт конкуренция за молодые кадры.

– Казань конкурирует с Москвой и Санкт-Петербургом, многие уходят туда от нас и по финансовым соображениям, и из-за желания работать в центральных организациях. Тем не менее, есть примеры успешной научной деятельности молодёжи и у нас в Казани, – отметил Калачёв.

Алексей Калачёв о едином центре академической науки в РТ: “До 2030 года проект должен быть реализован”⁸

Глава Казанского научного центра РАН рассказал о финансировании, зарплатах учёных и лекарстве от рака

Сегодня Россия переживает период трансформации, в котором наука и технологии снова становятся важным государственным приоритетом. Неслучайно с 2022 по 2031 год в РФ идёт Десятилетие науки и технологий. Страна взяла курс на импортозамещение и технологический суверенитет, и, в частности, от успехов учёных во многом зависит, сможет ли Россия укрепить свою независимость. Один из центров науки в Татарстане – Федеральный исследовательский центр “Казанский научный центр Российской академии наук” (ФИЦ “КазНЦ РАН”). В Казанском научном центре шесть институтов. Они были все объединены в одно юридическое лицо в 2017 году, когда был создан федеральный исследовательский центр. “До этого все они существовали как самостоятельные юридические лица, каждый институт получал независимое финансирование, отчитывался сам по себе, но некая координация была”, – рассказывает директор КазНЦ Алексей Калачёв, который стал гостем интернет-конференции “БИЗНЕС Online”.

“Многие сотрудники центра преподают в вузах, – рассказывает Калачёв, – и привлекают студентов к научным проектам и исследованиям. В основном – 90% случаев – речь идёт о студентах КФУ. Среди студентов, с которыми мы непосредственно работаем, из тех, кто защищает под руководством наших сотрудников дипломную работу, думаю, процентов 30–40 остаётся в науке”.

При этом общий уровень подготовки студентов в вузах изменился, отмечает гость редакции. “Те курсы, которые мы слушали, и уровень лекций, который нам читался, были совершенно другими. Сейчас большая проблема, когда на первом курсе приходится учить тому,



Алексей Калачёв, директор ФИЦ КазНЦ.

что раньше хорошо знали выпускники школ. Возможно, что это общемировая тенденция, поскольку и объём, и форма усвоения информации стали совершенно другими. Глубоко разбирать темы, как это делали во времена, когда мы были студентами, сейчас невозможно”, – отмечает он.

Интерес к точным наукам у выпускников школ за последние годы действительно упал, отмечает Калачёв. “Я бы сказал, что это связано в целом с экономической ситуацией, технологическим укладом и так далее, с престижем профессии учёного, которая определяется, в частности, и уровнем зарплаты. В представлении общества учёные занимаются какими-то сложными вещами за небольшие деньги, и большой вопрос: зачем? Сейчас гораздо больше говорят о науке, но самое главное, чтобы был устойчивый запрос на науку со стороны экономики в целом, иначе ничего не изменится”, – отметил Калачёв.

Согласно майским указам президента РФ зарплата учёных должна быть доведена до 200% от средних по региону.

⁸ “БИЗНЕС Online”. 22 мая 2025 г. Корреспондент Татьяна Леонтьева. Фото: Андрей Титов. <https://www.business-gazeta.ru/article/67294>.

Сколько зарабатывают учёные?

Вопрос оплаты труда учёных интересовал и читателей “БИЗНЕС Online”. Оклад лаборанта-исследователя – 23 тыс. рублей, научного сотрудника – 38 тыс. рублей, главного научного сотрудника – 56 тыс. рублей. Кроме того, сотрудники могут получать дополнительные выплаты по грантовым программам, отмечает Калачёв. “Всё зависит от того, насколько успешно сотрудник получает гранты или привлекается к участию в грантах. У кого-то может более 100 тысяч в месяц выходить зарплата. Всё зависит от того, насколько успешно мы работаем”, – добавляет глава центра. А главным магнитом для учёных по-прежнему остаётся Москва, где зарплаты существенно выше и могут достигать 100 тыс. рублей уже у молодых сотрудников.

При этом, согласно майским указам президента РФ, зарплата учёных должна быть доведена до 200% от средних по региону. В январе 2025 года, по данным Росстата, средняя зарплата в республике составляет около 78 тыс. рублей. “Эти 200 процентов мы должны обеспечить за счёт всех источников финансирования: бюджетных и внебюджетных. Тогда в совокупности эти 200 процентов выполняются. Однако в последнее время из-за серьёзного повышения средней зарплаты в Татарстане (что, в принципе, хорошо!) для этого требуется существенное повышение внебюджетного финансирования”, – отмечает глава КазНЦ.

У центра есть три источника финансирования. Первый – это государственные средства, выделенные на выполнение научных тематик госзадания, – около 700 млн рублей в год, ежегодно сумма индексируется примерно на 25 миллионов. Причём большая часть этой суммы уходит именно на зарплаты, отмечает Калачёв. Темы госзадания – это трехлетние фундаментальные исследования. В последнее время стали появляться темы госзадания, ориентированные на потребности предприятий, рассказывает директор КазНЦ. Это уже прикладные исследования, по результатам которых в дальнейшем могут начинаться работы за счёт средств предприятий. Второй источник – субсидии и гранты, которые получают в результате победы в различных конкурсах, третий – договоры с промышленными партнёрами. В совокупности второй и третий источники – это ещё около 1.3 млрд рублей ежегодно.

Что касается значимых результатов фундаментальных исследований, то их довольно много, тем более что у нас несколько научных областей. Например, химики КазНЦ успешно занимаются поиском средств для лечения онкологических заболеваний. В ходе выполнения мегагранта найдены соединения, которые обладают выраженными антиоксидантными свойствами по отношению к нормальным клеткам и одновременно оказывают деструктивное действие на опухолевые клетки. В перспективе на их основе могут быть разработаны соответствующие пре-

параты. Активно развиваются исследования в области электрохимии. Учёными разработан метод переработки углекислого газа в метан, его эффективность – 90%, что превышает мировые аналоги, отмечает Калачёв. Биологами КазНЦ обнаружены важные биологические свойства оксистеринов – малоизученных соединений, которые образуются в организме человека из холестерина. Они могут играть большую роль в лечении тяжелейших заболеваний, таких как боковой амиотрофический склероз, которым болел Стивен Хокинг. В КФТИ академик Кев Салихов предложил новую парадигму спинового обмена, которая позволяет по-новому взглянуть на многие экспериментальные результаты в этой области и активно сейчас тестируется в мире. “Список можно продолжать, и я думаю, что лучше о своих результатах расскажут наши учёные”, – добавляет Калачёв.

Появится ли в Татарстане центр академической науки?

Давно обсуждается идея создания единого центра для академической науки в РТ, даже называлась потенциальная площадка около аэропорта. Работа в этом направлении продолжается, рассказал Калачёв. “У нас подписана дорожная карта с Министерством науки и высшего образования, с Правительством Республики Татарстан и нами по созданию центра академической науки. Подписана, кстати, в феврале текущего года. Планируется, что до 2030-го данный проект должен быть реализован”, – рассказал он.

Предполагается, что в новый комплекс переедут все шесть институтов КазНЦ, которые сейчас находятся в разных зданиях, в том числе исторических. “Некоторые из зданий в плохом состоянии, требуется серьёзный капитальный ремонт. Объекты культурного наследия необходимо поддерживать – и это для нас тяжёлая история. Нужно много денег, мы не можем за собственные средства этим заниматься. В главном здании на Лобачевского, например, уже невозможно размещать научное оборудование, просто нет места, помещения не отвечают необходимым требованиям. А то, что институты расположены в разных районах города, мешает, конечно, взаимодействию наших подразделений, потому что мы централизоваться полноценно не можем, хотелось бы всех объединить до конца”, – отмечает Калачёв.

На данный момент завершается этап подбора и утверждения земельного участка. Дальше для реализации проекта необходимо будет получить федеральное финансирование. Вероятность, что всё сложится согласно плану, высокая, уверен Калачёв. “Но думаю, что сейчас ещё рано подробно об этом проекте говорить. Очень важно, что инициатива активно поддерживается Раисом Республики Татарстан Рустамом Нургалиевичем Миннихановым и президентом РАН Геннадием Яковлевичем Красниковым”, – отметил он.

Алексей Калачёв: “Когда наши учёные конкурируют с китайцами, те могут снизить цену в 10 раз”⁹

Директор КазНЦ РАН об открытиях татарстанских учёных, строительстве академгородка и будущем ИИ

“Если мы хотим, чтобы Россия вышла в лидеры по технологическим направлениям, то лидерство должно быть и в финансировании науки. В странах-лидерах на науку идёт 3–5 процентов ВВП, а в России – 1 процент. Что касается зарплаты учёных, то она должна быть конкурентоспособной”, – уверен директор ФИЦ “Казанский научный центр РАН” Алексей Калачёв, ставший гостем редакции “БИЗНЕС Online”. В ходе интернет-конференции с нашими читателями он рассказал о нынешних зарплатах учёных, приоритетных направлениях деятельности КазНЦ РАН и взаимодействии с Академией наук РТ.

– Алексей Алексеевич, Вы избраны в 2021 году директором КазНЦ РАН на пять лет, срок вашей работы истекает в 2026-м. Планируете ли ещё раз выставлять свою кандидатуру на этот пост?

– Ответ короткий: да, планирую!

– Что было сделано Вами за последние четыре года для развития центра и науки? Чего так и не удалось сделать, хотя попытки были? В чём причина неудачи?

– Считаю, успех центра, который я имею честь возглавлять, зависит от командной работы. Я во многом согласен с мнением академика Петра Капицы: “Руководить – это не мешать хорошим людям работать”. Считаю, об этом нельзя забывать. Основная задача руководителя – создать хорошие условия для работы сотрудникам и максимально способствовать тому, чтобы инфраструктура развивалась, чтобы мы выигрывали гранты, чтобы молодёжь к нам шла. И оптимизировать работу центра, чтобы всё выполнялось. В этом плане, конечно, успехи есть, но я не считаю, что это мои личные достижения.

Во-первых, с 2022 года мы существенно увеличили внебюджетное финансирование, начали получать гранты на обновление приборной базы и другие. Во-вторых, наш центр не теряет привлекательности для молодёжи с точки зрения рейтинга. Мы открыли 10 молодёжных лабораторий. Считаю, это наш успешный опыт. В-третьих, в 2022 году мы приняли пятилетнюю программу развития Казанского научного центра РАН, а в 2024-м её актуализировали.

Этот документ не является для нас обязательным, от нас его не требует ни министерство, ни академия наук. Но я считаю, что программа нужна, чтобы ставить перед собой амбициозные цели и достигать их.

В программе мы выделили четыре приоритетных направления развития: первое – разработка лекарственных средств, второе – экология промышленных городов, третье – квантовые оптические и спиновые технологии, четвёртое – агробиотехнологии. Эти направления соответствуют задачам достижения технологической безопасности и технологического лидерства. По ним у нас есть понимание, с какими индустриальными партнёрами мы работаем. И выстраивается цепочка от фундаментальных исследований к прикладным. В нашей программе развития есть широкий спектр фундаментальных исследований, есть несколько прикладных тем, а четыре приоритетных направления – это новые возможности для перехода от фундаментальных исследований к прикладным.

– Какие открытия учёных КазНЦ РАН сделаны в последние годы?

– Их много, например, академик Кев Минуллинович Салихов года три-четыре назад предложил новую парадигму спинового обмена, которая сегодня в мире активно обсуждается. Кто знает, может быть, она так и будет называться – “теория Салихова”.

– Поток уезжающих из России учёных по-прежнему велик?

– Думаю, что сейчас он заметно меньше.

– Что самое главное для того, чтобы учёные не уезжали? Не только же зарплата, наверное?

– На мой взгляд, здесь важно, как человек понимает перспективу своего развития в науке. Наука же интернациональна по своей сути. Часто бывает, что одно и то же научное открытие почти одновременно делают в разных странах. Неправильно, когда призывают не публиковаться в иностранных журналах – якобы для сохранения наших открытий. Наверное, это правильно только в отношении технологий и закрытых исследований. Но в фундаментальной науке, чем в основном и занимается наш центр, открытия нельзя скрывать, потому что ты от этого только потеряешь. Учёному важно быть первооткрывателем, первым опубликовать статью по своей теме,

⁹ “БИЗНЕС Online”. 25 мая 2025 г. Печатается с сокращениями.
<https://www.business-gazeta.ru/article/676010>.

чтобы потом на неё ссылались. Это повышает престиж и учёного, и научного сообщества страны. Поэтому не надо закрываться, а, наоборот, нужно достучаться до всех, опубликовавшись в престижных журналах, а они все международные, в основном англоязычные.

– *А когда международные журналы будут на русском языке?*

– Наверное, когда будет соответствующее финансирование науки вообще и журналов в частности. Язык международного общения в науке определяется экономикой. В советское время многие отечественные журналы вызывали большой интерес. Сегодня такого нет. Правда, издаются англоязычные версии российских журналов, и таких довольно много.

– *Они востребованы в мировом научном сообществе?*

– Например, “Успехи химических наук” и “Успехи физических наук” – известные в мире журналы с высоким рейтингом. Их переводят, читают. Если ты опубликовался в них, то можешь быть уверен, что тебя прочитали на Западе. Но не все наши журналы могут этим похвастаться. Кроме того, есть журналы, которые вообще не переводятся на английский.

– *В каком соотношении сегодня у вас фундаментальные и прикладные исследования?*

– Думаю, фундаментальных – процентов 85–90. Считаю, это наша миссия – в текущих условиях сохранить фундаментальные исследования. Были разговоры, чтобы полностью переключиться на прикладные исследования, но это неправильно!

– *Кого из татарстанских индустриальных партнёров можете назвать для примера?*

– “Татнефть”, “Татхимфармпрепараты”, “Нэфис Косметикс”, “Рацин”, “Челны-Хлеб”.

– *По тематике квантовых технологий у вас есть индустриальный партнёр?*

– Да, мы выполняем крупный проект с компанией “РЖД”, которая отвечает за реализацию дорожной карты по квантовым коммуникациям. Сегодня самые крупные проекты по квантовым коммуникациям выполняются в рамках этой дорожной карты. Казанский научный центр РАН совместно с Институтом прикладной физики РАН в Нижнем Новгороде разрабатывает квантовый повторитель – устройство для передачи квантовой информации на большие расстояния по оптоволоконным сетям. Думаю, когда-нибудь мы сможем апробировать его на

линии связи между Казанью и Нижним Новгородом, но разработка находится пока на уровне фундаментальных исследований. Это пример того, как фундаментальные исследования хорошо финансируются госкорпорацией.

Другой пример – “Росатом”, который отвечает за реализацию дорожной карты по развитию квантовых вычислений.

– *Чем будет отличаться эта линия связи?*

– По ней можно будет передавать любую информацию, как и по обычной сети, разница только в том, что ключи шифрования формируются по другим принципам. Сегодня они создаются с помощью классических компьютеров по определённым алгоритмам, поэтому системы шифрования уязвимы для квантовых компьютеров. А новые ключи шифрования генерируются с помощью квантовых состояний света в результате измерений, их невозможно перехватить, оставаясь незаметным.

– *Как продвигается проект строительства академгородка в Казани? Насколько это вообще реально?*

– Дорожная карта по созданию центра академической науки подписана в феврале этого года Министерством науки и высшего образования РФ, Правительством РТ и Казанским научным центром РАН. Проект должен быть реализован к 2030 году. В рамках центра планируется организовать три кластера: агробιοэко, физико-технический и химико-фармакологический, а также инжиниринговый центр.

– *Привлечение молодёжи в науку – принципиально важный момент. Как вы сами пришли в науку? Интерес к физике и математике был с детства?*

– Мой приход в науку был постепенным. В школьные годы я учился на Малом физфаке КГУ и ездил в летний лагерь “Квант”, но физика и математика меня не привлекали в то время, я больше был увлечён философией, читал Гегеля и другую подобную литературу. Я учился в школе № 131, по физике и математике у меня были пятёрки, но по большому счёту на физфак я пошёл только потому, что меня привлекло сообщество людей, работающих там. Будучи студентом, я был и вожатым в “Кванте”, и преподавателем на Малом физфаке. И только на старших курсах я больше увлёкся математикой и физикой. Оканчивал кафедру теории относительности и гравитации, но диплом писал по теме оптики, потому что на кафедру однажды пришёл Виталий Владимирович Самарцев, мой будущий научный руководитель и учитель, и увлёк меня своими исследованиями. Потом была аспирантура. А дальше судьба была простая – я всю жизнь проработал в Казанском физико-техническом институте имени Завойского в разных должностях.

– Как молодых людей завлечь точными науками? И кто это должен делать – родители или учителя? Может, Министерство просвещения РФ должно подобным озаботиться?

– Это вопрос актуальный, мы об этом тоже думаем, потому что задача привлечения молодёжи в науку для нас принципиально важный момент. У нас как научной организации нет подшефной школы, своих студентов. Есть только обучение в аспирантуре, а это уже последний этап подготовки научных кадров. Но мы взаимодействуем с вузами, многие наши сотрудники преподают в КФУ и других вузах, у нас есть базовые кафедры. Мы стараемся контактировать со студентами, чтобы они выполняли дипломные работы у нас, а затем поступали к нам в аспирантуру. Мы их привлекаем к научным проектам, исследованиям, они даже могут быть устроены на работу, если грант есть подходящий. У многих студентов уже есть публикации на момент защиты магистерской диссертации. И если человек склонен к науке, он остаётся у нас.

Но сегодня мы считаем, что начинать растить будущих наших сотрудников нужно со школы – больше проводить экскурсий, популярные лекции читать.

– Как ваш центр работает со школами, как популяризирует науку?

– В Татарстане по инициативе Российской академии наук создано пять базовых школ РАН. Сегодня этот проект реформируется. В базовых школах наши сотрудники читают лекции, участвуют в жюри разных конкурсов, в проведении школьных конференций. Кроме того, мы приглашаем учеников разного возраста к себе в лаборатории на экскурсии. Помню, в школьные годы я был на экскурсии в Казанском физтехе, и это отложилось в памяти. А дальше можно отслеживать талантливых школьников, куда они поступают. Может быть, организовывать для них целевое обучение. Не терять их из поля зрения.

– Какой сегодня образ учёного, как считаете? Как к вам относятся незнакомые, когда узнают, что вы учёный?

– С уважением. Когда начинаешь рассказывать, чем мы занимаемся, какие проблемы решаем, удивляются: “О, как здорово, как интересно!” Чаще всего люди открывают для себя что-то новое, общаясь с учёными. Сегодня много демонстрируют историй успеха в науке, когда молодые учёные становятся профессорами, докторами наук до 30 лет, печатаются в престижных журналах, получают большие гранты на исследования. Но не надо забывать, что это должно произрастать на фоне массового увлечения наукой. Это как в спорте – чем больше дворовых команд, тем больше успехов в профессиональном спорте.

– В Татарстане есть предприятие, где используют квантовые компьютеры?

– В республике таких предприятий нет. Некоторые крупные компании за рубежом пытаются использовать квантовые вычисления. В России тоже есть компании, заинтересованные в этом направлении, например “Газпром-нефть”. Они финансово поддерживают разработки в данной области и пытаются их применять. Но пока квантовые компьютеры ещё не дошли до уровня полномасштабных устройств, которые можно использовать на практике.

– Не дошли в России или и на Западе тоже?

– И на Западе не дошли. А мы в этом плане отстаём на несколько лет, хотя эта цифра условная, поскольку всё зависит от того, догоняем мы или пытаемся найти свои оригинальные решения. Технология квантовых вычислений активно развивается в России, появились первые демонстрации процессоров на ионах в ловушках и сверхпроводниках, есть перспективные оригинальные идеи. Однако целый ряд западных и китайских крупных компаний уже создали процессоры, содержащие порядка 100 кубитов, начали их совершенствовать и пытаются с этим сделать что-то полезное.

У нас процессоров на 100 кубитов пока нет, а когда они появятся, то на Западе, скорее всего, будут образцы уже другого уровня. Сейчас ставку делают не на количество кубитов, а на качество выполнения операций.

– Какой у нас самый большой квантовый компьютер?

– Недавно сообщалось о процессоре из 50 кубитов на основе ионов, разработанном в Физическом институте имени Лебедева РАН. В данном случае число ионов меньше 50, и каждый из них – это многоуровневая система, которая эквивалентна нескольким кубитам, – получилось 50. Тоже интересный результат и пример альтернативного подхода.

– Для каких задач может пригодиться квантовый компьютер?

– Наиболее известные задачи: поиск в больших базах данных, факторизация больших чисел, моделирование квантовых систем, задачи оптимизации. Во всех этих случаях может быть достигнуто значительное ускорение по сравнению с классическими компьютерами, какими бы мощными они ни были.

– Для примера, как можно использовать квантовый компьютер в реальном секторе экономики?

– В разработке лекарств, новых материалов, оптимизации сложных систем – везде, где требуются значительные вычисления, моделирование. При этом квантовый компьютер,

скорее всего, будет работать в паре с классическим, беря на себя самые сложные этапы расчётов.

– *Илон Маск говорит об “экзистенциальном риске” со стороны искусственного интеллекта. А Вы как к этому относитесь?*

– Я считаю, когда есть своя голова на плечах, никакой ИИ не страшен. Важно сохранить собственный интеллект или то, что называется критическим мышлением, то есть способность анализировать свои мысли и действия. Да, искусственный интеллект можно превратить и в оружие, и в инструмент подавления людей, но одновременно всегда есть возможность разработать инструменты противодействия. Пока сложно предсказать, как будут развиваться события, но на это можно повлиять и с помощью законов.

Искусственный интеллект, в принципе, простая вещь – это нейронная сеть, хорошо обученная на большой базе данных. Обучение нейронной сети похоже на обучение человека, и результаты уже впечатляют. Но я считаю, что у человека есть нечто большее, чем просто нейронные связи в голове. Например, как учёные в разных странах одновременно приходят к одним и тем же идеям? Наверное, мозг человека в этом случае больше похож на радиоприёмник. Но самое главное – самосознание. Мне кажется, что искусственный интеллект к таким вещам не способен, по крайней мере пока. Вообще, история с

ИИ интересна тем, что человек в очередной раз может понять, чем он не является, отделить себя от своих инструментов, к числу которых относится и ум. С другой стороны, человек создал искусственный интеллект, понимая, что там происходит, но, когда ИИ начнёт сам обучаться, мы уже не сможем отследить происходящее.

– *Какие вызовы сегодня стоят перед наукой?*

– Для меня важна область квантовых технологий, поскольку я этим занимаюсь. Мне кажется, там может быть много интересного в ближайшие годы. Очень перспективным направлением считаю освоение космоса. Много интересных задач в области генетических технологий, разработки лекарств. Всего не перечислишь. Ещё одна важная тема – наша авиация. У нас большая страна, без авиации жить невозможно. В этой области необходимо проводить фундаментальные исследования в поисках новых технологий.

– *О чём Вы мечтаете как учёный и как просто человек?*

– Так уж получается, что все мои мысли сосредоточены на работе. Хотелось бы, чтобы все наши задумки и начинания осуществились. Наверное, главная из них – создание центра академической науки.

Казанский научный центр РАН отметил 80-летие¹⁰

С участием Раиса Татарстана Рустама Минниханова отметили 80-летие Казанского научного центра Российской академии наук. Основанный в 1945 году как Казанский филиал Академии наук СССР, он ведёт научные исследования, совмещая фундаментальную и прикладную науку.

Учреждение сохранило и приумножило накопленный опыт выдающихся учёных и исследователей: Арбузова, Завойского, Никольского, Алемасова. Сейчас Татарстан – один из научных центров страны, известный своими научными школами.



¹⁰Телеканал “Татарстан – Новый Век”, 3 сентября 2025 г.
<https://tnv.ru/news/tatarstan/484342-80-letie-kazanskogo-nauchnogo-tsentra-ran-otmetili-s-uchastiem-minnikhanova/>

Президент Академии наук России поздравил с 80-летним юбилеем ФИЦ КазНЦ РАН¹¹

Казанский научный центр РАН бережно сохраняет уникальные научные школы. Об этом сообщил в своём поздравительном письме к юбилею центра Президент Академии наук России Геннадий Красников.

“Начало работы Казанского научного центра во многом было определено ритмом военного времени, когда великая цель защиты страны объединила людей для Победы. Тогда здесь сложилась особая творческая и научная атмосфера, где смогли продолжить свои исследования выдающиеся

учёные. Юбилейная дата символизирует большой путь, пройденный научным коллективом за эти годы. Важно, что в Казани бережно сохраняют уникальные научные школы”, – написал в письме Красников.

Он подчеркнул, что во многом благодаря Казанскому ФИЦ РАН были достигнуты высокие результаты в добыче и переработке углеродного сырья, физике, химии, исследованиях новых материалов и других областях.

Разработки, стартапы и награждение: “Неделя науки” стартовала в Казани¹²

10 стран мира, более 1000 учёных – в Казани стартовала Неделя науки, где каждый день будут обсуждать перспективные разработки, которые в дальнейшем войдут в нашу жизнь, обсудят стартапы молодых учёных и назовут имя лауреата премии имени Евгения Завойского.

Научные награды

Ленар Тагиров теперь Почётный работник науки России. Впервые опубликовал научную статью в сфере теоретической физики 30 лет назад. Сегодня его знания успешно применяются для создания нейросетей.



Ленар Тагиров: Полученная сегодня награда – это, фактически, признание, что то, что делалось раньше и было фундаментальным, сейчас становится прикладным.



Юрий Таланов в профессии уже полвека, сегодня он также стал Почётным работником науки. Под его началом молодые учёные уже не раз становились лауреатами премии имени Завойского.



Юрий Таланов: Есть и свои достижения, и много у меня учеников, они будут участвовать в двух конференциях Недели науки.

На конференциях учёные обсудят передовые лазерные технологии, сверхпроводимость в наноструктурах, современные достижения электронного парамагнитного резонанса.

¹¹Татар-информ. 3 сентября 2025 г.
<https://www.tatar-inform.ru/news/prezident-akademii-nauk-rossii-pozdravil-s-80-letnim-yubileem-kazanskii-centr-ran-5997487>

¹²23 сентября 2025 г. Корреспондент Анастасия Клишева.
<https://tnv.ru/news/kazan/488299-razrabotki-startapy-i-nagrazhdenie-nedelya-nauki-startovala-v-kazani>



А. А. Калачёв поздравляет Л. Р. Тагирова (слева) и Ю. И. Таланова (справа) с присуждением звания Почётный работник науки России.

Алексей Калачёв: “Особенностью Недели науки-2025 является то, что она проводится в международный год квантовой науки и технологий, и на наших мероприятиях будут целые секции, посвящённые квантовым технологиям”.

Лейла Фазлеева, заместитель Премьер-министра РТ: “В Казанском научном центре молодёжные лаборатории уже сегодня показывают научные результаты. Будут обсуждать стартапы студентов, которые связаны с наукой и технологиями”.

Для молодых учёных в Татарстане ежегодно выделяют до 20 млрд рублей. Они идут на научные конкурсы, стипендии и другие меры поддержки.

30 сентября состоится одно из самых важных событий – вручение премии имени Евгения Завойского. Премия вручается в 35-й раз. По статистике, каждые три года награду забирают российские учёные. Международная премия была учреждена в Казани в 1991 году, с этого времени столица Татарстана стала точкой притяжения для учёных со всего мира.

Песошин вручил замминистра образования Китая премию имени Завойского¹³

Премьер-министр РТ Алексей Песошин вручил замминистра образования Китая Цзяньфэну Ду международную премию им. Завойского за выдающиеся достижения в области магнитно-резонансной спектроскопии на основе спиновых кубитов. Церемония прошла в Академии наук РТ.

Со сцены с торжественным словом выступили академик РАН, председатель комитета по присуждению премии Кев Салихов и Алексей Пе-



¹³“БИЗНЕС Online”. 30 сентября 2025 г.
Фото: “БИЗНЕС Online”
<https://www.business-gazeta.ru/news/684127>



сошин. “Для нас вдвойне приятно, что международная комиссия в этом году избрала представителя Китайской Народной Республики. Президент России Владимир Путин и председатель КНР Си Цзиньпин объявили 2026–2027 годы перекрёстными годами образования в наших странах. Республика Татарстан не только активно участвует в действующих мероприятиях, но и предлагает

новые идеи для укрепления сотрудничества”, – заявил Песошин. После этого он поздравил лауреата и вручил ему диплом и медаль.

В свою очередь Цзяньфэн Ду рассказал, что Казань ранее уже была ему известна, однако сегодня он впервые посетил этот город. “Я не мог и подумать, что через несколько лет смогу оказаться здесь и получить премию им. Завойского”, – сказал он. Далее учёный рассказал о своём профессиональном пути, а после официальной части представил залу научную лекцию на английском языке. Причём в качестве поддержки здесь присутствовали китайские студенты.

Отметим, что претендентов рассматривал международный комитет под руководством академика Салихова. В этом году на неё претендовали 18 учёных, в том числе из России, США, Израиля и других стран. Основное условие – лауреат должен приехать на церемонию награждения. Саму премию вручили в рамках Недели науки города Казани (Kazan Science Week 2025). Она объединила сразу несколько научных конференций: “Передовые лазерные технологии”, “Сверхпроводимость в наноструктурах-2025”, “Современные достижения магнитного резонанса”, “Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий”. Мероприятия продлятся до 3 октября.

Также сегодня глава Татарстана Рустам Минниханов встретился с Цзяньфэном Ду.



На встрече стороны представили будущие проекты развития сотрудничества. Среди них – создание китайско-российского университета перспективных технологий и проведение в Казани в 2026 году XV Форума ректоров вузов ассоциации технических университетов России и Китая.

Цзянфэн Ду 56 лет. В 2000 году он получил степень доктора в Университете науки и технологий Китая. После

окончания университета остался там преподавать. С 2005 по 2007 год он был научным сотрудником Дортмундского университета в Германии. По служебной лестнице он продвинулся, став заместителем декана физического факультета в 2012-м. 28 декабря 2022 года организационный отдел Коммунистической партии Китая назначил Ду президентом Чжэцзянского университета. 25 февраля 2025-го он стал замминистра образования КНР.

Замминистра образования Китая вручили в Казани премию имени Завойского в пять тысяч евро¹³

Международную премию имени Евгения Завойского получил замминистра образования Китая Ду Цзянфэн, об этом сообщили в пресс-службе правительства республики.

Премию Ду Цзянфэн получил за достижения в разработке спин-квантовых технологий на основе магнитно-резонансной спектроскопии. Цзянфэн стал замминистра образования Китая в феврале 2025 года, до этого он активно занимался наукой. Обязательную публичную лекцию Ду Цзянфэн прочёл в Академии наук РТ на английском языке.

Премьер-министр Татарстана Алексей Песошин, вручая премию, заметил, что Татарстан не только активно участвует в действующих российско-китайских мероприятиях, но и предлагает новые идеи для укрепления сотрудничества.

Сама премия финансируется правительством Татарстана (3500 евро) и издательством Springer Verlag (1500 евро) общий размер – 5000 евро.



¹³Газета Вечерняя Казань. 1 октября 2025 г.
<https://www.evening-kazan.ru/obshchestvo/news/zamministra-obrazovaniya-kitaya-vruchili-v-kazani-premiyu-zavoyskogo-v-5-tysyach-evro>

Лауреатом премии имени Завойского 2025 года стал заместитель министра образования Китая¹⁴

В Казани вручили 35-ю Международную премию имени Е. К. Завойского¹⁵

Премия имени Евгения Завойского¹⁶

Казань

Татьяна ТОКАРЕВА

Премия имени Евгения Завойского

► В Академии наук Татарстана в рамках Казанской научной недели - 2025 вручили международную премию имени Евгения Завойского. Ее лауреатом стал заместитель министра образования Китайской Народной Республики Ду Цзяньфэн. Ученого отметили за выдающиеся достижения в области магнитно-резонансной спектроскопии на основе спиновых кубитов. Ду Цзяньфэн трудится в Китайском научно-технологическом университете в городе Хэфэй, одновременно является замминистра образования КНР. Благодаря его усилиям научное сообщество

электронного парамагнитного резонанса в Китае значительно выросло за последние десять лет. Им проведены разработки и налажен выпуск китайских ЭПР-спектрометров непрерывного действия и импульсных ЭПР-спектрометров компанией CIQTEK.

- Премия имени Евгения Завойского - высокая научная награда. Ежегодное ее вручение в Казани, городе с богатыми научными традициями, стало значимым событием в жизни мирового научного сообщества и неотъемлемой частью культурного и интеллектуального пространства Республики Татарстан, - сказал в поздравительной речи глава Правительства РТ Алексей Песошин.

Премия финансируется Правительством Республики Татарстан (3500 евро) и издательством Springer Verlag (1500 евро), общий размер - 5000 евро. Лауреат получает диплом и медаль. Обязательную публичную лекцию Ду Цзяньфэн прочел в Академии наук РТ на английском языке.

Раис Татарстана Рустам Минниханов встретился с Ду Цзяньфэном в Доме правительства. Стороны обсудили предложения к расширению двусторонних связей в области науки и образования. Среди них проект создания Китайско-российского университета перспективных технологий, также проведение в Казани 15-го Форума ректоров вузов Ассоциации технических университетов РФ и КНР в 2026 году. ■



Фото пресс-службы Правительства РТ

¹⁴<https://www.tatar-inform.ru/news/laureatom-premii-zavoiskogo-2025-goda-stal-zamestitel-ministra-obrazovaniya-kitaya-6001139>

¹⁵<https://tatarstan24.tv/news/15458.v-kazani-vruchili-35-yu-mezhdunarodnuyu-premiyu-imeni-e-k-zavoyskogo>

¹⁶ Газета Поиск, 15 октября 2025 г.

Книжная полка Алексея Калачёва¹⁷

Член-корреспондент Российской академии наук, директор Федерального исследовательского центра “Казанский научный центр РАН” Алексей Калачёв – человек очень занятой. Но найти время, чтобы углубиться в любимую книгу, считает он, – это обязательное условие для полноценной жизни. “Иногда бывает, что одна фраза в книге может мгновенно тебя изменить, – говорит Алексей Алексеевич. – И получается, что ты всю книгу прочитал, только чтобы этот момент пережить. Для меня очень важны такие моменты. Я очень благодарен тем книгам, во время чтения которых такое происходит”.



Алексей Алексеевич Калачёв

В детстве и юности на меня повлияли...

– В детстве, помню, читал Жюль Верна, Алексея Толстого. У Толстого любил “Гиперболоид инженера Гарина”, позже мне очень нравился “Пётр Первый”. А в самом раннем детстве мне очень нравилась книга Носова “Незнайка на Луне”. Я, конечно, глубину иронии автора не понимал в те годы, но было очень увлекательно. Много раз её перечитывал.

Ещё хорошо помню, что мне нравилась книжка “Легенды и мифы Древней Греции” Николая Куна. Я много раз её читал, с удовольствием погружался в мир этих мифов.

Большое удовольствие мне доставляло чтение Конан Дойля, рассказы про Шерлока Холмса.

Помимо художественных книг, уже тогда интересовало меня то, что сейчас называют научпопом. Например, серия книг Константиновского “КОАПП (Комитет охраны авторских прав природы)”. Изначально это был цикл популярных радиоспектаклей для детей о живой природе, и на их базе потом издавали книги, которые я с большим интересом листал.

И ещё одну книгу из детства назову: “По следам Робинзона” Николая Верзилина. Это такой путеводитель по выживанию в дикой природе, как бы сейчас сказали, инструкция для скаутов. Как костёр разжечь, рыбу поймать...

Когда был чуть постарше, очень любил читать трёх авторов из школьного курса классической литературы:



¹⁷Общественно-политическое издание ТАТАРСТАН. 16 декабря 2025 г.
<https://protatarstan.ru/news/knizhnaya-polka/kniznaia-polka-alekseia-kalaceva>

Льва Толстого, Шолохова и Гоголя. “Войну и мир”, помню, прочитал за пару недель. Независимо от того, понимал я тогда написанное или нет, сам язык, стиль этих авторов мне очень нравился.

Сейчас читаю...

– Сейчас, конечно, художественной литературы мало читаю, времени не хватает. Из того, что читал в последнее время, назову Алексея Тарханова, “До востребования, Париж”. Это сборник коротких зарисовок о жизни в Париже. Написано с юмором, очень легко читается. Поскольку я сам был в Париже несколько раз, мне было очень интересно.

Ещё из последних – Себастьян Хафнер, “История одного немца”. Это книга-воспоминание автора о том, как в Германии шло становление нацизма. Он был свидетелем этого. Тема важная и сложная. И, к сожалению, нас она никак не отпускает.

Конечно, научпоп удаётся читать. Тут из недавнего больше всего понравились три книги Юваля Харари: “Sapiens: Краткая история человечества”, “Краткая история будущего” и “21 урок для XXI века”. Самое там интересное – это его предсказания: как современные технологии могут повлиять на развитие человечества в будущем, на нашу социальную жизнь.

Харари сейчас многие критикуют, но написано это очень интересно, и я считаю, что это стоит почитать. Одна из центральных его идей состоит в том, что наш вид, sapiens, стал доминировать в мире благодаря тому, что мы умели гибко сотрудничать, образовывать большие группы сотрудничающих между собой людей. Мне кажется, эта идея сотрудничества очень важна.

Из последнего, что задело...

– Это книга Ирвинга Стоуна “Жажда жизни”. Роман, посвящённый Ван Гогу. О том, как он себя упорно ищет и остаётся верным своему призванию, несмотря на то что все обстоятельства против него. Очень сильная книга, я на одном дыхании её прочитал. Мне тут даже само название нравится – “Жажда жизни”. Перед многими стоит такая дилемма: либо ты живёшь комфортно и не задаёшься вопросами о том, что тебе важно, кто ты есть, для чего предназначен, либо своё предназначение продолжаешь искать до конца, несмотря ни на что. Каждый решает это по-своему. В книге Стоуна здорово описано, как человек может искать и находить себя, несмотря на все сложные обстоятельства.

Любимое

– Есть целый ряд книг, которые в разные годы по разным причинам мне очень полюбились. Они непохожи между собой, но это то, от чего остался след в душе. Это, во-первых, Ричард Бах, “Чайка по имени Джонатан Ливингстон”. Потом – Михаил Булгаков, “Мастер и Маргарита”.

У Ремарка многое люблю – это и “Триумфальная арка”, и “На Западном фронте без перемен”. Гоголь, “Мёртвые души” – одна из моих любимых книг. И Леонид Филатов, “Сказ про Федота-стрельца”.

Рекомендую!

– Что касается рекомендации, то с этим сложно. Конечно, я могу рекомендовать все те книги, что я уже перечислил. Но мне кажется, проблема в том, что сейчас сложно находить время, чтобы в спокойной обстановке сесть и не спеша почитать книгу. Поэтому главная рекомендация всё-таки – искать такие моменты, делать периодически паузу в делах, в жизни, находить время для чтения. Ну а дальше уж как пойдёт. Книг много, что-то обязательно понравится.

Периодически возвращаюсь

– Здесь я бы назвал Михаила Жванецкого, самые разные его произведения, монологи. У меня есть сборник избранного Жванецкого, люблю его перечитывать. Нравятся его настрой, язык, то настроение, которое возникает, когда его читаешь. Он меня настраивает на философский лад.

Разочаровало...

– Разочарование приходит, когда ты чего-то ждёшь и этого не получаешь. А у меня, по большому счёту, ожиданий от книг, когда я начинаю их читать, нет. Я понимаю: книга может зацепить, может не зацепить. Я не читаю до конца, если мне не очень нравится. Лучше я, может, вернусь к ней спустя какое-то время.

Что для меня значит книга

– Это в первую очередь возможность путешествия в другой мир, в другую жизнь. Когда ты читаешь, ты проживаешь какие-то обстоятельства, тебе, в общем-то, незнакомые. Путешествие может быть разным – длинным, коротким, и если оно удаётся, если книга тебя вдохновляет, то впечатление от неё у тебя в памяти остаётся на всю жизнь.

Бумажная или электронная книга?

– Это зависит от того, что и как читать. Тот же научпоп я обычно читаю в командировках, в самолётах, поездах. Здесь, конечно, электронная книга в самый раз. А если ты хочешь уютно сесть в кресло, не спеша погрузиться в чтение, то, конечно, лучше бумажный вариант. Иногда даже само качество книги, бумаги, оформление её притягательны. Хочется потрогать, полистать. Погружаешься в чтение – и это медитация какая-то, магия. Такие моменты очень ценны. Так что для меня такого выбора не стоит – бумажная или электронная. И электронная имеет место, и бумажная ценна сама по себе как культурное достояние человечества.



2025 год в цифрах

Кадры (на 31 декабря 2025 г.)

Уволены

1. Аглямев Р.Д., н.с.
2. Андреева А.И., инженер-исследователь
3. Ахмеров Р.Ф., инженер-исследователь
4. Ахметгалиева А.М., ведущий экономист
5. Гафиятуллин Л.Г., м.н.с.
6. Дудалов А.С., лаборант-исследователь
7. Жевно А.В., электромонтёр
8. Ивашкевич Т.А., вед. бухгалтер
9. Кельина Д.Д., н.с.
10. Никонова И.В., инженер-исследователь
11. Орлова М.А., лаборант-исследователь
12. Саинов Н.А., инженер-исследователь
13. Седельникова М.В., бухгалтер
14. Турайханов Д.А., н.с.
15. Чирков В.В., м.н.с.

Приняты

1. Арбузов Д.А., м.н.с.
2. Батуева Е.Е., инженер-исследователь
3. Слесарева Ю.В., лаборант-исследователь
4. Хамидуллин И.Н., м.н.с.
5. Хорольская М.В., вед. бухгалтер

Численность сотрудников

- Общая численность – 148
- Молодых сотрудников до 35 лет (включительно) – 25
- Научных сотрудников – 94
- Действительных членов РАН – 1
- Член-корреспондентов РАН – 1
- Действительных членов АН РТ – 2
- Член-корреспондентов АН РТ – 1
- Докторов наук – 21
- Кандидатов наук – 51

Средний возраст сотрудников

- Докторов наук – 64.41
- Кандидатов наук – 50.07
- Без степени – 45.76
- Общий – 51.46

Публикации

- Статьи в журналах – 126

Финансирование (в тыс. руб.)

Общий объём – 198712.36

- Субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания из федерального бюджета – 148869.93
 - на выполнение гос. задания – 148256.12
 - услуги по аспирантуре – 613.81
- Субсидии на иные цели – 894.96
 - Выплаты стипендий аспирантам – 894.96
- Целевые средства, всего – 56426.48
 - Гранты Российского научного фонда (РНФ) – 9250.00
 - Гранты АН РТ (постдоки) – 3663.75
 - Гранты Фонда науки и технологий РТ – 3512.73
- Договора НИР – 4253.00
- Договор №814/ОКЭДКСС (РЖД) – на выплату з/п исполнителям – 531.22
- Прочие поступления – 1249.50

Темы государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН, выполняемые КФТИ им. Е. К. Завойского

– “Разработка физических основ, материалов и элементной базы квантовых оптических и спиновых технологий”.
Руководитель темы: Калачёв А.А., д.ф.-м.н.

– “Физика функциональных материалов и гибридных мезоскопических структур для микроэлектроники, энергетики и информационных технологий”.
Руководитель темы: Тагиров Л.Р., д.ф.-м.н.

Проекты, финансируемые на конкурсной основе

Конкурсы Российского научного фонда (РНФ)

Аблаев Ф.М., к.ф.-м.н.: Эффективные квантовые алгоритмы для задач обработки текста и молекулярного моделирования (№ 25-11-00366)

Базаров В.В., к.ф.-м.н.: Разработка фоточувствительных материалов для инфракрасного диапазона на основе кремния с наночастицами узкозонных полупроводников (№ 24-29-00069)

Ерёмина Р.М., д.ф.-м.н.: Магнитные структуры людвигитов (№ 23-72-00047)

Камашев А.А., к.ф.-м.н.: Поиск и разработка оптимальных конструкций сверхпроводящего спинового клапана (№ 25-72-10025)

Никифоров В.Г., к.ф.-м.н.: Апконверсионные температурные наносенсоры для биологических приложений (№ 23-42-10012)

Степанов А.Л., д.ф.-м.н.: Разработка фотонных материалов на основе нанопористого германия, сформированного имплантацией ионов металлов (№ 25-29-00022)

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)

Таланов Ю.И., д.ф.-м.н.: Исследование особенностей сверхпроводимости, магнетизма и топологических эффектов в квантовых материалах (№ 21-72-20153-П)

Хадиев К.Р., к.ф.-м.н.: Эффективная реализация квантовых алгоритмов (№ 24-21-00406)

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)

Гранты Фонда науки и технологий Республики Татарстан

Гарипов Р.Р.: Разработка, создание и оптимизация функциональных полимерных композитов для применения в нефтяной промышленности: новые решения для антистатика, электрокоалесценции и снижения себестоимости производства (№ 4)

Хантимеров С.М.: Разработка и создание композитных материалов и оборудования для аддитивного производства деталей авиа- и автомобильной промышленности (№ 35)

Гранты Академии наук Республики Татарстан (подготовка докторской диссертации)

Зарипов Р.Б. (№ 65/2024-ПД)

Камашев А.А. (№ 67/2024-ПД)

Никифоров В.Г. (№ 75/2024-ПД)

Суханов А.А. (№ 82/2024-ПД)

Хантимеров С.М. (№ 88/2024-ПД)

Яцык И.В. (№ 92/2024-ПД)

Договоры

Исследование применения углеродных нановолокон ООО “Газпромнефть-Промышленные инновации” в полимерных/композиционных материалах. Договор № ГПИ-25/08000/00182/Р с ООО “Газпромнефть-Промышленные инновации” (Гарипов Р.Р.)

Разработка состава материала и изготовление экспериментально-опытной партии электропроводящих полимерных композитных стержней. Договор № 5-19-08-25 с ООО “Нефтех” (Гарипов Р.Р.)

Исследование магнитных свойств слоистых перовскитоподобных оксидов, принадлежащих к гомологическому ряду Раддлсдена-Поплера (РП) общей формулы $(\text{La}, \text{Sr})_{(n+1)}(\text{Ti}, \text{M})_n\text{O}_{(3n+1)}(\text{M}'\text{-Cu, Fe})$. Договор № 152-2025-НИР и № 153-2025-НИР с ИХТТ УрО РАН (Ерёмина Р.М.)

Измерение кинетики восстановления фотоокисленного P_{700}^+ и исчезновения анион-радикала филохинона A_1^- методом ЭПР спектроскопии в W-диапазоне. Договор № 0838-223-2025 с МГУ им. М. В. Ломоносова (НИИ ФХБ им. А. Н. Белозёрского МГУ) (Суханов А.А.)

Исследование морфологии поверхности нержавеющей стали с покрытием из аморфного кремния. Договор № 682-25-СП с АО НИЦ “ИНКОМСИСТЕМ” (Лядов Н.М.)

Разработка и оптимизация методики FGF-печати для изготовления пуансонов и матриц на основе угленаполненных пластиков. Договор № 5-НИР с ООО “Производственно-коммерческая фирма “Автокомпоненты-Трейд” (Хантимерова Ю.М.)

Оценка перспектив применения углеродных нанотрубок в системах электродвижения и теоретическая разработка эффективной методики получения электропроводников на их основе для маломощных электрических машин. Договор № 21/2025 с ООО “ЭТК” (Хантимеров С.М.)

Прочностной анализ конструкции базового и оптимизированного двигателя КАМАЗ 667 в 3D постановке. Договор № 16599/17/01130-22 с ПАО “КАМАЗ” (Садчиков Ю.В.)

Сотрудники участвовали в выполнении договора ФИЦ № 814/ОКЭДКСС с ОАО “РЖД” (Латыпов И.З.)

Публикации

1. Ablayev F.M., Salikhova N.M., Ablayev M.F.: Efficient dictionary search quantum algorithms // *Phys. Part. Nuclei* **56**, no. 4, 967–969 (2025), doi: 10.1134/S1063779625700017
2. Akhmadgaleev K.D., Rychkova I.A., Shmelev A.G., Gerasimova T.P., Litvinov I.A., Strelnik I.D., Karasik A.A.: The dual-emissive Cu_4X_4 complex with transitive octahedral to stair-step structure // *Inorg. Chem. Commun.* **182**, 115510 (2025), doi: 10.1016/j.inoche.2025.115510
3. Akhmetov M.M., Gumarov G.G., Zaripov R.B., Konygin G.N., Rybin D.S.: W-band EPR study of radicals in calcium gluconate // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics* **89**, no. 10, 1769–1773 (2025), doi: 10.1134/S1062873825713005
4. Anikeenok O.A.: Secondary quantization method with a non orthogonal basis for calculating the ground state splitting of Mn^{3+} in LaMnO_3 // *Appl. Magn. Reson.* **56**, 1727–1740 (2025), doi: 10.1007/s00723-025-01786-9
5. Bakirov M.M., Zaripov R.B., Khairutdinov I.T., Salikhov K.M.: Experimental observation of collective modes of electron spin magnetization motion in dilute solution of ^{14}N nitroxide radicals // *Appl. Magn. Reson.* **56**, 1131–1143 (2025), doi: 10.1007/s00723-025-01798-5
6. Bizyaev D.A., Nurgazizov N.I., Chuklanov A.P., Bukharaev A.A.: Stability of quasiuniform magnetization in planar Ni particles with configurational anisotropy // *Physica Status Solidi (a)* (2025), doi: 10.1002/pssa.202500908
7. Chupakhina T.I., Gyrdasova O.I., Uporova A.M., Deeva Yu.A., Likerov R.F., Yatsyk I.V., Cherosov M.A., Batulin R.G., Eremina R.M., Buldakova L.Y., Baklanova I.V., Yanchenko M.Y., Podval'naya N.V.: Precursor synthesis and photocatalytic activity of Mn-doped Sr_2TiO_4 for the oxidation of As(III) and HQ in aqueous solutions // *Materials Science and Engineering B* **323**, 118762 (2026), doi: 10.1016/j.mseb.2025.118762
8. Daminova A.G., Galeeva E.I., Rassabina F.E., Galeev R.T., Beckett R.P., Minibayeva F.V.: Melanization in the cyanolichen *Lobaria retigera*: from thallus microstructure and physicochemical properties of melanin to abiotic stress tolerance // *Fungal Biology* **130**, 101707 (2026), doi: 10.1016/j.funbio.2025.101707
9. Dayanova I.R., Kurenkov A.V., Shibetskaya E.M., Shmelev A.G., Faizullin B.A., Saitova A.M., Gerasimova T.P., Litvinov I.A., Musina E.I., Strelnik I.D., Karasik A.A., Sinyashin O.G.: Synthesis, structure, and aggregation-caused quenching (ACQ) of luminescence in dinuclear gold(I) chloride complexes with N-(2-anthracenyl)-substituted cyclic P_2N_2 -ligands // *Inorg. Chem. Commun.* **182**, 115543 (2025), doi: 10.1016/j.inoche.2025.115543
10. Dutta D., Bhattacharya T., Vagizov F., Shustov V.A., Lyadov N.M., Shestakov A., Yatsyk I.V., Ashutosh Kumar Shukla, Mamedov D.V., Eremina R.M., Amrita Bhattacharya, Tanmoy Maiti: Electronic and magnetic properties of $\text{Ba}_x\text{Sr}_{2-x}\text{TiFeO}_6$ double perovskites: A combined experimental and theoretical study // *Phys. Rev. B* **112**, 235126 (2025), doi: 10.1103/qqvw-tpgb
11. Eremin M.V., Tarasov V.F.: Effect of magnetoelectric nonreciprocity in the submillimeter EPR spectroscopy of LiYF_4 doped by $^{166}\text{Er}^{3+}$ ions // *JETP Letters* **121**, no. 6, 434–440 (2025), doi: 10.1134/S0021364024604895
12. Eremina R.M.: The Griffiths phase and its study by the EPR method // *Appl. Magn. Reson.* **56**, no. 5, 559–579 (2025), doi: 10.1007/s00723-025-01755-2
13. Faizullin B.A., Kornev T.A., Nuritdinov M.M., Kholin K.V., Nizameev I.R., Gerasimova T.P., Shmelev A.G., Nikiforov V.G., Tarasov M.V., Budnikova Y.H., Paderina A.V., Grachova E.V., Zairov R.R., Mustafina A.R.: Synthetically modified BSA-based heterometallic nanoparticles facilitating energy and/or electron transfer events // *Int.*

- J. Biol. Macromol. **321**, 146540 (2025), doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.146540
14. Falin M.L., Latypov V.A., Korableva S.L.: EPR of cubic Gd^{3+} center in Rb_2NaYF_6 single crystal at $T = 295$ K before the phase transition // Appl. Magn. Reson. (2025), doi: 10.1007/s00723-025-01812-w
15. Fazlizhanova D.I., Sinitsyn P.A., Vagizov F.G., Batulin R.G., Zinnatullin A.L., Eremina R.M.: Magnetic properties of the composite formed from $LaSr(CoFe)_{1/2}O_4$ ruddlesden-popper phase and $(LaSr)_{1/2}(CoFe)_{1/2}O_3$ perovskite // J. Supercond. Nov. Magn. **38**, no. 104 (2025), doi: 10.1007/s10948-025-06955-2
16. Gerasimova T.P., Saitova A.M., Zagidullin A.A., Shmelev A.G., Miluykov V.A., Katsyuba S.A.: Tautomerism, ionization, ESIPT and aggregation: what determines emission of hydroxypyrazinecarboxamides? // J. Mol. Liq. **437**, 128364 (2025), doi: 10.1016/j.molliq.2025.128364
17. Gumarova I.I. (Piyanzina I.I.), Burganova R., Kamashev A.A., Mamin R.F.: Magnetoelectric and spin-lattice effects in $Fe/BaTiO_3$ heterostructure: non-collinear DFT calculations // Magn. Reson. Solid. Electronic Journal **27**, no. 2, 25203 (13 pp.) (2025), doi: 10.26907/mrsej-25203
18. Ibragimova M.I., Chushnikov A.I., Yatsyk I.V., Gumarov G.G.: Two-dimensional normal distribution of zero field splitting parameters for EPR spectra of human serum transferrin // Magn. Reson. Solid. Electronic Journal **27**, no. 2, 25202 (11 pp.) (2025), doi: 10.26907/mrsej-25202
19. Ibragimova M.I., Chushnikov A.I., Yatsyk I.V., Khaibullina D.Kh., Gumarov G.G.: Identification of the signals with $g \sim 6$ in the X-band EPR spectra of human blood serum at 5–40 // Magn. Reson. Solid. Electronic Journal, **26**, no. 3, 24302 (8 pp.), (2024) doi: 10.26907/mrsej-24302
20. Kagilev A.A., Gafurov Z.N., Evdokimov A.S., Sakhapov I.F., Dobrynin A.B., Morozov V.I., Zaripov R.B., Zueva E.M., Bogomyakov A.S., Kantyukov A.O., Zhukova N.A., Sinyashin O.G., Mamedov V.A., Yakhvarov D.G.: Dinuclear nickel (II) 2,2'-bibenzimidazole bridged complexes: Synthesis, structure, magnetic, and electrochemical properties // Inorg. Chim. Acta **579**, 122555 (2025), doi: 10.1016/j.ica.2025.122555
21. Kagilev A.A., Gafurov Z.N., Mikhailov I.K., Sakhapov I.F., Kantyukov A.O., Dobrynin A.B., Morozov V.I., Zaripov R.B., Bogomyakov A.S., Babaeva O.B., Sinyashin O.G., Yakhvarov D.G.: Synthesis, structure, and magnetic properties of the binuclear cobalt complex $[Co_2(\mu-O_2PPh_2)_2(Bpy)_4](BF_4)_2$ // Russ. J. Coord. Chem. **51**, no. 8, 730–735 (2025), doi: 10.1134/S1070328425600688
22. Kalinin A.A., Shustikov A.A., Petrov D.N., Fazleeva G.M., Sharipova A.V., Gaysin A.I., Simanchuk A.E., Dobrynin A.B., Shmelev A.G., Babaeva O.B., Sharipova S.M., Vakhonina T.A., Khamatgalimov A.R., Mikerin S.L., Balakina M.Yu.: Dipole fused (azinylmethylene)-malononitrile-based chromophores with TBDPS group: increase of nonlinear optical performance of polymer films at high dopant content // Dyes and Pigments **245**, 113245 (2026), doi: 10.1016/j.dyepig.2025.113245
23. Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A., Osin A.S., Fominov Ya.V., Garifullin I. A.: Superconducting spin valve effect in $Fe/Si_3N_4/Pb/Si_3N_4/Fe$ heterostructures // Phys. Rev. B **112**, 134509 (2025), doi: 10.1103/647c-6xj4
24. Kamashev A.A., Validov A.A., Garif'yanov N.N., Bolshakov S.A., Garifullin I.A., Mamin R.F.: Influence of the piezoelectric substrate PMN-PT on the superconducting properties of $Co1/Cu/Co2/Cu/Pb$ superconducting spin valve structure // Ferroelectrics **619**, 71–79 (2025), doi: 10.1080/00150193.2024.2327961
25. Kandrashkin Yu.E.: Spin-controlled stimulated echo formed in molecular triads through photodriven quantum teleportation // J. Chem. Phys. **163**, 084103 (2025), doi: 10.1063/5.0286397
26. Kandrashkin Yu.E., Art van der Est: Spin polarization generated by reversible doublet-quartet transitions in photoexcited chromophore-radical conjugates // J. Chem. Phys. **162**, 074109 (2025), doi: 10.1063/5.0250081
27. Khairutdinov I.T., Salikhov K.M., Bakirov M.M., Zaripov R.B.: Mixed shape of EPR spectrum lines under conditions of slow spin exchange // Appl. Magn. Reson. **56**, 1145–1153 (2025), doi: 10.1007/s00723-025-01787-8
28. Khaziev R.M., Platonova E.A., Bondar O.V., Khrishtolyubova A.S., Vafina R.M., Gnezdilov O.I., Grishaev D.Yu., Pugachev M.V., Romanova E.I., Shtyrin Yu.G.: Synthesis and biological activity of vinyl derivatives of pyridoxine // Russ. J. Gen. Chem. **95**, no. 10, 3019–3032 (2025), doi: 10.1134/S1070363225604636
29. Khrizanforova V.V., Fayzullin R.R., Zaripov R.B., Gerasimova T.P., Morozov V.I., Krasovskaya E.B., Budnikova Yu.H.: Mono- and dimetallic $[Mn(CO)_3]$ complexes with the iminopyridine ligand for both hydrogen and syngas productions // ChemCatChem. **17**, no. 15 (2025), doi: 10.1002/cctc.202500078
30. Kiyamov A.G., Tayurskii D.: Vibrational properties and the lattice specific heat of an alternating iron chain structure compound $CsFeS_2$ // Phys. Solid State **67**, no. 4, 269–272 (2025), doi: 10.1134/S1063783424602339
31. Lapaev D.V., Nikiforov V.G., Shmelev A.G., Sudakova S.N., Podyachev S.N., Mustafina A.R.: Impact of intramolecular energy migration on temperature-sensitive Tb^{3+} emission in $Tb(III)$ complexes with tetra-1,3-diketone calix[4]arenes // Opt. Mater. **162**, 116845 (2025), doi: 10.1016/j.optmat.2025.116845
32. Li Zhanjun, Sukhanov A.A., Takuma Ito, Sambucari G., Xi Chen, Bussotti L., Jianzhang Zhao, Voronkova V.K., Di Donato M., Yuki Kurashige: Radical-enhanced intersystem crossing, spin dipolar interaction and electron exchange in perylenebisimide-TEMPO dyads // Pure Appl. Chem. (2025), doi: 10.1515/pac-2025-0487
33. Lunev I.V., Turanov A.N., Klimovitskaya M.A., Galiullin A.A., Zueva O.S., Zuev Y.F.: The relaxation behavior of water confined in AOT-based reverse micelles under temperature-induced clustering // Int. J. Mol. Sci. **26**, 7152 (2025), doi: 10.3390/ijms26157152
34. Mamedov D.V., Deeva Yu.A., Bazhal V.V., Chupakhina T.I., Cherosov M.A., Batulin R.G., Gavrilova T.P.:

- Thermal and thermobaric effects on magnetic properties of $\text{La}_{1.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4-\delta}$ layered perovskites // *J. Alloy and Comp.* **1042**, 183877 (2025), doi: 10.1016/j.jallcom.2025.183877
35. Mamedov D.V., Fazlizhanov I.I., Makarchenko A.S., Eremina R.M.: Transport and magnetic properties of $\text{Ba}_x\text{Sr}_{2-x}\text{FeCoO}_6$ // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics* **89**, no. 3, 357–361 (2025), doi: 10.1134/S1062873824710109
 36. Mirgazieva E.R., Larionov R.A., Ziganshina S.A., Khayarov K.R., Klimovitskii A.E., Tkachenko D.V., Burilov V.A., Babaeva O.B., Shmelev A.G., Gorbachuk V.V., Ziganshin M.A.: Solid-state cyclization of Ala–Leu and Leu–Ala dipeptides, and self-assembly and luminescent properties of the cyclic dipeptide // *Phys. Chem. Chem. Phys.* **27**, 19387–19398 (2025), doi: 10.1039/d5cp02862k
 37. Mityushkin E.O., Khasanov O.Kh., Shmelev A.G., Gataulina R.M., Likerov R.F., Leontyev A.V., Nurtdinova L.A., Zharkov D.K., Nikiforov V.G.: Efficient quantum cutting of UV solar radiation by NaGdF_4 :5% nanocrystals // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* **52**, Suppl. 7, S708–S714 (2025), doi: 10.3103/S1068335625602857
 38. Morozova A.S., Kudryavtseva E.O., Ziganshina S.A., Kurbatova N.V., Ziganshin M.A., Bukharaev A.A.: New piezoelectric materials based on Phe–Leu and Leu–Phe dipeptides // *Appl. Mater. Today* **42**, 102564 (2025), doi: 10.1016/j.apmt.2024.102564
 39. Moshkina E., Mikhachenok N., Shabanov A., Eremin E., Yatsyk I.V., Yanilkin I., Shustov V.A., Popov D.V., Eremina R.M.: Flux growth and phase transitions in $\text{Ni}_{3-x}\text{Mn}_x\text{BO}_5$:Cu compound // *J. Alloy and Comp.* **1010**, 178297 (2025), doi: 10.1016/j.jallcom.2024.178297
 40. Nasibullin I.O., Sukhanov A.A., Shmelev A.G., Litvinov I.A., Voronkova V.K., Musina E.I., Karasik A.A.: Macrocyclic tetraphosphine oxides as scaffolds for highly luminescent and thermally stable 1D manganese(II) coordination polymers // *Inorg. Chem. Commun.* **182**, 115462 (2025), doi: 10.1016/j.inoche.2025.115462
 41. Özkal Bünyamin, nora Ali Abdo Saleh Al-Jawfi, Gökhan Ekinici, Rameev B.Z., Khaibullin R.I., Sinan Kazan: Artificial synapses based on $\text{HfO}_x/\text{TiO}_y$ memristor devices for neuromorphic applications // *Nanotechnology* **36**, 025701 (2025), doi: 10.1088/1361-6528/ad857f
 42. Panariti D., Carella A., Ciuti S., Barbon A., Holzer N., Poddutoori P.K., van der Est A., Kandrashkin Yu.E., Di Valentin M.: Long-lived light-induced electron spin polarization in porphyrin triplet states and the dynamic Jahn–Teller effect // *J. Chem. Phys.* **162**, 114201 (2025), doi: 10.1063/5.0252227
 43. Pei Yuying, Sukhanov A.A., Xi Chen, Iagatti A., Doria S., Xin Dong, Jianzhang Zhao, Yanqin Li, Weijie Chi, Voronkova V.K., Di Donato M., Dick B.: The photophysics of naphthalimide-phenoselenazine electron donor-acceptor dyads: Revisiting the heavy-atom effect in thermally activated delayed fluorescence // *Chemistry – A European Journal*, **31**, e202403542 (2025), doi: 10.1002/chem.202403542
 44. Perminov N.S., Moiseev S.A.: Dynamics in a ring photonic molecule with programmable spectrum topology // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics* **89**, no. 12, 2353–2358 (2025), doi: 10.1134/S1062873825713650
 45. Perminov N.S., Shkalikov A.V.: Electrically controlled fiber-optic thermal sensor with bragg resonator // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics* **89**, no. 12, 2359–2364 (2025), doi: 10.1134/S1062873825713662
 46. Platonova E.A., Khaziev R.M., Lisovskaya S.A., Bondar O.V., Mukhametova A.D., Kazakova R.R., Vafina R.M., Grishaev D.Yu., Gnezdilov O.I., Romanova E.I., Shtyrlin Yu.G.: Synthesis and biological activity of azidomethyl derivatives of pyridoxine and 3-hydroxypyridine // *Russ. J. Gen. Chem.* **95**, no. 11, 3605–3616 (2025), doi: 10.1134/S1070363225606143
 47. Popov D.V., Batulin R.G., Cherosov M.A., Chupakhina T.I., Deeva Yu.A., Shustov V.A., Agafonov S.S., Kolkov M.I., Kurbakov A.I., Eremina R.M., Maiti T.: Magnetic phase separation in double perovskite $\text{Sr}_2\text{MnNbO}_6$ // *Mater. Chem. Phys.* **345**, 131139 (2025), doi: 10.1016/j.matchemphys.2025.131139
 48. Popov D.V., Batulin R.G., Cherosov M.A., Yatsyk I.V., Yanilkin I.V., Moshkina E.M., Gubaidullin A.T., Fazlizhanova D.I., Eremina R.M.: Spin crossover in magnetic field for Cu_2MnBO_5 :Cr // *J. Alloy and Comp.* **1040**, 183213 (2025), doi: 10.1016/j.jallcom.2025.183213
 49. Pugachev M.V., Borisov A.E., Shupletsov A.V., Sakhin V.O., Kukovitsky E.F., Kuntsevich A.Yu.: High and magnetic-field-dependent surface carriers mobility in 3D topological insulators without bulk states // *Appl. Phys. Lett.* **127**, Art. no. 193103 (2025), doi: 10.1063/5.0297373
 50. Sakhin V.O., Kukovitsky E.F., Lyadov N.M., Garif'yanov N.N., Kamashev A.A., Talanov Yu.I.: Transport study of the proximity effect of a thin superconducting film on a topological insulator $\text{Bi}_{1.08}\text{Sn}_{0.02}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$ // *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* **18**, no. 6, 1690–1694 (2025), doi: 10.1134/S1027451024701726
 51. Salikhov K.M.: Current state of the theory of spin chemistry: the spin chemistry paradigm // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics* **89**, no. 3, 323–333 (2025) doi: 10.1134/S1062873824710055
 52. Salikhov K.M.: Further development of new paradigm of the spin exchange and its manifestations in EPR spectroscopy in dilute solutions of radicals // *Appl. Magn. Reson.* **56**, 1099–1130 (2025), doi: 10.1007/s00723-025-01792-x
 53. Salikhov K.M.: Widespread model (paradigm) of spin exchange and its manifestation in EPR spectroscopy in dilute solutions of radicals // *Appl. Magn. Reson.* **56**, 1077–1097 (2025), doi: 10.1007/s00723-025-01789-6
 54. Salikhov K.M., Timmel Ch.R., McInnes E.J.L., Eaton G.R.: Preface to special issue celebration of 80 years of EPR. Part 2 // *Appl. Magn. Reson.* **56**, 1–7 (2025), doi: 10.1007/s00723-024-01738-9
 55. Seidov Z.Y., Yatsyk I.V., Shestakov A.V., Ovchinnikov A.S., Vagizov F.G., Shustov V.A., Badelin A.G., Karpasyuk V.K., Najafzade M.J., Ibrahimov I.N., Krug von Nidda

- H.-A., Eremina R.M.: Griffiths phase and magnetocaloric effect in ferromagnetic $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.9}\text{Fe}_{0.1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$ ($x = 0.05, 0.075$ and 0.1) // *J. Alloy and Comp.* **1040**, 182887 (2025), doi: 10.1016/j.jallcom.2025.182887
56. Shakhmuratov R.N., Zinnatullin A., Vagizov F.: Coherent transients with a single photon // *JETP Letters* **121**, no. 42025 (2025), doi: 10.1134/S0021364024605013
 57. Shakurov G.S., Semashko V.V., Morozov O.A.: High-frequency EPR of Ho^{3+} ion in the LaF_3 crystal // *Magn. Reson. Solids* **27**, 25301 (2025), doi: 10.26907/mrsej-25301
 58. Sharipova A.R., Batueva E., Gubaidullin A.T., Turanova O.A., Savostina L.I., Frolova E.N., Zaripov R.B., Turanov A.N.: A new Fe(III) complex of quinoline-substituted β -enaminone: Magnetic properties in solutions and molecular docking // *Inorg. Chim. Acta* **578**, 122547 (2025), doi: 10.1016/j.ica.2025.122547
 59. Shegeda A.M., Korableva S.L., Morozov O.A.: A Butterfly-shaped hysteresis in photon echo signals in pulsed magnetic fields // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics* **89**, no. 12, 2416–2420 (2025), doi: 10.1134/S1062873825713741
 60. Shestakov A.V., Belskaya N., Khrapova E., Yatsyk I.V., Batulin R., Fazlizhanov I.I., Eremina R.M., Krasilin A.: Magnetic composites obtained by H_2 treatment of $(\text{Mg,Ni})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ phyllosilicate nanoscrolls // *J. Phys. Chem. Solids* **209**, 113229 (2026), doi: 10.1016/j.jpcs.2025.113229
 61. Solodov A.N., Balkaev D.A., Shayimova J.R., Vakhitov I.R., Gataullina R.M., Zagidullin A.A., Zharkov D.K., Leontyev A.V., Shmelev A.G., Nurtidinova L.A., Nikiforov V.G., Amirova L.M., Drobyshv S.V., Saifina A.F., Gubaidullin A.T., Zhuravleva Y.I., Amirov R.R.: Enhanced wear resistance and mechanical properties of epoxy nanocomposites through surface-concentrated magnetic and luminescent graphene oxide // *Tribol. Int.* **204**, 110504 (2025), doi: 10.1016/j.triboint.2024.110504
 62. Solodov A.N., Shayimova J.R., Gataullina R.M., Zagidullin A.A., Amirov R.R., Leontyev A.V., Shmelev A.G., Nurtidinova L.A., Nikiforov V.G., Saifina A.F., Gubaidullin A.T., Ismaev I.E., Mityushkin E.O., Khannanov A., Andrianov V.V., Muranova L.N., Gainutdinov Kh.L., Khasanov O.K., Zharkov D.K.: Hydrophilization of core-shell $\text{NaYF}_4\text{:Yb/Er@NaGdF}_4\text{:Ce/Tb}$ nanostructures using polyethylenimine for multimodal imaging // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* **721**, 137183 (2025), doi: 10.1016/j.colsurfa.2025.137183
 63. Solodov A.N., Zimin K., Gataullina R.M., Zagidullin A.A., Leontyev A.V., Shmelev A.G., Nurtidinova L.A., Nikiforov V.G., Khasanov O.Kh., Amirova L.M., Tayurskii D.A., Ivanova A., Kiiamov A., Zharkov D.K.: Fluorescent polymer composites based on core-shell $\text{NaYF}_4\text{:Yb/Er@NaGdF}_4\text{:Ce/Tb}$ structures for temperature monitoring and anti-counterfeiting protection // *Opt. Mater.* **159**, 116511 (2025), doi: 10.1016/j.optmat.2024.116511
 64. Solodov A.N., Zimin K., Gataullina R.M., Zagidullin A.A., Leontyev A.V., Shmelev A.G., Nurtidinova L.A., Nikiforov V.G., Khasanov O.Kh., Amirova L.M., Tayurskii D.A., Ivanova A., Kiiamov A., Zharkov D.K.: Fluorescent polymer composites based on core-shell $\text{NaYF}_4\text{:Yb/Er@NaGdF}_4\text{:Ce/Tb}$ structures for temperature monitoring and anti-counterfeiting protection // *Opt. Mater.* **159**, 116511 (2025), doi: 10.1016/j.optmat.2024.116511
 65. Starichenko D.V., Vorob'eva V.E., Gruzdev M.S., Chervonova U.V., Ksenofontov A.A., Volegov A.S., Yatsyk I.V.: Heteroleptic β -diketonate Fe^{3+} complex: spin-crossover and optical characteristics // *Inorganics* **13**, 134 (2025), doi: 10.3390/inorganics13050134
 66. Stepanov A.L., Faizrahmanov I.A., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Rogov A.M., Kononov D. A.: Thin germanium films created by ion-assisted stimulating deposition for formation of nanoporous layers // *Appl. Phys. A* **131**, 647 (2025), doi: 10.1007/s00339-025-08773-8
 67. Stepanov A.L., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Rogov A.M., Kononov D.A.: Formation of nanoporous germanium layers by irradiation with indium ions // *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* **19**, no. 5, 1094–1100 (2025), doi: 10.1134/S1027451025701551
 68. Stepanov A.L., Rogov A.M., Sotnikova V.F., Valeev V.F., Nuzhdin V.I., Kononov D.A.: Thin-film coating with reduced optical reflectivity based on a nanoporous germanium layer // *Journal of Applied Spectroscopy*, **92**, no. 5 (2025), doi: 10.1007/s10812-025-02005-w
 69. Stepanov A.L., Rogov A.M., Valeev V.F., Nuzhdin V.I., Kononov D.A.: Antireflection optical coatings formed by implantation of Ge with In ions // *Optoelectronics and advanced materials – rapid communications* **19**, iss. 9-10, 468–471 (2025)
 70. Tang J., Sukhanov A.A., Min Wei, Xue Zhang, Jianzhang Zhao, Bernhard Dick, Voronkova V.K., Ming-De Li: Thionated coumarins: study of the intersystem crossing and the zero-field splitting of the triplet state using time-resolved transient optical and electron paramagnetic resonance spectroscopies // *Chem. Eur. J.*, e202404589, (1 of 13) (2025), doi: 10.1002/chem.202404589
 71. Timralieva A.A., Konstantinova E.A., Fionov A.V., Chumakova N.A., Zaripov R.B., Demekhin M.A., Radchenko M.E., Novikov A.S., Travin S.O., Kokorin A.I., Skorb E.V.: Barbituric acid derivative supramolecular assembly as a matrix for oxygen-sensitive photodriven formation of superoxide and carbon-centered radicals // *Chem. Phys. Lett.* **868**, 141957 (2025), doi: 10.1016/j.cplett.2025.141957
 72. Travin S.O., Salikhov K.M.: On the application of the new spin exchange paradigm to numerical modeling of EPR spectra // *Appl. Magn. Reson.* **56**, 1163–1180 (2025), doi: 10.1007/s00723-025-01793-w
 73. Ulanov V.A., Zainullin R.R., Yatsyk I.V., Likierov R.F.: Electron paramagnetic resonance in the narrow-gap semiconductor $\text{Pb}_{0.996}\text{Cu}_{0.003}\text{Mn}_x\text{Gd}_y\text{S}$: Effects of interaction between Mn^{2+} and Gd^{3+} ions with the participation of free charge carriers // *Bull. Russ. Acad. Sci.* **89**, no. 12, 2399–2406 (2025), doi: 10.1134/S1062873825713728

74. Ulanov V.A., Zaripov R.B., Yatsyk I.V., Shakurov G.S.: Structure and magnetic properties of exchange-coupled pairs $[\text{Ni}^{3+}-\text{O}]_{\text{int}}^{6-}$ in monocrystalline BaF_2 : An EPR study // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics* **89**, no. 12, 2390–2398 (2025), doi: 10.1134/S1062873825713716
75. Vagizov F.G., Zinnatullin A.L., Shakhmuratov R.N.: Transmission of information using mössbauer photons // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics* **89**, no. 10, 1714–1719 (2025), doi: 10.1134/S1062873825712930
76. Vasil'ev A.V.: Dense quantum hashing // *Phys. Part. Nuclei* **56**, no. 4, 974–977 (2025), doi: 10.1134/S1063779625700030
77. Vasilchikova T.M., Vavilova E.L.: Correlated regimes with slow dynamics in complex oxide $\text{LiMn}_2\text{TeO}_6$ // *Magn. Reson. Solid. Electronic Journal* **27**, no. 3, 25302 (12 pp.) (2025), doi: 10.26907/mrsej-25302
78. Vavilova E.L., Volkov M.Yu., Slesareva Yu.V., Astvatsaturov D.A., Chumakova N.A.: Two fractions of low mobility acetonitrile inside graphite oxide according to ^1H NMR spectroscopy // *Diamond and Related Materials* **156** 112371 (2025), doi: 10.1016/j.diamond.2025.112371
79. Wu Yanran, Bakirov M.M., Sukhanov A.A., Huaiman Cao, Jiayu Li, Sheng Liao, Jianzhang Zhao, Kandrashkin Yu.E., Voronkova V.K., Ming-De Li: Electron transfer and intersystem crossing in Bodipy dimers: Study of the photophysical properties with steady state and transient optical and electron paramagnetic resonance spectroscopic methods // *Phys. Chem. Chem. Phys.* **27**, 20013–20022 (2025), doi: 10.1039/d5cp01265a
80. Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Gabbasov B.F., Yusupov R.V., Tagirov L.R.: Temperature control of spin-wave spectra in continuously graded epitaxial Pd-Fe alloy films // *Phys. Rev. B* **111**, 094428 (2025), doi: 10.1103/PhysRevB.111.094428
81. Yatsyk I.V., Popov D.V., Likerov R.F., Batulin R.G., Cherosov M.A., Khusanzyanov A.V., Eremina R.M.: Magnetic properties of high entropy compound $\text{Ca}_{0.25}\text{Sr}_{0.5}\text{La}_{0.25}\text{Mn}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$ // *Magn. Reson. Solid. Electronic Journal* **27**, no 3, 25303 (11 pp.) (2025) doi: 10.26907/mrsej-25303
82. Ye K., Sukhanov A.A., Yu Pang, Mambetov A.E., Minjie Li, Liyuan Cao, Jianzhang Zhao, Voronkova V.K., Qian Peng, Yan Wan: Time-resolved transient optical and electron paramagnetic resonance spectroscopic studies of electron donor–acceptor thermally activated delayed fluorescence emitters based on naphthalimide–phenothiazine dyads // *Phys. Chem. Chem. Phys.* **27**, 813–823 (2025), doi: 10.1039/d4cp03629h
83. Yurtaeva S.V., Yafarova G.G., Yatsyk I.V., Rodionov A.A., Iyudin V.S., Gainutdinov Kh.L.: Electron magnetic resonance signals in spinal cord tissues of rats // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics* **89**, no. 10, 1829–1836 (2025), doi: 10.1134/S1062873825713078
84. Yurtaeva S.V., Yatsyk I.V., Fakhrutdinov A.R., Valieva A.I., Akulov A.N., Rummyantseva N.I.: Magnetic resonance signals arising during intensive division of fagopyrum tataricum callus cells and their orientation behavior // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics* **89**, no. 10, 1760–1768 (2025), doi: 10.1134/S1062873825712991
85. Yuying Pei, Sukhanov A.A., Xi Chen, Sambucari G., Bussotti L., Xin Liu, Jianzhang Zhao, Yanqin Li, Yanping Huo, Voronkova V.K., Huimin Guo, Di Donato M.: Study of the thermally-activated delayed fluorescence (TADF) mechanism of phenothiazine–dibenzothiophene-S,S-dioxide electron donor-acceptor dyads using steady-state and time-resolved optical and electron paramagnetic resonance spectroscopies // *Chem. Sci.* **16** (42), 19737–19751 (2025), doi: 10.1039/d5sc03644e
86. Zainullin R.R., Ulanov V.A., Yatsyk I.V., Kalimullin R.I., Potapov A.A.: Possible electronic states of gadolinium impurity centers in $\text{Pb}_{1-x}\text{Gd}_x\text{S}$ narrow-gap semiconductor: electron paramagnetic resonance data // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics* **89**, no. 12, 2407–2415 (2025), doi: 10.1134/S106287382571373X
87. Zaripov R.B., Kandrashkin Yu.E.: Rotational mobility of $\text{Sc}_2\text{C}_{80}\text{CH}_2\text{Ph}$ studied by EPR spectroscopy // *INEOS OPEN – Journal of Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of the Russian Academy of Sciences* **8** (1-3), 80–81 (2025), doi: 10.32931/io2528a
88. Zaripov R.B., Tarasov V.F., Ulanov V.A.: Magneto-electric spin resonance of $^{63}\text{Cu}^{2+}$ dimer associates in a BaF_2 single crystal // *JETP Letters* **121**, no. 1, 47–52 (2025), doi: 10.1134/S0021364024604214
89. Zaripov R.B., Bakirov M.M., Khairutdinov I.T., Salikhov K.M.: Confirmation of the spin exchange paradigm in diluted solution of nitroxide radical: Spin polariton formation // *Appl. Magn. Reson.* **56**, 1155–1161 (2025), doi: 10.1007/s00723-025-01797-6
90. Zaripov R.B., Khairutdinov I.T., Tarasov V.F., Kandrashkin Yu.E.: A new anticrossing region of monoisotopic impurity ^{53}Cr ions in Y_2SiO_5 // *J. Mag. and Mag. Mat.* **622**, 172956 (2025), doi: 10.1016/j.jmmm.2025.172956
91. 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 rats // *Bull. Exp. Biol. Med.* **178**, no. 3 (2025), doi: 10.1007/s10517-025-06326-w
92. Zhang Xue, Ziqian Xu, Sukhanov A.A., Xichuan Yang, Ayhan Elmali, Jianzhang Zhao, Dick B., Karatay A., Voronkova V.K.: Charge separation and intersystem crossing in compact, orthogonal and sterically encumbered 6,12-diphenyl indolo[3,2-b]carbazole-naphthalimide electron donor–acceptor dyad // *Org. Chem. Front.* **12**, 3344–3362 (2025), doi: 10.1039/d4qo02267j
93. Zinnatullin A., Shakhmuratov R.N., Vagizov F.: Information transmission by random flow of gamma-photons: optimization of data-acquisition time // *Laser Phys. Lett.* **22**, 015207 (4 pp.) (2025), doi: 10.1088/1612-202X/ad9d26
94. Асатрян Г.Р., Шакуров Г.С., Малкин Б.З., Батуева А.В., Петросян А.Г.: Широкополосная ЭПР-спектроскопия и кристаллическое поле центров Ho^{3+} в YAlO_3 //

- ФТТ **67**, вып. 6, 1027–1033 (2025), doi: 10.61011/FTT.2025.06.60951.145-25
95. Ахмеджанов Р.А., Балега Ю.Ю., Деев А.Д., Калачёв А.А.: Квантовые повторители: актуальные направления исследований и последние достижения // УФН **195**, № 9, 909–938 (2025), doi: 10.3367/UFNr.2025.05.039918
96. Базаров В.В., Бегишев Е.М., Валеев В.Ф., Вахитов И.Р., Гумаров А.И., Зиннатуллин А.Л., Киямов А., Лядов Н.М., Нуждин В.И., Хайбуллин Р.И.: Высоко-температурный ферромагнетизм в эпитаксиальной плёнке TiO_2 , имплантированной ионами кобальта при повышенной температуре // Письма в ЖТФ **51**, вып. 8 (2025), doi: 10.61011/PJTF.2025.08.60157.20155
97. Баталов Р.И., Базаров В.В., Бегишев Е.М., Лядов Н.М., Новиков Г.А., Ликеров Р.Ф., Подлесных И.М., Симакин С.Г.: Физические основы микро- и нанотехнологий и оптоэлектроники // Автометрия **61**, № 6, 5–14 (2025), doi: 10.15372/AUT20250601
98. Бережной А.Д., Калачёв А.А.: Квантовая память с интерфейсом на основе частотного преобразования // Письма в ЖЭТФ **122**, вып. 12, 865–870 (2025), doi: 10.7868/S3034576625120251
99. Бухараев А.А., Бизяев Д.А., Нургазизов Н.И., Чукланов А.П.: Влияние термоиндуцированного магнитоупругого эффекта на переключение намагниченности в Ni-частицах с конфигурационной анизотропией // Письма в ЖТФ **51**, вып. 3 (2025), doi: 10.61011/PJTF.2025.03.59810.20055
100. 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 (2025), doi: 10.61011/FTT.2024.11.59317.281
101. Горюнов Ю.В.: Необычные валентные состояния примесей в дираковском полуметалле // Вестник технологического университета **28**, № 2 (2025), doi: 10.55421/3034-4689_2025_28_2_18
102. Зарипов Р.Б., Хайрутдинов И.Т., Машковцев Р.И.: Релаксация электронных спинов азотных центров в структурных каналах кристалла берилла // ФТТ **67**, вып. 5, 840–844 (2025), doi: 10.61011/FTT.2025.05.60748.65-25
103. Киямов А.Г., Кузнецов М.Д., Тагиров Л.Р., Хеммида М., Х.-А. Круг фон Нидда, Кройтори Д., Сеидов З.Ю., Цуркан В., Таюрский Д.А.: Предсказание металлической проводимости квазиодномерного антиферромагнетика RbFeSe_2 в рамках теории функционала плотности и экспериментальное исследование его свойств при деградации на воздухе // Учён. зап. Казан. ун-та. Сер. физ.-мат. науки **167**(4), 1–14 (2025), doi: 10.26907/2541-7746.2025.4.1-14
104. Куковицкий Е.Ф., Львов С.Г., Шустов В.А., Файзрахманов И.А.: Периодические углеродные структуры на поверхности металлического никеля // Физика металлов и металловедение **126**, № 6, 729–736 (2025), doi: 10.31857/S0015323025060111
105. Лобаев М.А., Радищев Д.Б., Вихарев А.Л., Горбачёв А.М., Богданов С.А., Исаев В.А., Кукушкин В.А., Краёв С.А., Охалкин А.И., Архипова Е.А., Демидов Е.В., Дроздов М.Н., Хайбуллин Р.И.: Электролюминесценция центров окраски германий – вакансии в алмазном p–i–n-диоде // Письма в ЖТФ **51**, вып. 8 (2025), doi: 10.61011/PJTF.2025.08.60154.20158
106. Митюшкин Е.О., Солодов А.Н., Шмелёв А.Г., Ликеров Р.Ф., Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Жарков Д.К., Галяметдинов Ю.Г., Никифоров В.Г.: Влияние отжига на спектральное преобразование ультрафиолетового излучения люминофором $\text{YVO}:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}_4^{3+}$ для повышения эффективности солнечных элементов // Вестник технологического университета **28**, № 9 (2025), doi: 10.55421/3034-4689_2025_28_9_20
107. Наумов А.К., Целищева Е.Ю., Целищев Д.И., Аглымов Р.Д.: Влияние допирования ионами Ce^{3+} на центры окраски в кристалле KY_3F_{10} , индуцированные рентгеновским излучением // Оптика и спектроскопия **133**, вып. 8 (2025), doi: 10.61011/OS.2025.08.61509.5882-24
108. Новиков Г.А., Баталов Р.И., Файзрахманов И.А., Шустов В.А., Симакин С.Г., Галкин К.Н., Байдакова Н.А.: Оптоэлектронные свойства сильно легированных слоёв Ge:Sb , полученных ионно-пучковыми методами // Оптика и спектроскопия **132**, вып. 11, 189–1195 (2025), doi: 10.61011/OS.2024.11.59509.7119-24
109. Нургазизов Н.И., Бизяев Д.А., Чукланов А.П., Бухараев А.А.: Влияние латеральных размеров и одноосных механических напряжений на доменную структуру планарных Ni-микрочастиц // Физика металлов и металловедение **126**, № 10, 1104–1110 (2025), doi: 10.7868/S3034621525100025
110. Нуртдинова Л.А., Леонтьев А.В., Митюшкин Е.О., Бизяев Д.А., Нургазизов Н.И., Чукланов А.П., Косач П.А., Зверев Д.Г., Никифоров В.Г.: Особенности люминесцентной томографии апконверсионных люминофоров с дискретным распределением // ЖТФ **95**, вып. 10, 1852–1860 (2025), doi: 10.61011/JTF.2025.10.61338.67-25
111. Перминов Н.С., Моисеев С.А.: Топология спектра и динамика в кольцевой фотонной молекуле // Математические методы в технологиях и технике № 9 (2025)
112. Перминов Н.С., Шкаликов А.В.: Интраволоконный оптический термосенсор с модулирующей брэгговской решёткой // Математические методы в технологиях и технике № 8 (2025)
113. Пугачев М.В., Хамзин Т.А., Свинцова И.И., Хазиев Р.М., Агафонова М.Н., Бондарь О.В., Гнездилов О.И., Штырлин Ю.Г.: Синтез и противоопухолевая активность β -глюкозидов, содержащих фрагменты производного пиридоксина и 4-метилбензойной кислоты // Изв. РАН: Сер. хим. **74**, № 5, 1451–1466 (2025), doi: 10.1007/s11172-025-4641-3
114. Салихов К.М.: Вызовы квантового будущего // Наука и технологии Сибири № 3, 16–19 (2025)
115. Салихов К.М.: Современное состояние теории спиновой химии: парадигма спиновой химии // Изв.

- РАН: Сер. физ. **89**, № 3, с. 6–17 (2025), doi: 10.1134/S1062873824710055
116. Соловаров Н.К.: Сепарабельность, скрытые параметры и квантовая коррелированность пар ЭПР (Эйнштейна–Подольского–Розена)–Бомы–Белла // ЖЭТФ **168**, вып. 6 (12), 772–779 (2025), doi: 10.7868/S3034641X25120045
 117. Степанов А.Л., Рогов А.М., Сотникова В.Ф., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Коновалов Д.А.: Формирование дифракционной решётки на основе нанопористого германия имплантацией ионов висмута // Письма в ЖТФ **51**, вып. 17 (2025), doi: 10.61011/PJTF.2025.17.60975.20357
 118. Степанов А.Л., Файзрахманов И.А., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А., Рогов А.М.: Формирование слоёв нанопористого германия на тонких плёнках, полученных методом ионно-стимулированного осаждения // Письма в ЖТФ **51**, вып. 10 (2025), doi: 10.61011/PJTF.2025.10.60333.20257
 119. Сулейманов Н.М., Базаров В.В., Лядов Н.М., Файзрахманов И.А., Шустов В.А.: Структурные и оптические свойства углерод-палладиевых нанокompозитных плёнок, синтезированных методом ионного распыления // Журнал прикладной спектроскопии **92**, 1 (2025), doi: 10.1007/s10812-025-01880-7
 120. Фаррахов Б.Ф.: Микроструктуры на поверхности кремния для повышения эффективности солнечных элементов, сформированные мощным световым импульсом // Учён. зап. Казан. ун-та. Сер. физ.-матем. науки **167**, кн. 4, 1–9 (2025), doi: 10.26907/2541-7746.2025.4.1-9
 121. Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Коновалов Д.А., Одиванов В.Л., Шагалов В.А., Баязитов А.А., Баширов Ф.В., Маркосян В.А., Водовозов В.М., Павленко А.В., Курунов Р.Ф., Баев В.М., Кулешов М.В., Еремкин В.В., Батурина А.А., Сирко М.С.: Разработка оборудования и методик для магнитно-резонансной томографии лёгких лабораторных животных с применением гиперполяризованного ^{129}Xe // Письма в ЖТФ **51**, вып. 22 (2025), doi: 10.61011/PJTF.2025.22.61585.20392
 122. Фаттахова М.Я., Баязитов А.А., Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Красножен В.Н., Ахатов А.Ф., Бекмачева Е.С.: Диагностика и восстановление голосовой функции пациентов с применением спектрального анализа голоса и магнитно-резонансной томографии // Изв. РАН: Сер. физ. **89**, № 10, 1652–1660 (2025), doi: 10.1134/s106287382571308x
 123. Хантимеров С.М., Гарипов Р.Р., Бизяев Д.А., Лядов Н.М., Сулейманов Н.М.: Особенности визуализации распределения углеродных нанотрубок в полимерных средах с помощью атомно-силовой микроскопии // Письма в ЖТФ **51**, вып. 22 (2025), doi: 10.61011/PJTF.2025.22.61582.20379
 124. Шапошникова Т.С., Мамин Р.Ф.: Магнитоэлектрические свойства ферромагнитных частиц цилиндрической формы // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования № 1, 71–77 (2025), doi: 10.31857/S1028096025010102
 125. Шахмуратов Р.Н., Зиннатуллин А., Вагизов Ф.Г.: Оптимизация передачи информации с помощью случайного потока одиночных фотонов гамма-излучения // Письма в ЖТФ **51**, вып. 8 (2025), doi: 10.61011/PJTF.2025.08.60165.20187
 126. Шегеда А.М., Ерёмин М.В., Кораблева С.Л.: Усиление фотонного эха магнитными импульсами в $\text{LuLiF}_4:\text{Er}^{3+}$ и $\text{YLiF}_4:\text{Er}^{3+}$ // Письма в ЖЭТФ **122**, вып. 11, 746–752 (2025), doi: 10.31857/S0370274X25120061

Защиты, награды

Кандидатскую диссертацию защитила

- Гафарова Альбина Разитовна (руководитель: Гумаров Г.Г., к.ф.-м.н.)

“Конформации солей глюконовой кислоты в условиях гамма-облучения и механохимической обработки по данным ЭПР и квантовой химии”

1.3.11 – 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Докторскую диссертацию защитили:

- Камашев Андрей Андреевич

“Экспериментальное исследование сверхпроводящих спиновых клапанов”

1.3.8. Физика конденсированного состояния

- Никифоров Виктор Геннадьевич

“Лазерное управление низкочастотной динамикой и процессами переноса энергии в молекулярных изотропных средах”

1.3.6. Оптика

Премия им. М. Л. Блатта (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН) присуждена Хисамову Артуру Рауфовичу, руководителю отдела информационной безопасности, телекоммуникационных и сетевых технологий

Участие сотрудников института в преподавательской деятельности

В 2025 году сотрудники КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, помимо основной научно-исследовательской работы, занимались преподавательской деятельностью в различных вузах г. Казани, где читали следующие учебные курсы:

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

Гарипов Р.Р., доцент каф. теоретических основ электротехники КГЭУ

- Программное обеспечение и программирование в профессиональной деятельности

Ерёмина Р.М., профессор каф. общей физики Института физики КФУ

- Оптика
- Электричество и магнетизм
- Новые магнитные материалы

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

- Компьютерное моделирование молекулярных систем
- Физика жидкости
- Введение в профессиональную деятельность
- Компьютерное моделирование межмолекулярных взаимодействий
- Подготовка и оформление кандидатской диссертации к защите

Суханов А.А., ст. преподаватель каф. медицинской и биологической физики с информатикой и медицинской аппаратурой КГМУ

- Медицинская электроника

Туранов А.Н., профессор каф. медицинской физики Института физики КФУ

- Медицинская физика
- Медицинская электроника

Туранова О.А., ассистент каф. медицинской физики 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 2025 году у ФИЦ КазНЦ РАН появились исключительные права на шесть объектов интеллектуальной собственности, созданных в КФТИ: одно изобретение, пять программ для ЭВМ:

1. Изобретение “Оптическая дифракционная периодическая микроструктура на основе пористого германия и способ её изготовления”.
Патент Российской Федерации № 2853780, приоритет 28.07.2025, опубликовано 26.12.2025.
Авторы Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А., Рогов А.М.
2. Программа для ЭВМ “Модуль импульсной программы МРТ для быстрого получения изображений”.
Свидетельство № 2025611459 о государственной регистрации приоритет 24.12.2024, опубликовано 20.01.2025
Авторы Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Баязитов А.А.
3. Программа для ЭВМ “Модуль импульсной программы МРТ для получения томографических изображений нескольких слоёв”.
Свидетельство № 2025611922 о государственной регистрации, приоритет 24.12.2024, опубликовано 23.01.2025
Авторы Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Баязитов А.А.

4. Программа для ЭВМ “Программный модуль измерения амплитудно-частотной характеристики приёмного контура”
Свидетельство № 2025695845 о государственной регистрации, приоритет 15.12.2025, опубликовано 15.12.2025
Авторы Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Баязитов А.А.
5. Программа для ЭВМ “Программный модуль для автоматической настройки частоты синтезатора на резонанс”.
Свидетельство № 2025697712 о государственной регистрации, приоритет 15.12.2025, опубликовано 26.12.2025
Авторы Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Баязитов А.А.
6. Программа для ЭВМ “Программный модуль для реализации возможности накопления данных с переменной фазой возбуждения”.
Свидетельство № 2025697785 о государственной регистрации, приоритет 15.12.2025, опубликовано 26.12.2025
Авторы Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Баязитов А.А.



Конференции, организованные КФТИ и при участии КФТИ

1. Международная онлайн конференция SPIN-2025: Спиновый обмен: переход к новой парадигме. 17–20 июня 2025. Организатор: Кев Минуллинович Салихов, академик РАН, Научный руководитель КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, руководитель Центра развития научной методологии при ФИЦ КазНЦ РАН.
2. Kazan Science Week 2025. 22 September – 03 October 2025. The Kazan Science Week included the 32nd International Conference Advanced Laser Technologies, the Zavoisky Award 2025 ceremony, the annual International Conference “Modern Development of Magnetic Resonance 2025”, the International Conference “Superconductivity in nanostructures 2025” and the International youth scientific schools “Coherent optics and optical spectroscopy 2025” and “Actual problems of magnetic resonance and its applications”. Kazan Science Week was supported by: Russian Academy of Sciences, Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Government of the Republic of Tatarstan, Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Ministry of Education and Science of the Republic of Tatarstan, Federal Research Center “Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, Prokhorov General Physics Institute of RAS (GPI RAS), Lomonosov Moscow State University, Kazan Federal University, Moscow Institute of Physics and Technology, National Research Nuclear University MEPhI, ELEMENT company, AVESTA company, Special Systems Fotonics company, Centre of Technical Support “NAUKA”, SLS Prime Technology company, Solar Lazer Systems company, LLS company, Lacopa company.
2. Итоговая конференция КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, 4 февраля 2026 года (устная сессия) и 14 февраля 2026 года (стендовая сессия).

Kazan Science Week 2025. International Conference “Modern Development of Magnetic Resonance”, September 29 – October 03, 2025, Kazan, Russia

MONDAY, September 29, 2025

Opening ceremony

Plenary lectures

Chair: S. Khantimirov

Sergey Demishev: New type of griffiths phase with enhanced ferromagnetic interaction. The breaking of the universal paradigm

Elena Bagryanskaya: EPR in living cells using spin labels based on triarylmethyl and nitroxide radicals

Session: Chemical and Biological Systems

Chair: A. Sukhanov

Invited Talks

Daniella Goldfarb: Spin dynamics and orientation selection in Gd(III)-¹⁹F electron-nuclear double resonance

Sergei Dzuba: Nanoscale structures in model phospholipid biomembranes probed by pulsed dipolar EPR spectroscopy

Yang Haijun: Changes of serum albumin function in cirrhotic patients studied by EPR

Session: Low-Dimensional Systems, Nano-Systems and Molecular Magnets

Chair: A. Kamashev

Invited Talks

Anastas Bukharaev: Full 180° magnetization reversal of planar Ni microparticles without magnetic field

Olga Volkova: WBr₅: a novel layered ferromagnet for future spintronic applications

Evgeniy Altynbaev: Complementarity of EPR and neutron scattering techniques in the study of long-period chiral magnets

Oral Talks

Egor Alakshin: Synthesis, self-assembly and magnetic properties study of rare-earth ions trifluoride

Adeliya Garaeva: Magnetic properties of micro-sized and nanosized PrF₃ powders

Vasiliy Glazkov: Magnetic ordering in the decorated square kagomé lattice magnets

*Session: Magnetic Resonance Imaging and Applications in Medical Physics**Chair: R. Yusupov*

Invited Talk

Hiroshi Hirata: Recent technical advances in EPR spectroscopic mapping for mouse tumor models

Oral Talk

Yahya Fattakhov: Magnetic resonance imaging of laboratory animals lungs using hyperpolarized ^{129}Xe *Session: Low-Dimensional Systems, Nano-Systems and Molecular Magnets**Chair: R. Eremina*

Oral Talks

Ke Xu: Low-field, high-speed MAS solid-state NMR technology enables high-resolution detection of paramagnetic materials

Dmitrii Astvatsaturov: Ethanol inside graphene oxide membranes – spin probe technique investigation

Timofei Soldatov: Crossover spin-3/2–pseudospin-1/2 in spin-chain antiferromagnet Cs_2CoCl_4 *Session: Defects and Spin Qubits**Chair: Yu. Kandrashkin*

Invited Talk

Sandra Eaton: Orientation and host dependence of spin-lattice relaxation times for oxo-vanadium porphyrins

Oral Talk

Sergey Vasil'ev: Lindblad dephasing relaxation and quantum entanglement in two-spin systems

TUESDAY, September 30, 2025

*Plenary lectures**Chair: L. Tagirov*

Sergey Nikitov: Antiferromagnetic spintronics and magnonics

Matvey Fedin: EPR of nanoporous materials: new applications

Andrey Chazov: The newest players of magnetic resonance market from Asia: latest developments in EPR, brand new high-field and affordable cryo-free NMR from China (sponsors' presentation)

*Session: Chemical and Biological Systems**Chair: E. Konstantionova*

Oral Talks

Vladimir Koshman: Interaction of thiosemicarbazones with a model lipid membranes: NMR and molecular dynamics simulations

Ekaterina Kytina: Effect of spin centers on photoluminescence in porous aluminum oxide synthesizing in organic acids

Margarita Sadovnikova: Effect of rare earth dopants on the structural features of calcium phosphate-based materials by EPR spectroscopy

*Session: Low-Dimensional Systems, Nano-Systems and Molecular Magnets**Chair: A. Smirnov*

Invited Talk

Alexander Vasiliev: Diverse magnetic chains in inorganic compounds

Oral Talk

Rushana Eremina: Magnetic properties of $\text{Ca}_2\text{CoNbO}_6$ *Zavoisky Award Ceremony**Zavoisky Awardee 2025 Lecture*

Jiangfeng Du: Electron spin resonance from spin ensemble to single spin

WEDNESDAY, October 1

Social Program

THURSDAY, October 2

*Plenary lectures**Chair: S. Demishev*

Kev Salikhov: Nuclear hyperpolarization in electron transfer in chiral systems

Alexander Smirnov: Spin excitations in ordered XXZ-chain system Cs_2CoCl_4 *Plenary lectures**Chair: E. Bagryanskaya*

Tatyana Polenova: Magnetic resonance and integrative structural biology, outside and inside mammalian cells

Gareth Eaton: Comparison of electron spin relaxation and pulse turning angles of lanthanide complexes with differing coordination number

*Session: Chemical and Biological Systems**Chair: A. Yurkovskaya*

Invited Talks

Jianzhang Zhao: Study of the triplet state of chromophores containing thionated carbonyl groups with time-resolved electron paramagnetic resonance spectra: large zero field splitting (ZFS)

Andrey Sukhanov: Inversion of electron spin polarization in organic chromophores. Time-resolved EPR study

Oral Talks

Yulia Motygina: Invited Talk Intramolecular distances and excluded volume: simultaneous analysis of DEER traces in a model biradical

Maiya Ulyanova: Study of weak non-covalent interactions of quinone derivatives with GMP and oligonucleotides by NMR and CIDNP techniques

Ivan Zhukov: Modeling of cidnp field dependence for molecular donor-acceptor compounds

Session: Strongly Correlated Electron Systems

Chair: V. Glazkov

Invited Talks

Evgeniia Vavilova: Spin chains with non-magnetic defects: NMR studies

Vasily Shaginyan: Scaling behavior of superconductors

Roman Yusupov: EPR and optical spectra, and double-loop magnetic hysteresis of $\text{SrY}_2\text{O}_4\text{:Dy}$ crystals

Oral Talks

Sofia Gotovko: Low-frequency dynamics of LiCu_3O_3 – a strongly depleted antiferromagnet

Vadim Tumanov: Critical temperature and order parameter modulation in superconducting heterostructures with domain-structured ferromagnets

Session: Spin-Based Information Processing and Optical Quantum Technologies

Chair: V. Shaginyan

Invited Talks

Sergey Travin: On the new paradigm for describing the shape of EPR spectra lines

Yury Bunkov: New mechanism of coherent photons emission

Oral Talks

Yuri Kandrashkin: Influence of nuclear spin on the Rabi frequency of erbium ions doped in a YLiF_4 single crystal

Aleksey Akimov: Coherent spectroscopy on NV center on invisible transition

Session: Strongly Correlated Electron Systems

Chair: E. Vavilova

Oral Talks

Aleksei Shestakov: EPR evidence of high-temperature magnetic transitions in noncentrosymmetric ternary carbide GdCoC_2

Georgy Nikolaev: Current-induced g-factor tuning in zinc oxide-based heterostructures

Session: Modern Methods of Magnetic Resonance

Chair: V. Voronkova

Invited Talk

Nail Suleimanov: Echo phenomena in spin spectroscopy

Oral Talk

Alexey Kiryutin: ^{77}Se SABRE via tandem scalar coupling: first parahydrogen-induced hyperpolarization of selenium

Poster session

FRIDAY, October 3

Plenary lecture

Chair: S. Dzuba

Alexandra Yurkovskaya: High resolution NMR and nuclear spin hyperpolarization with fast field cycling

Session: Chemical and Biological Systems

Chair: S. Travin

Invited Talks

Elizaveta Konstantionova: Features of paramagnetic centers in nanosized porous aluminum oxide

Alexander Kokorin: Spatial organization of polymer-metal coils in liquid solutions: Spin exchange titration

Oral Talks

Sergei Dementev: EPR spectroscopy for biostability assessment of metallodrug complexes

Roman Podarov: Water-soluble fullerenes as spin labels for dipolar EPR spectroscopy

Kirill Sannikov: NMR of liquid ^{129}Xe in porous media near triple point

Session: Low-Dimensional Systems, Nano-Systems and Molecular Magnets

Chair: N. Suleimanov

Oral Talks

Kirill Tsiberkin: Dynamics of classical magnetic moments after a few T_2 : manifestation of collective modes

Vladimir Zhaketov: Polarized neutron reflectometry with oscillating magnetic field

Ekaterina Kovycheva: Spin dynamics of disordered structures and one-dimensional chains

Denis Saritsky: Analysis of EPR spectra of NASICON:Fe^{3+} considering the distribution of fine structure parameters

Amina Faskhutdinova: Ab initio magnetic properties simulation of nanoparticles based on ReF_3 and LiReF_4 , (Re = Tb, Dy, Ho)

Vladimir Ulanov: Very strong concentration dependence of Mn^{2+} and Gd^{3+} EPR spectra parameters in $\text{Pb}_{0.995}\text{Cu}_{0.003}\text{Gd}_x\text{Mn}_y\text{S}$ semiconductors

Session: Chemical and Biological Systems

Chair: A. Kokorin

Invited Talks

Vitaly Volkov: NMR of polymeric electrolytes for lithium batteries

Anatoly Vanin: Why, when there is oxygen in the tissues as a possible oxidizer of nitric oxide, the latter is preserved in the body of animals and humans, exercise a various physiological effect on it?

Oral Talks

Khalil Gainutdinov: EPR study of the content of nitric oxide and copper in the liver of rats after modeling combined brain and spinal cord injuries

Margarita Arbuzova: Lipid-mediated effect of saponin β -escin on the localization of the transmembrane domain of e protein of SARS-COV-2

Session: Advances in Magnetic Resonance Theory and Instrumentation

Chair: R. Zaripov

Oral Talks

Ilnaz Fairushin: Self-consistent relaxation theory of collective dynamics in Yukawa and Coulomb liquids

Ivan Frolov: Recombination operator model construction
 Artem Tsygankov: Quasi-stable structures in liquid antimony: DFT analysis
 Daniil Popov: Spin-crossover in $\text{Cu}_2\text{MnBO}_5\text{:Cr}$ ludwigite
 Razil Ziatdinov: Calculation of interaction parameters of Pu^{3+} ions with spins of fluorine nuclei in CaF_2

Closing ceremony

Poster sessions

1. Advances in magnetic resonance theory and instrumentation

Gol'dberg A.A., Klimova S.A., Davydov R.V., Provodin D.S., Davydov V.V.: A new approach to finding an analytical solution to the Bloch equations for magnetization components under modulation conditions of a constant magnetic field

2. Modern methods of magnetic resonance

Bakirov M.M., Sukhanov A.A., Zhang H., Zhao J., Kandrashkin Yu.E.: Time resolved EPR study of CNI Tempo
Fatykhov R.R.: Antisite defects in cathode materials of lithium (sodium)-ion batteries. EPR study
Khairutdinov I.T., Zaripov R.B.: Inversion of ensemble of frequency-distributed spins using a chirp pulse sequences
Pulotov Zh.Kh., Kadikova A.Kh., Gabbasov B.F., Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Kiiamov A.G., Tagirov L.R., Yusupov R.V.: Spin-Hall effects in epitaxial $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x/\text{Pt}$ and $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x/\text{W}$ thin film structures
Shishkin A.D., Shakurov G.S., Romanova I.V., Semashko V.V., Morozov O.A., Korableva S.L.: EPR experiments in LiDyF_4 at subterahertz frequencies
Zhelezniakova D.E., Gimazov I.I., Talanov Y.I.: Influence of magnetic correlations on scattering of current carriers in iron arsenides

3. Low-dimensional systems, nano-systems and molecular magnets

Achintseva V.A., Batulin R.G., Cherosov M.A., Zinnatullin A.L., Romanova I.V.: Features of solid-phase synthesis of $\text{Gd}_{2-x}\text{Dy}_x\text{Ti}_2\text{O}_7$ and $\text{Gd}_{1-x}\text{Dy}_x\text{TiO}_3$ titanates
Dmitrieva M.Yu., Drovosekov A.B., Sitnikov A.V., Nikolaev S.N., Rylkov V.V.: Magnetic resonance in nanogranular composites: observation of “double-quantum” excitations in ferromagnetic nanoparticles
 Falin M.L., Latypov V.A., Korableva S.L.: EPR of cubic center of Gd^{3+} in Rb_2NaF_6 single crystal before phase transition at $T = 300$ K
Farrakhov B.F., Fattakhov Ya.V.: Morphology of the surface of the implanted silicon to increase the efficiency of light absorption formed by pulsed light heating
Ginkel A.K., Morozov O.A., Korableva S.L., Pudovkin M.S., Rakhmatullin R.M., Semashko V.V., Rodionov

A.A.: Effect of Bi^{3+} co-doping on Yb^{3+} local structure in CeO_2 nanoparticles

Gurin A.S., Kramushchenko D.D., Skomorokhov A.M., Baranov P.G., Kilin S.Ya., Babunts R.A.: Cross-relaxation of nitrogen-related centers in diamond

Kadikova A.Kh., Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Gabbasov B.F., Zverev D.G., Tagirov L.R., Yusupov R.V.: Inverse spin-hall effect and structural phase transitions in $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Mn}_x\text{Pt}_{1-x}$ bilayers

Khaibullin R.I., Begishev E.M., Bizyaev D.A., Bazarov V.V., Vakhitov I.R., Sukhanov A.A.: VSM, MFM and FMR studies of rutile TiO_2 implanted with doubly positively charged cobalt ions

Mershev L., Kupriyanova G.: ^{35}Cl NQR relaxation study of fine powders

Mukhamadullin B.M., Boltenkova E.I., Garaeva A.M., Bogaychuk A.V., Alakshin E.M.: Monitoring of nanoparticles nucleation in capillary system using ^1H NMR

Nurgazizov N.I., Chuklanov A.P., Mityushkin Ye.O., Nikiforov V.G.: Using atomic force microscopy to fabricate test structures from upconversion luminescent particles for confocal microscopy

Saenko N.S., Steblevskaya N.I., Belobeletskaya M.V., Ziatdinov A.M.: ESR of nanoparticles powder of europium metaphosphate $\text{Eu}(\text{PO}_3)_3$ doped by Eu^{2+} ions

Saritsky D.A., Zheleznov V.V., Ziatdinov A.M.: Analysis and modeling of EPR spectra of $\text{Na}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}\cdot\text{Fe}^{3+}$ considering the distribution of fine structure parameters

Shaposhnikova T.S., Mamin R.F.: Magnetoelectric properties of skyrmions

Sharipova A.R., Frolova E.N., Turanova O.A., Bazan L.V., Turanov A.N.: Effect of counterions in $\text{Fe}(\text{III})$ complexes with β -enaminones on their magnetic properties

Useinov N.Kh.: Study of spin-orbit torques induced by current in magnetic tunnel junctions

Zaripov R.B., Galeev R.T.: Observation of transient nutation on a two-quantum transition

4. Spin-based information processing and optical quantum technologies

Arifullin M.R., Berdinskiy V.L.: Implementation of quantum computing on high-spin ions of paramagnetic complexes using phase-modulated microwave pulses

Begishev E.M., Lyadov N.M., Bazarov V.V., Sukhanov A.A., Khaibullin R.I.: Magnetic memristor based on cobalt-implanted rutile (TiO_{2-x}): VSM, MOKE and FMR studies

5. Strongly correlated electron systems

Arbuzov D.A., Validov A.A., Garyf'yanov N.N., Kamashev A.A., Garifullin I.A.: Investigation of the oxidation processes of cobalt thin films by the FMR method

Demishev S.V., Tagirov R.R., Semeno A.V., Shestakov A.V., Fazlizhanov I.I., Eremina R.M., Bokov A.V., Salamatina D.A., Tsvyashchenko A.V.: Magnetic properties of Gd-CoCo_2 : ESR, static magnetization and magnetocaloric study

Enderova T.N., Sakhin V.O., Gimazov I.I., Kukovitsky E.F., Talanov Yu.I.: Non-resonant microwave absorption study of anisotropic transport properties in $\text{Bi}_{1.06}\text{Sn}_{0.04}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$
Gavrilova T.P., Yatsyk I.V., Zaitsev A.I., Cherepakhin A.V., Moshkina E.M.: $\text{CeMnB}_5\text{O}_{10}$ – new member of a pentaborate family: ESR measurements

Goryunov Yu., Nateprov A.: Nuclear magnetic moments in the 3D Dirac semimetal Cd_3As_2 : Suhl-Nakamura interaction approach

Nasyrova M.I., Gabbasov B.F., Cherosov M.A., Batulin R.G., Yusupov R.V.: Influence of cooling conditions on magnetic resonance spectra of FeCr_2O_4 multiferroic spinel
Os'kin A.E., Popov A.V., Yatsyk I.V., Eremina R.M., Demishev S.V.: Quantitative EPR line shape analysis in a metal based on the semiclassical magnetization dynamics
Yatsyk I.V., Likero R.F., Eremina R.M., Batulin R.G.: Magnetic properties $\text{Ca}_{0.3}\text{Sr}_{0.3}\text{La}_{0.3}\text{Mn}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$

Yurtaeva S.V., Yatsyk I.V., Efimov V.N., Rodionov A.A.: Analysis of temperature behavior of orientation dependent EMR signals in biological tissues

Shestakov A.V., Seidov Z.Y., Cherosov M.A., Yatsyk I.V., Ovchinnikov A.S., Vagizov F.G., Shustov V.A., Badelin A.G., Karpasyuk V.K., Najafzade M.J., Ibrahimov I.N., H.-A. Krug von Nidda, Eremina R.M.: Magnetic properties of polycrystalline $\text{La}_{0.83}\text{Sr}_{0.17}\text{Mn}_{0.9}\text{Fe}_{0.05}\text{Zn}_{0.05}\text{O}_3$ and $\text{La}_{0.83}\text{Sr}_{0.17}\text{Mn}_{0.9}\text{Fe}_{0.05}\text{Mg}_{0.05}\text{O}_3$

6. Chemical and biological systems

Akhmetov M.M., Gumarov G.G., Zaripov R.B., Konygin G.N., Rybin D.S.: Pulse EPR of radicals in mechano-activated calcium gluconate

Andrianov V.V., Deryabina I.B., Arslanov A.I., Bazan L.V., Gainutdinov Kh.L.: Effect of different anesthesia methods on NO detection in rat brain tissue by the spin trap method

Batueva E.E., Sharipova A.R., Frolova E.N., Sukhanov A.A., Savostina L.I., Turanova O.A., Turanov A.N.: Multifunctional heptanuclear iron complexes

Ibragimova M.I., Chushnikov A.I., Yatsyk I.V., Khaibullina D.Kh., Gumarov G.G.: EPR method: methemoglobinemia in patients with connective tissue dysplasia

Ivanova I.S., Bajtimirov D.R., Konev S.V., Ivanov D.V., Podshivalov A.P.: Investigation of the origin of the radiation-induced paramagnetic centers in melanin by EPR spectroscopy

Podshivalov A.P., Bajtimirov D.R., Ivanov D.V., Konev S.F., Slesarev G.P.: Study of the influence of hydroxyapatite synthesis conditions on its dosimetric properties using the EPR method

Shaidullina A.F., Savostina L.I., Sharipova A.R., Volkov, M.Yu. Turanova O.A., Turanov A.N.: Influence of solvents on β -enaminon spectral characteristics and dynamics by NMR, UV-visible spectroscopy and DFT data

Sukhanov A.A., Voronkova V.K., Zh. Li, Xi Chen, J. Zhao: Exchange and spin dipolar interactions in perylenebisimide-tempo dyads

Shamsutdinova E.K., Turanov A.N.: Proton Exchange in water-ethanol mixture. NMR

Sharipova A.R., Frolova E.N., Turanova O.A., Bazan L.V., Turanov A.N.: Potential control of magnetic properties of a new Fe(III) complex by means of synthesis methods

Volkov M.Yu., Sharipova A.R., Turanova O.A.: Study of 1-[4-(4-pentylcyclohexyl)-phenyl]-3-(quinolin-8-ylamino)-prop-2-en-1-one by NMR and UV spectroscopy

7. Defects and spin qubits

Nikiforov L.V., Dmitrieva D.V., Dmitrieva D.S., Davydov V.V.: Research a relaxation processes of E' centers in pure quartz fibers by electron paramagnetic resonance method
Oshchepkov A.Yu.: Modeling the dynamics of spin qubits in the presence of stochastic impact of lattice in the semiclassical approximation

Sukhanov A.A., Tarasov V.F., Didenko Ya.S., Subbotin K.A., Zharikov E.V.: Hyperfine structure of epr spectra of Cr-53 impurity ions in synthetic forsterite

Zaripov R.B., Ulanov V.A., Zainullin R.R.: EPR study of $[\text{Mn}^{2+} - \text{Ag}^{2+}]$ exchange coupled pairs synthesized in BaF_2 single crystal

8. Magnetic resonance imaging and applications in medical physics

Makarchenko A.S., Kuzmin V.V.: Study of the efficiency of helium-3 nuclear polarization in magnetized plasma under various RF pumping conditions

Nefediev N.A., Staroverov N.E., Davydov R.V.: Application of convolutional neural network to improve the efficiency of tumor segmentation in prostate MRI

9. Related phenomena

Andreev G.Iu., Baibekov E.I., Romanova I.V.: Magnetocaloric effect and the hysteresis properties of LiDyF_4

Arbuzov D., Kamashev A., Garif'yanov N.: The realisation of solitary superconductivity in a superconducting spin valve

Kamashev A.A., Garifyanov N.N., Validov A.A., Arbuzov D.A., Garifullin I.A.: Investigation of features of magnetic properties of oxidized layers in superconducting spin valve structures CO/PB/CO

Likero R.F., Yatsyk I.V., Eremina R.M.: High-entropy perovskite-like oxide $(\text{BaCaSrLaNa})_{0.2}\text{FeO}_3$: synthesis and epr measurements

Menshikov M.E., Dooglav A.V., Batulin R.G., Korableva S.L., Morozov O.A., Romanova I.V.: Measuring magnetostriction using capacitive dilatometer

Sakhin V.O., Gabbasov B.F., Zverev D.G., Kukovitsky E.F., Garifyanov N.N., Kamashev A.A.: Investigation of spin-current conversion in $\text{Py/Bi}_{1.08}\text{Sn}_{0.02}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$ heterostructure

Итоговая конференция КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН

Секция физическая

Устная сессия

4 февраля 2026 г.

Заседание 1. Председатель – д.ф.-м.н., проф. Л. Р. Тагиров

Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Рогов А.М., Сотникова В.Ф., Коновалов Д.А.: Вариации изменения поверхности германия при порообразовании во время ионного облучения

Хантимеров С.М., Гарипов Р.Р., Тогулев П.Н., Сулейманов Н.М.: Электропроводящие композиты на основе полимеров и углеродных нанотрубок и их применение

Попов Д.В., Батулин Р.Г.*, Черосов М.А.* (*КФУ) Шустов В.А., Чупахина Т.И.**., Деева Ю.А.** (*ИХТТ) Ерёмина Р.М.: Магнитное разделение фаз в двойном перовските $\text{Sr}_2\text{MnNbO}_{6-\delta}$

Баталов Р.И., Базаров В.В., Бегишев Е.М., Лядов Н.М., Валеев В.Ф., Новиков Г.А., Ликеров Р.Ф., Подлесных И.М. (ФИАН, Москва) Симакин С.Г. (ЯрГУ, Ярославль) Чистохин И.Б. (ИФП СО РАН, Новосибирск): Формирование композитных структур Si с наночастицами AZB5 для фотоэлектроники ближнего ИК диапазона

Заседание 2. Председатель – д.ф.-м.н. Ю. И. Таланов

Салихов К.М.: Дальнейшее развитие парадигмы спинного обмена и его проявления в ЭПР спектроскопии в разбавленных растворах парамагнитных частиц

Тарасов В.Ф., Ерёмин М.В. (КФУ): Эффект магнитоэлектрической невязимности в субмиллиметровой ЭПР-спектроскопии примесных ионов $^{166}\text{Er}^{3+}$ в монокристалле $^7\text{LiYF}_4$

Яцык И.В., Ликеров Р.Ф., Ерёмина Р.М., Батулин Р.Г.*, Черосов М.А.* (*КФУ) ЭПР-спектроскопия кальций-стронциевого манганита с частичным замещением в А- и В-позициях

Заседание 3. Председатель – д.ф.-м.н. Е. Л. Вавилова

Митюшкин Е.О., Солодов А.Н., Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Никифоров В.Г., Жарков Д.К.: Даун-конверсионная люминесценция наночастиц как способ улучшения эффективности кремниевых солнечных панелей

Бережной А.Д., Калачёв А.А.: Квантовая память с интерфейсом на основе частотного преобразования

Латыпов И.З., Турайханов Д.А., Шкаликов А.В., Гушин Л.А.*, Зеленский И.В.*, Низов В.А.*, Низов Н.А.*, Собгайда Д.А.*, Ахмеджанов Р.А.* (*ИПФ РАН) Калачёв А.А.: Источник перепутанных пар фотонов на основе двухрезонаторного ПГС для СКРК

с недоверенным узлом на основе твердотельной квантовой памяти

Шафеев Н.М., Степаненко К.А., Турайханов Д.А., Васильев А.В., Латыпов И.З., Калачёв А.А.: Квантовое хеширование с использованием поляризационных состояний света

Заседание 4. Председатель – к.ф.-м.н. С. М. Хантимеров

Гимазов И.И., Хамидуллин И.Н., Чареев Д.А., Васильев А.Н., Таланов Ю.И.: Влияние флуктуаций на микроволновой отклик селенидов железа FeSe с примесью серы вблизи нематической квантовой критической точки

Соловаров Н.К.: Сепарабельность, скрытые параметры и коррелированность-когерентность пар ЭПР-Бомба-Белла Файзуллин А.М., Садчиков Ю.В.: Оценка усталостной прочности конструкций при сложном напряженно-деформированном состоянии

Стендовая сессия

11 февраля 2026 г.

Сводный стенд лаборатории физики и химии поверхности

Морозова А.С., Кудрявцева Е.О., Зиганшина С.А., Курбатова Н.В., Зиганшин М.А. (КФУ) Бухараев А.А.: Исследование пьезоэлектрических свойств микро и нанокристаллов, полученных на основе дипептидов Phe-Leu и Leu-Phe

Кудрявцева Е.О., Морозова А.С., Зиганшина С.А., Зиганшин М.А. (КФУ) Бухараев А.А.: Нано- и микроструктуры на основе циклических дипептидов фенилаланил-аланин и фенилаланил-лейцин и их свойства по данным сканирующей зондовой микроскопии

Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Нургазизов Н.И., Чукланов А.П.: Квазиоднородное распределение намагниченности в планарных Ni микрочастицах квадратной формы, обусловленное вогнутостью сторон

Бухараев А.А., Бизяев Д.А., Нургазизов Н.И., Чукланов А.П.: Влияние термоиндуцированного магнитоупругого эффекта на поле переключения Ni-частиц с квазиоднородной намагниченностью

Сводный стенд лаборатории спиновой физики и спиновой химии

Воронкова В.К., Суханов А.А.: Некоторые результаты исследования фотоиндуцированных процессов в компактных диодах 2025 года (совместные исследования с Даляньским технологическим университетом, Далянь, Китай)

Галеев Р.Т., Зарипов Р.Б.: Эффекты, индуцированные релаксацией и сильным СВЧ полем

Зарипов Р.Б., Хайрутдинов И.Т., Тарасов В.Ф., Кандрашкин Ю.Е.: Новая область антипересечения примесного иона ^{53}Cr в ортосиликате иттрия

- Кандрашкин Ю.Е.: Спин-контролируемое стимулированное эхо, сформированное в молекулярных триадах в процессе фотоиндуцированной квантовой телепортации
- Бакиров М.М., Суханов А.А., Кандрашкин Е.Ю., Н. Zhang*, J. Zhao* (*Даляньский технологический университет, Далянь, Китай): Исследование методом ВРЭПР фотоиндуцированных состояний CNI-Темпо диад
- Соловаров Н.К.: Состояния пар Белла в модели скрытых переменных (параметров)
- Андрианов В.В., Арсланов А.И., Базан Л.В., Гайнутдинов Х.Л.: ЭПР-исследование изменения содержания оксида азота в травмированной и нетравмированной областях мозга крыс через 7 суток после сочетанной травмы головного и спинного мозга

Сводный стенд лаборатории радиоспектроскопии диэлектриков

- Фалин М.Л., Латыпов В.А., Кораблева С.Л. (КФУ): ЭПР кубического центра Gd^{3+} в монокристалле Rb_2NaYF_6 при $T = 295$ К.
- Асатрян Г.*, Шакуров Г.С., Малкин Б.З. (КФУ) Батуева А.В.* (*ФТИ РАН) Петросян А.Г. (ИФИ НАН Армении): Широкополосная ЭПР-спектроскопия и кристаллическое поле центров Ho^{3+} в $YAlO_3$
- Мамедов Д.В., Деева Ю.А.*, Бажал В.В.*, Чупахина Т.И.* (*ИХТТ УрО РАН) Черосов М.А.***, Батулин Р.Г.** (*КФУ) Гаврилова Т.П.: Влияние термической и термобарической обработки на магнитные свойства слоистых перовскитов $La_{1.8}Ca_{0.2}Ni_{0.8}Cu_{0.2}O_{4\pm\delta}$
- Юртаева С.В., Яцык И.В., Фахрутдинов А.Р., Валиева А.И.*, Акулов А.Н.*, Костюкова Ю.А.*, Румянцева Н.И.* (*КИББ ФИЦ КазНЦ РАН): Изменение геометрии магнитных центров (областей) в клетках в процессе деления (по данным ЭМР неморфогенных клеток *Agarogum tataricum*)
- Шарипова А.Р., Фролова Е.Н., Туранова О.А., Базан Л.В., Туранов А.Н.: Потенциальное управление магнитными свойствами нового комплекса $Fe(III)$ методами синтеза
- Галиуллина А.Ф. (КФУ) Савостина Л.И., Шарипова А.Р., Волков М.Ю., Туранова О.А., Туранов А.Н.: Изучение влияния эффектов растворителей на спектральные характеристики и динамику β -енаминаона методами ЯМР, УФ-видимой спектроскопии и расчётов методом теории функционала плотности

Сводный стенд лаборатории радиационной химии и радиобиологии

- Ахметов М.М., Гумаров Г.Г., Зарипов Р.Б., Коньгин Г.Н.*, Рыбин Д.С.* (*ФТИ УдмФИЦ УрО РАН): Импульсная ЭПР радикалов в механоактивированном глюконате кальция
- Ибрагимова М.И., Чушников А.И., Яцык И.В., Хайбуллина Д.Х. (КГМА) Гумаров Г.Г.: ЭПР-исследования крови больных с недифференцированной дисплазией соединительной ткани.

Сводный стенд лаборатории интенсивных радиационных воздействий

- Баталов Р.И., Новиков Г.А., Лунев И.В., Климовицкий А.Е., Бегишев Е.М., Валеев В.Ф., Симакин С.Г. (ЯрГУ, Ярославль): Импульсный ионный отжиг слоёв кремния с имплантированной примесью серы
- Баталов Р.И., Марфин Е.А. (ИЭПТ ФИЦ КазНЦ РАН) Зайцев Д.Д. (ТПУ, Томск): Двумерное моделирование импульсного нагрева аморфизованного кремния мощными ионными пучками

Сводный стенд лаборатории методов медицинской физики

- Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А., Баязитов А.А.: Автоматизация настроек специализированного магнитно-резонансного томографа
- Фаррахов Б.Ф.: Формирование микроструктур на поверхности кремния мощными световыми импульсами для повышения эффективности солнечных элементов
- Баязитов А.А., Фаттахова М.Я.: Разработка программного модуля для измерения амплитуды и энергии формант голоса
- Ашихмин А.Н., Садчиков Ю.В.: Исследование герметичности газового стыка ДВС

Сводный стенд лаборатории нелинейной оптики

- Шахмуратов Р.Н.: Формирование импульсов с помощью фазовой модуляции непрерывного лазера и последующим управлением фазами созданных спектральных компонент
- Перминов Н.С., Шкаликов А.В.: Модуляция спектральных характеристик сенсорной поверхности композитного волоконного термосенсора
- Перминов Н.С., Моисеев С.А.: Хиральные и топологические свойства кольцевой фотонной молекулы из 4 оптических микрорезонаторов
- Шегеда А.М.: Проявление памяти и бабочка в фотонном эхо в кристаллах $Y(Lu)F_4:Er^{3+}$ в импульсных магнитных полях
- Кадикова А.Х.*, Петров А.В.*, Габбасов Б.Ф.*, Гумаров А.И.*, Янилкин И.В.*, Тагиров Л.Р., Юсупов Р.В.* (*КФУ): Прецессия фотоиндуцированной намагниченности в тонкой эпитаксиальной плёнке $Pd_{92}Fe_8$

Сводный стенд лаборатории квантовой оптики в алмазах

- Митюшкин Е.О., Солодов А.Н. (ФИЦ КазНЦ РАН) Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Никифоров В.Г., Жарков Д.К.: Даун-конверсионная люминесценция наночастиц как способ улучшения эффективности кремниевых солнечных панелей
- Леонтьев А.В., Жарков Д.К., Солодов А.Н. (ФИЦ КазНЦ РАН) Нуртдинова Л.А., Шмелёв А.Г., Митюшкин Е.О., Гатауллина Р.М., Никифоров В.Г.: Дизайн и анализ люминесцентных материалов и оптических сенсоров

Солодов А.Н. (ФИЦ КазНЦ РАН) Шайымова Ю.Р., Леонтьев А.В., Жарков Д.К., Нуртдинова Л.А., Шмелёв А.Г., Митюшкин Е.О., Гатауллина Р.М., Никифоров В.Г.: Корреляция параметров синтеза и люминесцентных характеристик апконверсионных наночастиц состава $\text{NaYF}_4:\text{Yb/Er}$

Шайымова Ю.Р., Солодов А.Н. (ФИЦ КазНЦ РАН) Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Шмелёв А.Г., Никифоров В.Г., Жарков Д.К.: Апконверсионные наночастицы в качестве температурных сенсоров для электроники и биомедицины

Сводный стенд лаборатории квантовой оптики и информационных технологий

Васильев А.В.: Сферическое квантовое хеширование
Аглямев Р.Д., Наумов А.К., Целищев Е.Ю. (ЗАО Транснефть-Автоматизация и метрология), Целищев Д.И. (ВНИИ расходомерии – филиал ВНИИ метрологии им. Д. И. Менделеева): Влияние на центры окраски в кристалле KY_3F_{10} , индуцированные рентгеновским излучением, допирования ионами Ce^{3+}

Сводный стенд лаборатории радиационной физики

Файзрахманов И.А., Лядов Н.М., Шустов В.А., Хайбуллин Р.И.: Микроструктура и оптические свойства тонких плёнок SnO_2 , полученных методом ионного распыления
Хайбуллин Р.И., Бегишев Е.М., Бизяев Д.А., Базаров В.В., Вахитов И.Р. (КФУ) Валеев В.Ф., Суханов А.А. Магнитные исследования рутила TiO_2 , имплантированного двухзарядными ионами кобальта

Бегишев Е.М., Лядов Н.М., Базаров В.В., Валеев В.Ф., Суханов А.А., Хайбуллин Р.И.: Магнитный мемристор на основе имплантированного кобальтом рутила (TiO_{2-x}): Магнитометрия, МОЭК и ФМР исследования
Базаров В.В., Валеев В.Ф., Лядов Н.М., Нуждин В.И.: Сравнительное исследование эволюции морфологии поверхности германия при имплантации ионов Li^+ и Ni^+ в широком интервале доз

Хайбуллин Р.И., Бегишев Е.М., Валеев В.Ф., Жарков Д.К., Леонтьев А.В., Шмелёв А.Г., Лобаев М.А.* (Радищев Д.Б.*), Вихарев А.Л.* (*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород): Фото- и электролюминесценция GeV- центров окраски в имплантированном германием алмазе

Сводный стенд лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники

Камашев А.А., Гарифьянов Н.Н., Арбузов Д.А., Валидов А.А., Осин А.С.*, Фоминов Я.В.* (*ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН) Гарифуллин И.А.: Эффект сверхпроводящего спинового клапана в гетероструктурах $\text{Fe/Si}_3\text{N}_4/\text{Pb/Si}_3\text{N}_4/\text{Fe}$

Арбузов Д.А., Валидов А.А., Гарифьянов Н.Н., Камашев А.А., Гарифуллин И.А.: Исследование процессов окисления тонких плёнок Co

Горюнов Ю.В.: Ядерные магнитные моменты в 3D топологическом полуметалле Cd_3As_2 : аналогия с взаимодействием Сула-Накамуры

Хамидуллин И.Н., Гимазов И.И., Чареев Д.А. (ИЭМ РАН) Васильев А.Н. (МГУ) Таланов Ю.И.: Исследования магнитных свойств FeSeS с помощью измерения динамической магнитной восприимчивости

Сахин В.О., Габбасов Б.Ф.*, Зверев Д.Г.* (*КФУ) Куковичский Е.Ф., Гарифьянов Н.Н., Камашев А.А.: Поисковое исследование спин-токовой конверсии в гетероструктуре ферромагнетик-топологический изолятор

Сводный стенд лаборатории физики углеродных наноструктур и композитных систем

Фатыхов Р.Р., Тогулев П.Н., Сулейманов Н.М.: ЭПР-исследование антиструктурных дефектов в катодных материалах структурного типа НАСИКОН в литий-ионных аккумуляторах

Сводный стенд лаборатории нанооптики и наноплазмоники

Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Рогов А.М., Сотникова В.Ф., Коновалов Д.А.: Парадигма в радиационной физике: нанопористый германий, распыление и набухание ионно-облучаемой поверхности

Сводный стенд лаборатории лабораторий физики ферроиков и функциональных материалов

Вавилова Е.Л.: Спиновая динамика цепочечного фрустрированного магнетика LiCuSbO_4 в присутствии немагнитных дефектов (Zn)

Шапошникова Т.С., Мамин Р.Ф.: Влияние внешнего электрического поля на форму и магнитные свойства скирмионов цилиндрической формы

Участие сотрудников в конференциях

XXIX Международный симпозиум “Нанозифика и нано-электроника”, 10–14 марта 2025 г., Нижний Новгород, Россия

Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Кудрявцева Е.О., Нургазизов Н.И., Чукланов А.П.: МСМ исследование магнитной структуры микрочастиц с четырёхлучевой симметрией (стенд.)

Бизяев Д.А., Чукланов А.П., Митюшкин Е.О., Жарков Д.К., Нуртдинова Л.А., Леонтьев А.В., Никифоров В.Г., Нургазизов Н.И.: Манипулирование апконверсионными микрочастицами методами атомно-силовой микроскопии (стенд.)

Бизяев Д.А., Чукланов А.П., Нургазизов Н.И., Бухараев А.А.: Влияние термоиндуцированного магнитоупругого эффекта на магнитные свойства Ni микрочастиц с конфигурационной анизотропией (стенд.)

Гимазов И.И., Чареев Д.А., Васильев А.Н., Таланов Ю.И.: Влияние флуктуаций на микроволновой отклик в FeSe_{1-x}S_x вблизи нематической квантовой критической точки (стенд.)

Железнякова Д.Е., Гимазов И.И., Перваков К.С., Власенко В.А., Пудалов В.М., Таланов Ю.И.: Электронный спиновый резонанс в кристаллах EuSn₂As₂ вблизи температуры магнитного упорядочения (стенд.)

Кадикова А.Х., Петров А.В., Габбасов Б.Ф., Гумаров А.И., Янилкин И.В., Тагиров Л.Р., Юсупов Р.В.: Магнитные неоднородности в тонкоплёночных эпитаксиальных системах Fe₃Al по данным ФМР и времязрешенной магнитооптики (стенд.)

Камашев А.А., Гарифьянов Н.Н., Валидов А.А., Арбузов Д.А., Катаев В.Е., Осин А.С., Фоминов Я.В., Гарифуллин И.А.: Экспериментальные исследования сверхпроводящих спиновых клапанов (приглашённый)

Кудрявцева Е.О., Морозова А.С., Зиганшина С.А., Зиганшин М.А., Бизяев Д.А., Бухараев А.А.: Влияние электрического поля на самосборку дипептида аланил-фенилаланин по данным СЗМ (стенд.)

Сахин В.О., Куковицкий Е.Ф., Камашев А.А., Гарифьянов Н.Н., Таланов Ю.И.: Транспортное исследование гетероструктуры Pb/Bi_{1.08}Sn_{0.02}Sb_{0.9}Te₂S (стенд.)

Таланов Ю.И., Гимазов И.И., Железнякова Д.Е.: Влияние анизотропных магнитных корреляций на рассеяние носителей тока в арсенидах железа (приглашённый)

Хайбуллин Р.И., Базаров В.В., Бегишев Е.М., Валеев В.Ф., Вахитов И.Р., Гумаров А.И., Зиннатуллин А.Л., Нуждин В.И., Киямов А.Г., Лядов Н.М., Суханов А.А., Файзрахманов И.А.: Микроструктура и необычное ферромагнитное поведение эпитаксиальных плёнок диоксида олова (SnO₂) с имплантированной примесью кобальта (приглашённый)

Эндерова Т.Н., Гимазов И.И., Сахин В.О., Таланов Ю.И., Куковицкий Е.Ф.: Особенности транспортных свойств анизотропных кристаллов Bi_{1.06}Sn_{0.04}Sb_{0.9}Te₂S (стенд.)
Янилкин И.В., Гумаров А.И., Головчанский И.А., Габбасов Ф., Юсупов Р.В., Тагиров Л.Р.: Управление дисперсией спиновых волн в градуированных магнитных материалах (приглашённый)

Международная конференция по применениям магнитного резонанса СПИНС-25, 1–4 апреля 2025 г., Санкт-Петербург, Россия

Салихов К.М.: Дальнейшее развитие теории спинного обмена в разбавленных растворах парамагнитных частиц (устн.)

XII Международная молодёжная научно-техническая конференция “Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы-2025”, 10–12 апреля 2025 г., Казань, Россия

Перминов Н.С.: Тёмные состояния в многорезонаторной квантовой памяти с переключением топологии (устн.)

10th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM-2025) & 3rd International Conference on Quantum Materials and Technologies, April 26–May 3 2025, Ölüdeniz-Fethiye/Muğla, Türkiye

Gaifullin R.R., Deminov R.G., Tagirov L.R., Kupriyanov M.Yu., Fominov Y.V., Golubov A.A.: Asymptotically exact solution for the critical temperature of superconducting F/N/F/S spin-valve (poster)

Gimazov I.I., Zhelezniakova D.E., Pervakov K.S., Pudalov V.M., Talanov Yu.I.: critical behavior of magnetic and transport parameters of EuFe₂As₂ near the magnetic ordering temperature (poster)

Popov D.V., Shustov V.A., Batulin R.G., Moshkina E.M., Eremina R.M.: Magnetic properties of ludwigites Mn_{2.25}Co_{0.75}BO₅ and Mn_{0.75}Co_{2.25}BO₅ (invited)

Zhelezniakova D.E., Gimazov I.I., Zaripov R.B., Pervakov K.S., Vlasenko V.A., Pudalov V.M., Talanov Y.I.: ESR of EuSn₂As₂ crystals in the vicinity of the magnetic ordering temperature (poster)

54-я Международная Тулиновская конференция (МТК-54), 27–29 мая 2025 г., Москва, Россия

Баталов Р.И., Базаров В.В., Подлесных И.М., Зайцев Д.Д.: Импульсный отжиг слоёв кремния с примесями индия и мышьяка: Моделирование и эксперимент (стенд.)

Степанов А.Л.: Дифракционные решётки и фотонные кристаллы на основе имплантированных слоёв нанопористого германия (устн.)

IV Международная конференция “Физика конденсированных состояний”, 2–6 июня 2025 г., Черноголовка, Россия
 Докудовская А.К., Рахматуллин Р.М., Семашко В.В., Кораблева С.Л., Морозов О.А., Родионов А.А., Пудовкин М.С.: Спектрально-кинетическая характеристика композитных структур $\text{CeF}_3/\text{CeO}_2$, активированных ионной парой $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ для целей температурной сенсорики (стенд.)

Низамутдинов А.С., Шавельев А.А., Кораблева С.Л., Семашко В.В.: Фотодинамические процессы и лазерная генерация в Се-активированных фторидных кристаллах (стенд.)

Попов Д.В., Ликеров Р.Ф., Ерёмин М.В., Ерёмин Р.М.: Короткие аналитические выражения для учёта пространственного распределения электронной плотности лиганда в теории нечётного кристаллического поля на редкоземельных ионах (стенд.)

Шестаков А.В., Фазлижанов И.И., Ерёмин Р.М., Демишев С.В., Родионова В.В., Колесникова В.В.: Фазовый переход в микропроводе $\text{Co}_{83}\text{Fe}_7\text{C}_1\text{Si}_7\text{B}_2$ в температурной зависимости спектра ЭПР (устн.)

Янилкин И.В., Гумаров А.И., Головчанский И.А., Габбасов Б.Ф., Юсупов Р.В., Тагиров Л.Р.: Инженерия дисперсии спектра стоячих спиновых волн в непрерывно градуированных тонких эпитаксиальных плёнках сплава Pd-Fe (приглашённый)

Черноголовская конференция по электронной микроскопии КЭМ-2025 с международным участием, 16–19 июня 2025 г., Черноголовка, Россия

Кудрявцева Е.О., Морозова А.С., Зиганшина С.А., Зиганшин М.А., Бухараев А.А., Жарков Д.К.: Влияние паров органических соединений на самосборку дипептидов, содержащих аминокислотные остатки L-аланин и L-фенилаланин (стенд.)

Рогов А.М., Степанов А.Л.: Морфология слоёв нанопористого германия, сформированного при имплантации ионами Bi^+ и Bi^{++} (устн.)

Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В.: Оптический контроль твердофазной рекристаллизации при импульсном световом отжиге для создания мелких p-n переходов (стенд.)

XII Международная конференция “Аналитическая механика, устойчивость и управление”, 16–20 июня 2025 г., Казань, Россия

Степаненко К.А.: Quantum hashing based on difference sets in finite abelian groups

Международная научная Четаевская конференция “Аналитическая механика, устойчивость и управление-2025”, 16–20 июня 2025 г., Казань, Россия

Перминов Н.С., Моисеев С.А.: Интегрированная квантовая память с одиночными атомами с контролем топологии спектра (устн.)

Международная онлайн конференция SPIN-2025: Спиновый обмен: переход к новой парадигме, 17–20 июня 2025 г.

Салихов К.М. Дальнейшее развитие теории спинного обмена и его проявление в ЭПР спектроскопии разбавленных растворов парамагнитных частиц

3rd International Conference on Quantum and Classical Computation and Complexity, June 27, 2025, Kazan, Russia
 Vasiliev A.: Dense Quantum Hashing (oral)

Международная конференция по квантовым и классическим вычислениям и сложности QCCC-2025, 27–30 июня 2025 г., Казань, Россия

Степаненко К.А.: Квантовое хеширование в конечных абелевых группах в контексте разностных множеств (устн.)

2nd International Workshop on Superconducting and Magnetic Hybrid Structures, Joint Institute for Nuclear Research (JINR), July 7–10, 2025, Dubna, Russia

Enderova T.N., Sakhin V.O., Gimazov I.I., Kukovitsky E.F., Talanov Yu.I.: DC and AC study of anisotropic transport properties in the topological insulator $\text{Bi}_{1.06}\text{Sn}_{0.04}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$ (oral)

Sakhin V.O., Kukovitsky E.F., Kamashev A.A., Garifyanov N.N., Talanov Yu.I.: Magnetotransport of $\text{Pb}/\text{Bi}_{1.08}\text{Sn}_{0.02}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$ heterostructures (poster)

Sakhin V.O., Kukovitsky E.F., Kamashev A.A., Garifyanov N.N., Talanov Yu. I.: Magnetotransport in superconductor/topological insulator heterostructure (poster)

30th International Conference on Low Temperature Physics, August 7–13, 2025, Bilbao, Spain

Falizhanova D.I., Popov D.V., Cherosov M.A., Batulin R.G., Moshkina E.M., Eremina R.M.: Magnetic properties of solid solutions ludwigites $\text{Co}_{3-x}\text{Mn}_x\text{BO}_5$ (poster)

Popov D.V., Yatsyk I.V., Cherosov M.A., Batulin R.G., Moshkina E.M., Eremina R.M.: Magnetic properties of ludwigites $\text{Cu}_2\text{MnBO}_5;\text{Cr}$ (poster)

VI International Baltic Conference on Magnetism IBCM 2025, August 17–21, 2025, Kaliningrad, Russia

Popov D., Eremina R., Likerov R.: Magnetic properties of $\text{Cu}_2\text{MnBO}_5;\text{Cr}$ single crystals ludwigite (poster)

Shestakov A., Fazlizhanov I., Eremina R., Demishev S., Rodionova V., Kolesnikova V.: Phase transition in $\text{Fe}_{45}\text{Co}_{30}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ and $\text{Co}_{83}\text{Fe}_7\text{C}_1\text{Si}_7\text{B}_2$ microwires in the temperature dependence of the ESR spectrum (oral)

IX Euro-Asian Symposium “Trends in MAGnetism”, September 13–17, 2025, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Enderova T.N., Sakhin V.O., Kukovitsky E.F., Talanov Yu.I., Borisov A.E., Morgun L.A.: Magnetic field effects on surface transport in topological insulator $\text{Bi}_{1.1}\text{Sn}_x\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$ (poster)

- Popov D.V., Batulin R.G., Cherosov M.A., Yatsyk I.V., Yanilkin I.V., Moshkina E.M., Fazlizhanova D.I., Eremina R.M.: Magnetic properties of ludwigites $\text{Cu}_2\text{MnBO}_5\text{:Cr}$ (invited)
- Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Golovchansky I.A., Gabbasov B.F., Yusupov R.V., Tagirov L.R.: Engineering of the spectrum of standing spin waves in continuously graded epitaxial Pd-Fe alloy films (oral)

XXVI Международная конференция по релаксационным явления в твёрдых телах, 15–19 сентября 2025 г., Воронеж, Россия

- Попов Д.В., Яцык И.В., Ерёмкина Р.М., Батулин Р.Г., Черосов М.А., Мошкина Е.М.: Спин-кроссовер в $\text{Cu}_2\text{MnBO}_5\text{:Cr}$ под действием внешнего магнитного поля (приглашённый)

Kazan Science Week 2025. International Conference “Advance Laser Technologies”, September 22–26, 2025, Kazan, Russia

- Aglyamov R.D., Naumov A.K., Nizamutdinov A.S., Shavelev A.A., Morozov O.A., Brodnikovskiy Yu.P., Semashko V.V.: Multi-wavelength MOPA laser system based on Cr:LiCaAlF_6 crystals for medical optoacoustic tomography (poster)
- Kadikova A.Kh., Petrov A.V., Taqi Kh.Sh.A., Gabbasov B.F., Gumarov A.I., Yanilkin I.V., Tagirov L.R., Yusupov R.V.: Magnetic inhomogeneities in Fe_3Al epitaxial thin films probed by FMR and time-resolved magneto-optics (poster)
- Naumov A.K., Aglyamov R.D., Korableva S.L., Semashko V.V. The new view on the laser properties and abilities of the $\text{LaF}_3\text{:Nd}^{3+}$ crystals (poster)
- Nikiforov V.: Using single upconversion $\text{NaYF}_4\text{:Yb,Er}$ nanoparticle as multifunctional luminescent sensor (oral)
- Makarov D.A., Kadikova A.Kh., Gumarov A.I., Yanilkin I.V., Gabbasov B.F., Petrov A.V., Tagirov L.R., Yusupov R.V.: An impact of inhomogeneous pump on ultrafast photoinduced magnetization precession in permalloy-based thin film structures (poster)
- Mityushkin E.: Improving the efficiency of solar cells by converting high-energy photons (oral)
- Nurgazizov N.I., Chuklanov A.P., Mityushkin Ye.O., Nikiforov V.G.: Using atomic force microscopy to fabricate test structures from upconversion luminescent particles for confocal microscopy (poster)
- Shakhmuratov R.: Conversion of phase-modulated CW laser field to pulses by phase control of its spectral components (oral)
- Shmelev A.: Nanothermometry: nanoparticles or Cu-complexes based composites? (oral)

Kazan Science Week 2025. International Conference “Superconductivity in Nanostructures” (Supernano 2025) September 22–26, 2025, Kazan, Russia

- Arbuzov D.: Superconducting spin valve in solitary superconductivity mode (oral)
- Kamashev A.: Experimental study of superconducting spin valves (oral)

- Sakhin V.O., Kukovitsky E.F., Kamashev A.A., Garifyanov N.N., Talanov Yu.I.: Magnetotransport in superconductor/topological insulator heterostructure (poster)
- Tagirov L.R.: Asymptotically exact solution for the critical temperature of superconducting F/N/F/S spin-valve (poster)
- Zhelezniakova D.E., Gimazov I.I., Talanov Y.I.: Influence of magnetic correlations on scattering of current carriers in iron arsenides (poster)

Kazan Science Week 2025. XXIX International youth scientific school “Coherent optics and optical spectroscopy (KOOC-2025)”, September 23–24, 2025, Kazan, Russia

- Кадикова А.Х., Петров А.В., Габбасов Б.Ф., Гумаров А.И., Янилкин И.В., Тагиров Л.Р., Юсупов Р.В.: Связанная прецессия доменов в тонкой эпитаксиальной плёнке $\text{Pd}_{92}\text{Fe}_8$ (poster)
- Перминов Н.С., Шкаликов А.В.: Мультиплексирование волоконных термосенсоров с электромодуляцией (poster)
- Перминов Н.С., Моисеев С.А.: Топология спектра 6-частичной кольцевой фотонной молекулы (poster)

Kazan Science Week 2025. International Conference “Modern Development of Magnetic Resonance”, September 29–October 3, 2025, Kazan, Russia

- Akhmetov M.M., Gumarov G.G., Zaripov R.B., Konygin G.N., Rybin D.S.: Pulse EPR of radicals in mechano-activated calcium gluconate (poster)
- Andrianov V.V., Deryabina I.B., Arslanov A.I., Bazan L.V., Gainutdinov Kh.L.: Effect of different anesthesia methods on NO detection in rat brain tissue by the spin trap method (poster)
- Arbuzov D., Kamashev A., Garif'yanov N.: The realisation of solitary superconductivity in a superconducting spin valve (poster)
- Arbuzov D.A., Validov A.A., Garyf'yanov N.N., Kamashev A.A., Garifullin I.A.: Investigation of the oxidation processes of cobalt thin films by the FMR method (poster)
- Bakirov M.M., Sukhanov A.A., Zhang H., Zhao J., Kandrashkin Yu.E.: Time resolved EPR study of CNI Tempo (poster)
- Batueva E.E., Sharipova A.R., Frolova E.N., Sukhanov A.A., Savostina L.I., Turanova O.A., Turanov A.N.: Multifunctional heptanuclear iron complexes (poster)
- Begishev E.M., Lyadov, Bazarov V.V., Sukhanov A.A., Khaibullin R.I.: Magnetic memristor based on cobalt-implanted rutile (TiO_{2-x}): VSM, MOKE and FMR studies (poster)
- Bukharaev A.: Full 180° magnetization reversal of planar Ni microparticles without magnetic field (invited)
- Demishev S.V., Tagirov R.R., Semeno A.V., Shestakov A.V., Fazlizhanov I.I., Eremina R.M., Bokov A.V., Salamatin D.A., Semeno A.V., Tsvyashchenko A.V.: Magnetic properties of GdCoC_2 : ESR, static magnetization and magnetocaloric study (poster)
- Enderova T.N., Sakhin V.O., Gimazov I.I., Kukovitsky E.F., Talanov Yu.I.: Non-resonant microwave absorption study of anisotropic transport properties in $\text{Bi}_{1.06}\text{Sn}_{0.04}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$ (poster)
- Eremina R.: Magnetic properties of $\text{Ca}_2\text{CoNbO}_6$ (oral)

- Falin M.L., Latypov V.A., Korableva S.L.: EPR of cubic center of Gd^{3+} in Rb_2NaF_6 single crystal before phase transition at $T = 300$ K (poster)
- Farrakhov B.F., Fattakhov Ya.V.: Morphology of the surface of the implanted silicon to increase the efficiency of light absorption formed by pulsed light heating (poster)
- Fattakhov Ya.: Magnetic resonance imaging of laboratory animals lungs using hyperpolarized ^{129}Xe (oral)
- Fatykhov R.R.: Antisite defects in cathode materials of lithium (sodium)-ion batteries. EPR study (poster)
- Gainutdinov Kh.: EPR study of the content of nitric oxide and copper in the liver of rats after modeling combined brain and spinal cord injuries (oral)
- Gavrilova T.P., Yatsyk I.V., Zaitsev A.I., Cherepakhin A.V., Moshkina E.M.: $CeMnB_5O_{10}$ – new member of a pentaborate family: ESR measurements (poster)
- Ginkel A.K., Morozov O.A., Korableva S.L., Pudovkin M.S., Rakhmatullin R.M., Semashko V.V., Rodionov A.A.: Effect of Bi^{3+} co-doping on Yb^{3+} local structure in CeO_2 nanoparticles (poster)
- Goryunov Yu., Nateprov A.: Nuclear magnetic moments in the 3D Dirac semimetal Cd_3As_2 : Suhl-Nakamura interaction approach. (poster)
- Ibragimova M.I., Chushnikov A.I., Yatsyk I.V., Khaibullina D.Kh., Gumarov G.G.: EPR method: methemoglobinemia in patients with connective tissue dysplasia (poster)
- Kadikova A.Kh., Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Gabbasov B.F., Zverev D.G., Tagirov L.R., Yusupov R.V.: Inverse spin-hall effect and structural phase transitions in $Ni_{80}Fe_{20}/Mn_xPt_{1-x}$ bilayers (poster)
- Kamashev A.A., Garifyanov N.N., Validov A.A., Arbuzov D.A., Garifullin I.A.: Investigation of features of magnetic properties of oxidized layers in superconducting spin valve structures CO/PB/CO (poster)
- Kandrashkin Yu.: Influence of nuclear spin on the Rabi frequency of erbium ions doped in a $YLiF_4$ single crystal (oral)
- Khaibullin R.I., Begishev E.M., Bizyaev D.A., Bazarov V.V., Vakhitov I.R., Sukhanov A.A.: VSM, MFM and FMR studies of rutile TiO_2 implanted with doubly positively charged cobalt ions (poster)
- Khairutdinov I.T., Zaripov R.B.: Inversion of ensemble of frequency-distributed spins using a chirp pulse sequences (poster)
- Likerov R.F., Yatsyk I.V., Eremina R.M.: High-entropy perovskite-like oxide $(BaCaSrLaNa)_{0.2}FeO_3$: synthesis and EPR measurements (poster)
- Nurgazizov N.I., Chuklanov A.P., Mityushkin Ye.O., Nikiforov V.G.: Using atomic force microscopy to fabricate test structures from upconversion luminescent particles for confocal microscopy (poster)
- Os'kin A.E., Popov A.V., Yatsyk I.V., Eremina R.M., Demishev S.V.: Quantitative EPR line shape analysis in a metal based on the semiclassical magnetization dynamics (poster)
- Popov D.: Spin-crossover in Cu_2MnBO_3 :Cr ludwigite (oral)
- Pulotov Zh.Kh., Kadikova A.Kh., Gabbasov B.F., Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Kiiamov A.G., Tagirov L.R., Yusupov R.V.: Spin-Hall effects in epitaxial $Pd_{1-x}Fe_x/Pt$ and $Pd_{1-x}Fe_x/W$ thin film structures (poster)
- Sakhin V.O., Gabbasov B.F., Zverev D.G., Kukovitsky E.F., Garifyanov N.N., Kamashev A.A.: Investigation of spin-current conversion in $Py/Bi_{1.08}Sn_{0.02}Sb_{0.9}Te_2S$ heterostructure (poster)
- Salikhov K.: Nuclear hyperpolarization in electron transfer in chiral systems (oral)
- Shaidullina A.F., Savostina L.I., Sharipova A.R., Volkov M.Yu., Turanova O.A., Turanov A.N.: Influence of solvents on β -enaminon spectral characteristics and dynamics by NMR, UV-visible spectroscopy and DFT data (poster)
- Shamsutdinova E.K., Turanov A.N.: Proton exchange in water-ethanol mixture (poster)
- Shaposhnikova T.S., Mamin R.F.: Magnetoelectric properties of skyrmions (poster)
- Sharipova A.R., Frolova E.N., Turanova O.A., Bazan L.V., Turanov A.N.: Effect of counterions in Fe(III) complexes with β -enaminones on their magnetic properties (poster)
- Sharipova A.R., Frolova E.N., Turanova O.A., Bazan L.V., Turanov A.N.: Potential control of magnetic properties of a new Fe(III) complex by means of synthesis methods (poster)
- Shestakov A.V., Seidov Z.Y., Cherosov M.A., Yatsyk I.V., Ovchinnikov A.S., Vagizov F.G., Shustov V.A., Badelin A.G., Karpasyuk V.K., Najafzade M.J., Ibrahimov I.N., Krug von Nidda H.-A., Eremina R.M.: Magnetic properties of polycrystalline $La_{0.83}Sr_{0.17}Mn_{0.9}Fe_{0.05}Zn_{0.05}O_3$ and $La_{0.83}Sr_{0.17}Mn_{0.9}Fe_{0.05}Mg_{0.05}O_3$ (poster)
- Shishkin A.D., Shakurov G.S., Romanova I.V., Semashko V.V., Morozov O.A., Korableva S.L.: EPR experiments in $LiDyF_4$ at subterahertz frequencies (poster)
- Sukhanov A.A., Tarasov V.F., Didenko Ya.S., Subbotin K.A., Zharikov E.V.: Hyperfine structure of epr spectra of Cr-53 impurity ions in synthetic forsterite (poster)
- Sukhanov A.A., Voronkova V.K., Li Zh., Chen Xi, Zhao J.: Exchange and spin dipolar interactions in perylenebisimide-tempo dyads (poster)
- Sukhanov A.A.: Inversion of electron spin polarization in organic chromophores. Time-resolved EPR study (invited)
- Suleimanov N.M.: Echo phenomena in spin spectroscopy (invited)
- Ulanov V.A.: Very strong concentration dependence of Mn^{2+} and Gd^{3+} EPR spectra parameters in $Pb_{0.995}Cu_{0.003}Gd_xMn_yS$ semiconductors (oral)
- Vavilova E.V.: Spin chains with non-magnetic defects: NMR studies (invited)
- Volkov M.Yu., Sharipova A.R., Turanova O.A.: Study of 1-[4-(4-pentylcyclohexyl)-phenyl]-3-(quinolin-8-ylamino) prop-2-en-1-one by NMR and UV spectroscopy (poster)
- Yatsyk I.V., Likerov R.F., Eremina R.M., Batulin R.G.: Magnetic properties $Ca_{0.3}Sr_{0.3}La_{0.3}Mn_{0.5}Ti_{0.5}O_3$ (poster)
- Yurtaeva S.V., Yatsyk I.V., Efimov V.N., Rodionov A.A.: Analysis of temperature behavior of orientation dependent EMR signals in biological tissues (poster)

- Zaripov R.B., Galeev R.T.: Observation of transient nutation on a two-quantum transition (poster)
- Zaripov R.B., Ulanov V.A., Zainullin R.R.: EPR study of $[\text{Mn}^{2+}\text{-Ag}^{2+}]$ exchange coupled pairs synthesized in BaF_2 single crystal (poster)
- Zhelezniakova D.E., Gimazov I.I., Talanov Y.I.: Influence of magnetic correlations on scattering of current carriers in iron arsenides (poster)

II International Conference “Superconductivity in Nanostructures” (Supernano 2025), September 22–26, 2025, Kazan, Russia

- Arbuzov D.A., Kamashev A.A., Garif’yanov N.N.: Superconducting spin valve in solitary superconductivity mode (oral)
- Kamashev A.A., Garif’yanov N.N., Validov A.A., Arbuzov D.A., Kataev V., Osin A.S., Fominov Ya.V., Garifullin I.A.: Experimental study of superconducting spin valves (invited)
- Zhelezniakova D.E., Gimazov I.I., Talanov Y.I.: Influence of magnetic correlations on scattering of current carriers in iron arsenides (poster)

5-th International Online Conference (ICON-2025), September 22–24, 2025, Basel, Switzerland

- Begishev E., Lyadov N., Bazarov V., Gumarov G., Khaibullin R.: Development of magnetic memristors based on cobalt-ion-implanted rutile (TiO_{2-x}) for nanoelectronic applications (online poster)

16-я Международная конференция “Взаимодействие излучений с твёрдым телом”, 22–25 сентября 2025 г. Минск, Беларусь

- Ким А.С., Лукашевич М.Г., Оджаев В.Б., Валеев В.Ф., Хайбуллин Р.И.: Оптические характеристики плёнок полиэфирэфиркетона, имплантированных ионами никеля (стенд.)
- Тыщенко И.Е., Гутаковский А.К., Володин В.А., Баталов Р.И., Швеиц П., Гойхман А., Вдовин В.И., Попов В.П.: Эволюция структурных и оптических свойств нанокристаллов InSb в процессе ионно-лучевого синтеза вблизи границы раздела Si/SiO_2 (устн.)

6th International Conference “Fundamental Problems of Superconductivity-2025”, September 28–October 4, 2025, Moscow, Russia

- Gimazov I.I., Chareev D.A., Vasiliev A.N., Talanov Yu.I.: Effect of fluctuations on the microwave response in FeSeS near the nematic QCP (oral)

XXXI Международная конференция “Оптика и спектроскопия конденсированных сред”, 28 сентября–4 октября 2025 г., Краснодар, Россия

- Асатрян Г.Р., Шакуров Г.С., Малкин Б.З., Батуева А.В., Петросян А.Г.: Широкополосная ЭПР-спектроскопия ионов Ho^{3+} в монокристаллах YAlO_3 (устн.)

- Тарасов В.Ф., Зарипов Р.Б., Уланов В.А.: Эффект электрических квадрупольных переходов в ЭПР-спектроскопии примесных центров $^{63}\text{Cu}^{2+}$ в монокристалле BaF_2 (устн.)
- Шакуров Г.С., Шишкин А.Д., Романова И.В., Семашко В.В., Морозов О.А., Кораблева С.Л.: Спектры ЭПР в кристаллах LiHoF_4 и LiDyF_4 в терагерцовом диапазоне (устн.)

Международная научно-техническая конференция “Современные подходы и практические инициативы в инженерных науках”, 2–3 октября 2025 г., Казань, Россия

Хантимеров С.М., Гарипов Р.Р., Емельянов И.А., Сулейманов Н.М.: Влияние мягкой кислотной обработки на диспергируемость МУНТ и их распределение в полимерной матрице (пленарный)

- Хантимеров С.М., Гарипов Р.Р., Хантимерова Ю.М., Димич В.В.: Влияние температуры экструзии на электропроводность аддитивных материалов на основе АБС и углеродных нанотрубок (устн.)

16-я Валиевская международная конференция “Микро- и нанoeлектроника-2025”, 6–10 октября 2025 г., Ярославль, Россия

- Vasiliev A.: Spherical quantum hashing
- Stepanenko K.A.: Construction of a quantum circuit for solving the Knapsack problem in the context of searching elements in an unordered table

Шестая международная научная конференция со школой молодых учёных “Физика – наукам о живом”, 13–18 октября 2025 г., Санкт-Петербург, Россия

- Гайнутдинов Х.Л., Кульчицкий В.А., Андрианов В.В., Дерябина И.Б., Силантьева Д.И., Базан Л.В., Богодвид Т.Х., Муранова Л.Н., Яфарова Г.Г., Арсланов А.И., Пашкевич С.Г., Филипович Т.А.: Изменение содержания NO и меди в лобных долях крыс через 1 и 7 суток после сочетанной травмы головного и спинного мозга (устн.)
- Юртаева С.В., Яцык И.В., Валиева А.И., Акулов А.Н., Костюкова Ю.А., Румянцева Н.И.: Изучение культуры делящихся клеток растений методом ЭПР спектроскопии (устн.)
- Абдулганиева Д.И., Шамсутдинова Н.Г., Баязитов А.А., Одиванов В.Л., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А.: Разработка методики ранней диагностики ревматоидного артрита с использованием лабораторной диагностики и магнитно-резонансной томографии в средних полях (устн.)

Международная научно-техническая конференция “Микро-, опто- и СВЧ-электроника-2025”, 14–17 октября 2025 г., Минск, Беларусь

- Степанов А.Л.: Антиотражающее оптическое покрытие на основе слоя нанопористого германия, сформированного имплантацией ионами висмута (устн.)

XIX Международный Феофиловский симпозиум по спектроскопии кристаллов, легированных ионами редкоземельных и переходных металлов (IFS-2025), 10–14 ноября 2025 г. Саранск, Россия

Асатрян Г.Р., Шакуров Г.С., Малкин Б.З., Петросян А.Г.: Широкополосная ЭПР-спектроскопия некрамерсовых редкоземельных ионов в кристаллах гранатов и YAlO_3 (стенд.)

Ерёмин М.В., Тарасов В.Ф.: Эффект магнитоэлектрической невязимости в субмиллиметровой ЭПР-спектроскопии примесных ионов $^{166}\text{Er}^{3+}$ в монокристалле $^7\text{LiYF}_4$ (устн.)

Семашко В.В., Шакуров Г.С., Морозов О.А., Кораблева С.Л., Колесникова В.И.: Концепция визуализации ТГц-излучения с использованием флуоресцентных наносенсоров, легированных редкоземельными элементами (приглашённый)

Шакуров Г.С., Шишкин А.Д., Романова И.В., Семашко В.В., Морозов О.А., Кораблева С.Л.: Субтерагерцовые спектры возбуждений в кристаллах $\text{LiY}_x\text{Dy}_{1-x}\text{F}_4$ (приглашённый)

Шегеда А.М., Кораблева С.Л., Морозов О.А., Соловаров Н.К., Тарасов В.Ф.: Проявление памяти и бабочка в фотонном эхо (стенд.)

VI Международная конференция “Газоразрядная плазма и синтез наноструктур”, 25–27 ноября 2025 г., Казань, Россия

Степанов А.Л.: Ионный синтез металлических наночастиц в диэлектриках и полупроводниках (пленарный)

Хантимеров С.М.: Полупроводниковые наноструктуры и композиты на их основе для современных химических источников тока (пленарный)

Российские конференции

“Первый воркшоп Квантового консорциума Татарстана”, 6 марта 2025 г., Иннополис, Россия

Перминов Н.С., Моисеев С.А.: Топология спектра и управление динамикой квантовой памяти в много-резонаторной схеме

V Российский конгресс “Роскатализ”, 21–26 апреля 2025 г., Санкт-Петербург, Россия

Абдуллина А.А., Базаров В.В., Ханов Н.Т., Сулейманов Н.М.: Синтез и исследование композитных каталитических материалов на основе пористого германия и наночастиц никеля для электродов электрохимических источников тока (стенд.)

Баталов Р.И., Базаров В.В., Подлесных И.М., Зайцев Д.Д.: Импульсный отжиг слоёв кремния с примесями индия и мышьяка: моделирование и эксперимент (стенд.)

Совещание по квантовому и низкоразмерному магнетизму, 19–20 мая 2025 г., Дубна, Россия

Вавилова Е.Л.: Возможности ядерного магнитного резонанса для исследования коррелированных магнетиков на примере двумерных фрустрированных спиновых систем с решётками типа пчелиных сот (приглашённый)

Научный семинар “Нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия-2025”, 9–11 июля 2025 г., КФТИ им. Е. К. Завойского, Казань, Россия

Зайнуллин Р.Р., Уланов В.А., Яцык И.В., Калимуллин Р.И., Потапов А.А.: Возможные электронные состояния примесных центров гадолиния в узкощелевом полупроводнике $\text{Pb}_{(1-x)}\text{Gd}_x\text{S}$: данные изучения методом ЭПР (устн.)

Лапаев Д.В., Никифоров В.Г., Шмелёв А.Г., Нургазизов Н.И., Зиятдинова Р.М., Князев А.А., Галяметдинов Ю.Г.: Перспективы создания люминесцентных наноструктур из растворов мезогенных бета-дикетонатных комплексов лантаноидов (III) (устн.)

Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Митюшкин Е.О., Никифоров В.Г.: Оптически захваченные наностержни $\text{NaYF}_4:\text{Yb}$, Er как термометрические зонды (устн.)

Митюшкин Е.О., Солодов А.Н., Леонтьев А.В., Шмелёв А.Г., Нуртдинова Л.А., Жарков Д.К., Никифоров В.Г.: Даун-конверсионные частицы $\text{YVO}_4:\text{Bi}, \text{Yb}$ для повышения эффективности кремниевых солнечных панелей (устн.)

Никифоров В.Г.: Применение двух фемтосекундных лазерных импульсов разной длительности для нерезонансной селективной спектроскопии жидкостей в терагерцовом диапазоне (приглашённый)

Нургазизов Н.И., Чукланов А.П., Митюшкин Е.О., Никифоров В.Г.: Создание дискретных упорядоченных структур из апконверсионных люминесцентных частиц на поверхности оптически прозрачной подложки с помощью атомно-силового микроскопа (устн.)

Нургазизов Н.И., Чукланов А.П., Никифоров В.Г., Митюшкин Е.О.: Создание дискретных упорядоченных структур из апковерсинных люминесцентных частиц на поверхности оптически прозрачной подложки с помощью атомно-силового микроскопа (устн.)

Перминов Н.С., Моисеев С.А.: Динамика в кольцевой фотонной молекуле с программируемой топологией спектра (устн.)

Перминов Н.С., Шкаликов А.В.: Электрически контролируемый волоконный оптический термосенсор с брэгговским резонатором (устн.)

Уланов В.А., Зайнуллин Р.Р., Яцык И.В., Ликеров Р.Ф.: Электронный парамагнитный резонанс в узкощелевом полупроводнике $\text{Pb}_{0.996}\text{Cu}_{0.003}\text{Mn}_x\text{Gd}_y\text{S}$: Эффекты взаимодействия между ионами Mn^{2+} и Gd^{3+} с участием свободных носителей заряда (устн.)

Уланов В.А., Зарипов Р.Б., Яцык И.В., Шакуров Г.С.: Структура и магнитные свойства обменно-связанных пар $[\text{Ni}^{3+}\text{--O}^-]$ в монокристаллическом BaF_2 (стенд.)
Шегеда А.М., Кораблева С.Л., Морозов О.А.: Бабочка в фотонном эхе в импульсных магнитных полях (приглашённый)

Российская конференция и школа молодых учёных по актуальным проблемам полупроводниковой фотозлектроники “Фотоника-2025”, 8–12 сентября 2025 г., Новосибирск, Россия

Баталов Р.И., Базаров В.В., Бегишев Е.М., Лядов Н.М., Подлесных И.М., Зайцев Д.Д.: Формирование композитных структур Si с наночастицами Al_2O_3 для фотозлектроники ближнего ИК диапазона (стенд.)
Тыщенко И.Е., Баталов Р.И., Володин В.А., Гутаковский А.К., Вдовин В.И., Попов В.П.: Оптические свойства нанокристаллов InSb , ионно-синтезированных на границе раздела Si/SiO_2 структур кремний-на изоляторе (устн.)

Конференция “Спиновая физика, спиновая химия, спиновая технология”, 6–9 октября 2025 г., Санкт-Петербург, Россия

Салихов К.М.: Новая парадигма спинового обмена в разбавленных растворах парамагнитных частиц (обзорный доклад)

Курчатовский форум “Исследования с применением синхротронного излучения, нейтронов и электронов” ФСНЭ-2025, 21–25 октября 2025 г., Москва, Россия,

Фазлижанова Д.И.: Структурные и магнитные свойства $\text{Co}_{1.2}\text{Mn}_{1.8}\text{VO}_5$ (устн.)

Фазлижанова Д.И., Мошкина Е.М., Ерёмкина Р.М.: Структурные и магнитные свойства $\text{Co}_{2.19}\text{Mn}_{0.81}\text{VO}_5$ (стенд.)

XXIII Всероссийская молодёжная Самарская конкурс-конференция по оптике, лазерной физике и физике плазмы, посвящённая 45-летию СФ ФИАН, 11–15 ноября 2025 г., Самара, Россия

Кудрявцева Е.О., Саутина Н.В., Никифоров В.Г., Шмелёв А.Г., Галяметдинов Ю.Г.: Рамановская спектроскопия в исследовании биотранспортных систем доставки цитохрома C (стенд.)

Никифоров В.Г.: Фемтосекундная нерезонансная селективная спектроскопия в терагерцовом диапазоне (приглашённая лекция)

Митюшкин Е.О., Солодов А.Н., Гатауллина Р.М., Леонтьев А.В., Шмелёв А.Г., Нуртдинова Л.А., Никифоров В.Г., Жарков Д.К.: Применение люминесцентных наночастиц для повышения эффективности солнечных элементов (стенд.)

I Всероссийская конференция “Актуальные вопросы фотоуправляемых и фармакологически активных соединений”, 24–28 ноября 2025 г. Москва, Россия

Шайдуллина А.Ф., Савостина Л.И., Шарипова А.Ф., Туранова О.А., Туранов А.Н.: Фотоизомеризация 4-стирилпиридина, 1,2-ди(4-пиридил)этилена и 1-фенил-3-(8-хинолиниламином)-2-пропен-1-она (стенд.)

V Конгресс молодых учёных, 26–28 ноября 2025 г., ФТ Сириус, Россия

Никифоров В.Г.: Игры с цветом фотонов в ап- и даун-конверсионных материалах для наносенсорики и зелёной энергетики (приглашённая лекция)

2-е Самарцевские Чтения по квантовой оптике и фотонному эху (IWQO/ФЭКС-2025), 29 ноября–4 декабря 2025 г., ФТ Сириус, Россия

Жарков Д.К., Солодов А.Н., Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Шмелёв А.Г., Митюшкин Е.О., Гатауллина Р.М., Никифоров В.Г., Хасанов О.Х.: Возможности конфокальной микроскопии для визуализации, термометрии и магнитометрии (устн.)

Латыпов И.З.: Источник перепутанных пар фотонов на основе двухрезонаторного спонтанного параметрического рассеяния света для твердотельной квантовой памяти (устн.)

Леонтьев А.В., Жарков Д.К., Солодов А.Н., Нуртдинова Л.А., Шмелёв А.Г., Митюшкин Е.О., Гатауллина Р.М., Никифоров В.Г.: Дизайн и анализ люминесцентных материалов и оптических сенсоров (стенд.)

Митюшкин Е.О., Солодов А.Н., Шмелёв А.Г., Ликеров Р.Ф., Леонтьев А.В., Нуртдинова Л.А., Никифоров В.Г., Жарков Д.К.: Даун-конверсионная люминесценция в частицах $\text{YVO}_4:\text{Bi}, \text{Yb}$ как способ улучшения эффективности кремниевых солнечных панелей (стенд.)

Никифоров В.Г., Шмелёв А.Г., Жарков Д.К., Леонтьев А.В.: Фемтосекундная многоимпульсная нерезонансная спектроскопия для селективной регистрации низкочастотных молекулярных откликов, включая терагерцовый диапазон (приглашённый)

Нуртдинова Л.А., Леонтьев А.В., Жарков Д.К., Шмелёв А.Г., Митюшкин Е.О., Нургализов Н.И., Чукланов А.П., Никифоров В.Г.: Одиночная апконверсионная частица $\text{NaYF}_4:\text{Yb}, \text{Er}$ в роли мультифункционального биосенсора (устн.)

Шафеев Н.М.: Квантовое хеширование с использованием поляризационных состояний света (стенд.)

Шмелёв А.Г., Митюшкин Е.О., Солодов А.Н., Архипов Д.Д., Аверьянов С.А., Жарков Д.К., Никифоров В.Г.: Нелинейные процессы при фемтосекундной накачке в мультимодальных люминесцентных наночастицах (устн.)

Гости института

Участники международной конференции “Modern Development of Magnetic Resonance 2025”

Fazhan Shi, University of Science and Technology of China, Hefei, China

He Yu, Guoyi Quantum Technology Co., Ltd., Hefei, China

Jiangfeng Du, University of Science and Technology of China, Hefei, China & Zhejiang University, Hangzhou, China

Акимов Алексей Владимирович, к.ф.-м.н., Российский квантовый центр, Москва

Алакишин Егор Михайлович, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Алтынбаев Евгений Владимирович, магистр физики, СПбГУ, Санкт-Петербург

Андреев Георгий Юрьевич, ассистент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Арбузова Маргарита Андреевна, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск

Арифуллин Марсель Равшанович, к.ф.-м.н., Оренбургский государственный университет, Оренбург

Аствацатуров Дмитрий Александрович, к.ф.-м.н., Институт химической физики имени Н. Н. Семёнова РАН, Москва

Багрянская Елена Григорьевна, д.ф.-м.н., Новосибирский институт органической химии имени Н. Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск

Байтимиров Дамир Рафисович, к.ф.-м.н., Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Буньков Юрий Михайлович, д.ф.-м.н., Российский квантовый центр, Москва

Ванин Анатолий Фёдорович, д.б.н., Институт химической физики имени Н. Н. Семёнова РАН, Москва

Васильев Александр Николаевич, д.ф.-м.н., Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Васильев Сергей Геннадьевич, Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка

Водовозов Владилен Михайлович, НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, Санкт-Петербург

Волков Виталий Иванович, д.ф.-м.н., Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка

Волкова Ольга Сергеевна, д.ф.-м.н., Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Гараева Аделя Мухаматовна, инженер, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Глазков Василий Николаевич, д.ф.-м.н., Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, Москва

Голдберг Артемий Александрович, инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Готовко София Климентовна, к.ф.-м.н., Институт физических проблем имени П. Л. Капицы, Москва, РАН

Гурин Александр Сергеевич, к.ф.-м.н., Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

Дементьев Сергей Александрович, Международный томографический центр, Новосибирск

Демишев Сергей Васильевич, д.ф.-м.н., Институт физики высоких давлений им. Л. Ф. Верещагина РАН, Москва

Дзюба Сергей Андреевич, д.ф.-м.н., Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск

Дмитриева Екатерина Владимировна, инженер, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Дмитриева Мария Юрьевна, лаборант-исследователь, Институт физических проблем имени П. Л. Капицы РАН, Москва

Ермакова Юлия Евгеньевна, инженер-проектировщик, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Жакетов Владимир Дмитриевич, Объединённый институт ядерных исследований, Дубна

Жуков Иван Владимирович, Международный томографический центр, Новосибирск

Зиятдинов Разиль Радисович, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Иванова Инна Станиславовна, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Кадикова Анеля Ханифовна, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Кирютин Алексей Сергеевич, к.х.н., Международный томографический центр, Новосибирск

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

Константинова Елизавета Александровна, д.ф.-м.н., Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Кошман Владимир Евгеньевич, м.н.с., Институт химической кинетики и горения имени В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск

Кытина Екатерина Владимировна, лаборант, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Лукзен Никита Николаевич, д.ф.-м.н., Международный томографический центр, Новосибирск

Макарченко Александр Сергеевич, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
Меньшиков Максим Евгеньевич, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
Мершиев Иван Георгиевич, инженер, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград
Мотыгина Юлия Сергеевна, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск
Мухамадуллин Булат Маратович, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
Насырова Марина Игоревна, аспирантка, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
Нефедьев Николай Алексеевич, аспирант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова РАН
Никитов Сергей Аполлонович, д.ф.-м.н., Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва
Никифоров Лев Васильевич, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
Николаев Георгий Александрович, Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка
Ощепков Александр Юрьевич, к.ф.-м.н., Пермский государственный университет, Пермь
Павленко Александр Васильевич, к.ф.-м.н., НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, Санкт-Петербург
Подаров Роман Алексеевич, Международный томографический центр, Новосибирск
Подшивалов Алексей Павлович, инженер, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия
Попов Артемий Витальевич, лаборант, Высшая школа экономики, Москва
Пулотов Жамшед Хуршидович, магистрант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
Садовникова Маргарита Александровна, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
Саенко Никита Сергеевич, м.н.с., Институт химии ДВО РАН, Владивосток
Санников Кирилл Олегович, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
Сарицкий Денис Алексеевич, м.н.с., Институт химии ДВО РАН, Владивосток
Смирнов Александр Иванович, д.ф.-м.н., Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, Москва
Солдатов Тимофей Александрович, к.ф.-м.н., Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, Москва
Тагиров Роберт Рафаилович, Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН, Москва
Травин Сергей Олегович, Институт химической физики имени Н. Н. Семёнова РАН, Москва

Туманов Вадим Александрович, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
Ульянова Майя, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск
Усеинов Ниязбек Хамзович, д.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
Файрушин Ильназ Изайлович, д.т.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
Фасхутдинова Амина Ильшатовна, студентка, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
Федин Матвей Владимирович, д.ф.-м.н., Международный томографический центр, Новосибирск
Фролов Иван Геннадьевич, Новосибирский государственный университет, Новосибирск
Циберкин Кирилл Борисович, к.ф.-м.н., Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
Цыганков Артём Алексеевич, ассистент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
Шагинян Василий Робертович, д.ф.-м.н., Петербургский институт ядерной физики имени Б. П. Константинова, Санкт-Петербург
Шайдуллина Амина, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
Шамсутдинова Эльвира Халиловна, студентка, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
Шестаков Алексей Валерьевич, к.ф.-м.н., Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН, Москва
Юрковская Александра Вадимовна, д.ф.-м.н., Международный томографический центр, Новосибирск

Спонсоры

Ared Wang, CIQTEK
Arvin Chen, CIQTEK
Elena Bogut, LACOPA LLC
Ke Xu, LACOPA LLC
Набережный Даниил, Центр технического сопровождения “Наука”
Трифонов Александр, CIQTEK
Чазов Андрей, начальник отдела спектроскопии и ФМИ, компания ELEMENT, Екатеринбург
Черкасов Антон, ведущий специалист, компания ELEMENT, Екатеринбург

Сопровождающие лица

Лю Сюецзяо, Консул Генерального консульства Китая в Казани, Казань
Си Жу, инспектор второго уровня Департамента международного сотрудничества и обменов Министерства образования КНР, Москва
Сюй Чжэцзин, начальник Отдела стран Европы и Азии Департамента международного сотрудничества и обменов Министерства образования КНР, Москва
Сян Бо, Генеральный консул Китая в Казани, Казань

Фэн Чжэнъян, Консул-атташе Генерального консульства Китая в Казани, Казань
 Цао Шихай, советник-посланник по образованию Посольства КНР в РФ, Москва
 Чжао Дань, второй секретарь по образованию Посольства КНР в РФ, Москва
 Чэнь Аохань, старший сотрудник второго уровня Департамента управления учёными степенями и послевузовского образования Министерства образования КНР, Москва
 Шань Чуаньчжицзы, сотрудник Административного офиса Департамента международного сотрудничества и обмена Министерства образования (переводчик), Москва
 Юй Вэйюе, директор Департамента преподавательских дел Министерства образования КНР, Москва
 Смирнова Татьяна
 Захарова Елена

Другие гости

Ежков Владимир Олегович, д.вет.н., Казанский государственный аграрный университет (проведение совместных исследований)
 Ежкова Асия Мезетдиновна, д.б.н., Казанский государственный аграрный университет (проведение совместных исследований)
 Подлесных Иван Михайлович, м.н.с., Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва (знакомство с лабораторией ИРВ)
 Циберкин Кирилл Борисович, к.ф.-м.н., Пермский государственный национальный исследовательский университет (доклад на заседании Учёного совета)
 Андреев Дмитрий Сергеевич, руководитель проектов, “ООО Газпромнефть – промышленные инновации”, Санкт-Петербург (обсуждение возможных направлений сотрудничества и кооперации)
 Идрисов Сергей Вячеславович, зам. генерального директора по общим вопросам, ЗАО “НЕФТЕХ”, Республика Мордовия, г. Рузаевка (обсуждение возможных направлений сотрудничества и кооперации)
 Сагиров Шамиль Ирекович, исполнительный директор, Научно-производственное объединение “Z прогресс” (обсуждение возможных направлений сотрудничества и кооперации)
 Вавилов Вячеслав Евгеньевич, научный консультант, ООО “ЭТК”, Уфа (обсуждение возможных направлений сотрудничества и кооперации)
 Подгузов Александр Александрович, генеральный директор, ООО “ЭТК”, Уфа (обсуждение возможных направлений сотрудничества и кооперации)
 Грязнов Михаил Юрьевич, проректор по науке и инновациям, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород (знакомство с институтом)
 Сулейманов Евгений Владимирович, директор Научно-исследовательский института химии, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород (знакомство с институтом)
 Усманов Айрат Марселевич, советник при ректорате, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород (знакомство с институтом)
 Гулевич Алексей Евгеньевич, ЗАО “SLS Prime Technology”, Минск, Беларусь (знакомство с тематикой исследований института)
 Шихов Максим Денисович, ЗАО “SLS Prime Technology”, Минск, Беларусь (знакомство с тематикой исследований института)
 Абуталипова Людмила Николаевна, чл.-корр. Российской инженерной академии (участие в заседании Татарстанского отделения РИА)
 Галиханов Мансур Флоридович, чл.-корр. Российской инженерной академии (участие в заседании Татарстанского отделения РИА)
 Кантюков Рафаэль Рифкатович, чл.-корр. Российской инженерной академии (участие в заседании Татарстанского отделения РИА)
 Сафин Руслан Рушанович, академический советник Российской инженерной академии (участие в заседании Татарстанского отделения РИА)
 Сахабутдинов Айрат Жавдатович, чл.-корр. Российской инженерной академии (участие в заседании Татарстанского отделения РИА)
 Тимербаев Наиль Фарирович, академический советник Российской инженерной академии (участие в заседании Татарстанского отделения РИА)
 Хамматова Венера Васильевна, действ. член Российской инженерной академии (участие в заседании Татарстанского отделения РИА)
 Якупов Нух Махмудович, чл.-корр. Российской инженерной академии (участие в заседании Татарстанского отделения РИА)

ФИЦПРЕСС
2026

ISSN 2782-4780