КАЗАНСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ИМЕНИ
Е. К. ЗАВОЙСКОГО

2016

ЕЖЕГОДНИК

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КАЗАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

КАЗАНСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ИМЕНИ Е. К. ЗАВОЙСКОГО

2016



ЕЖЕГОДНИК

ФИЗТЕХПРЕСС
ИЗДАТЕЛЬСТВО
КФТИ 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 2016.
Ежегодник. – Казань: КФТИ КазНЦ РАН, 2017. 264 с.

ISBN 978-5-94469-039-5

Под общей редакцией
К. М. Салихова и А. А. Калачёва

Редактор-составитель В. К. Воронкова

Редакционная коллегия
В. Ф. Тарасов (председатель), В. К. Воронкова (зам. председателя), С. М. Ахмин, Р. М. Баязитов, А. А. Бухараев, В. С. Лобков, Р. Ф. Мамин, Л. В. Мосина, И. В. Овчинников, В. Ю. Петухов, Ю. В. Садчиков, В. В. Самарцев, Г. Б. Тейтельбаум, И. А. Файзрахманов, Я. В. Фаттахов

Печатается по решению
Учёного совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Казанского физико-технического института имени Е. К. Завойского Казанского научного центра
Российской академии наук

В ежегоднике представлены материалы, отражающие деятельность Федерального бюджетного учреждения науки Казанского физико-технического института имени Е. К. Завойского Казанского научного центра Российской академии наук в 2016 году.

Сборник включает также некоторый справочный материал по институту.

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

ISBN 978-5-94469-039-5

© КФТИ КазНЦ РАН, 2017
© Обложка Аксёнов И.А., 2017

Ответственный редактор С. М. Ахмин
Редакторы С. М. Ахмин, В. К. Воронкова, Л. В. Мосина
Технический редактор О. Б. Яндуганова

Издательство “ФизтехПресс” КФТИ КазНЦ РАН
420029, Казань, Сибирский тракт, 10/7
Лицензия № 0325 от 7 декабря 2000 года

Подписано в печать 10.05.2017
Формат 60x90/8. Бумага мелованная
Гарнитура Times. Печать офсетная
Тираж 200 экз.

Предисловие редактора

В 2016 году нам пришлось работать в довольно сложных условиях, связанных с неопределёнными перспективами реорганизации институтов РАН. На определённой стадии в конце 2015 года возникла идея слияния КФТИ и Центра энергетических проблем в один Федеральный научный центр. Обе организации провели большую работу и сформировали Программу развития этой объединённой организации. Все это передали в ФАНО. В течение года это обращение в ФАНО осталось без движения. Теперь, когда уже прошло 3 месяца 2017 года, стало понятно, что реализуется другой план создания Федерального исследовательского центра Казанский научный центр РАН. Конечно, вопросы реорганизации институтов РАН, дискуссии вокруг этих вопросов вносят возмущение в творческую работу научных сотрудников.

Но в нашем институте есть традиции, которые позволили институту работать практически в обычном ритме, несмотря на внешние возмущения. Основные усилия сотрудников нашего института были направлены на выполнение государственных заданий научных исследований, грантов научных фондов и договорных работ. Получены новые научные результаты по квантовой оптике, спинтронике, спектроскопии электронного парамагнитного резонанса, материаловедению, физике наноразмерных систем, и др. Эти результаты отражены в материалах, представленных в этом выпуске Ежегодника КФТИ. В институте регулярно работал Учёный совет и регулярно проводились научные сессии Учёного совета, на которых весьма обстоятельно обсуждались научные результаты. Хорошей традицией стала ежегодная международная конференция “Modern Development of Magnetic Resonance”. Эта конференция позволяет нам не только обменяться опытом, узнать из первых рук о последних достижениях мировой науки в области магнитного резонанса, но и помогает позиционировать Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского РАН как центр мировой науки в области спектроскопии электронного парамагнитного резонанса. Этой же цели служит ежегодное вручение международной премии имени Е. К. Завойского.

Большим событием в жизни нашего института стало празднование 70-летия Казанского физтеха. Этому событию была посвящена специальная выездная сессия Научного совета ОФН РАН по физике конденсированного состояния. В её работе приняли участие учёные Москвы, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода. Работа этой сессии, её итоги были отражены в журнале Успехи физических наук. Таким образом, юбилей нашего Института имел хороший резонанс в Российской академии наук, и прежде всего в Отделении физических наук РАН.

Можно отметить, что резонанс вызвал и мой юбилей. Он прошёл под девизом “В 80 лет жизнь только начинается!”. Я хотел послать сигнал, что у меня много планов для творческой работы в предстоящие десятилетия.

70-летие КФТИ стало хорошим поводом для того, чтобы подумать о месте нашего Института в науке. Поэтому в 2016 году были составлены и изданы две интересные книги про Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского: Буклет об Институте и Книга с описанием важнейших результатов, полученных за последние годы. Но летописью нашего Института является, конечно, Ежегодник КФТИ, включая данный выпуск. Все эти исключительно полезные издания были подготовлены В. К. Воронковой, С. М. Ахминым, О. Б. Яндугановой, Л. В. Мосиной. Большое им спасибо.

К. М. Салихов

Слово директора

Дорогие коллеги!

Перед Вами очередной выпуск Ежегодника КФТИ, в котором традиционно нашли отражение наиболее важные события из жизни института за прошедший год. В научных статьях, подготовленных нашими сотрудниками, дано достаточно полное представление об актуальных направлениях исследований, проводимых в институте. В своём предисловии я бы хотел остановиться только на одном моменте, который, на мой взгляд, является стратегически важным. В конце 2016 года мы утвердили новые темы государственного задания на ближайшие три года. И среди них появилась одна новая – "Разработка физических основ и элементной базы квантовых оптических и спиновых технологий", в рамках которой объединяются исследования по квантовой оптике и электронному парамагнитному резонансу, выполняемые в трёх лабораториях института. Хотя исследования в этом направлении ведутся в институте уже давно, утверждение соответствующей темы является важным моментом, отражающим современные тенденции. В последние годы, при обсуждении актуальных направлений развития физики и технологий, всё чаще употребляется термин "вторая квантовая революция". И если первая была направлена на изучение и практическое применение физических законов, управляющих микромиром, и завершилась созданием целого ряда новаторских технологий, в том числе появлением транзистора, лазера и спутниковой системы навигации, то вторая квантовая революция произойдёт благодаря быстро растущим возможностям, которые предоставляют человечеству законы квантовой механики в плане создания принципиально новых структур и материалов, радикального повышения скорости обработки информации и достижения абсолютной безопасности связи. В настоящее время во многих развитых странах реализуются масштабные национальные проекты, направленные на создание квантовых технологий нового поколения. Излишне говорить, что развитие данной тематики в институте является крайне важным, а объединение вокруг неё имеющихся у нас компетенций будет способствовать получению всё более крупных исследовательских грантов и участию института в решении самых амбициозных научно-технологических задач современности.

А. А. Калачёв

Содержание

Структура института

10

Важнейшие события года

13 Казанскому физтеху – 70 лет
13 Юбилей академика К. М. Салихова

Важнейшие результаты года

15 Важнейшие результаты фундаментальных исследований, рекомендованные Учёным советом КФТИ КазНЦ РАН в отчётный доклад РАН за 2016 год
19 Итоги конкурса научных работ сотрудников КФТИ 2016 года

Научные сообщения

20 Квантовая память в изотопически чистом кристалле $YLiF_4:Nd^{3+}$
Р. А. Ахмеджанов, Л. А. Гущин, И. В. Зеленский, А. А. Калачёв, Д. А. Собгайда
23 Применение частотных гребёнок низкой чёткости для спектроскопии сверхвысокого разрешения
Р. Н. Шахмуратов
26 Новый взгляд на явление обменного сужения спектров
К. М. Салихов
31 Исследование магнитоупругого эффекта микрочастиц пермаллоя
А. А. Бухараев, Д. А. Бизяев, Ю. Е. Кандрашкин, Л. В. Мингалиева, Н. И. Нургазизов, Т. Ф. Ханипов
36 Эффект Ханле в субмиллиметровой ЭПР-спектроскопии примесных ионов тулия в синтетическом форстерите
В. Ф. Тарасов, Н. К. Соловаров
40 К алгоритму определения константы скорости спинового обмена из анализа формы спектра ЭПР раствора парамагнитных зондов
М. М. Бакиров, Р. Т. Галеев, К. М. Салихов
44 Изменение содержания оксида азота в тканях мозга лабораторных крыс после моделирования геморрагического инсульта: ЭПР исследование
В. В. Андрианов, Г. Г. Яфарова, В. С. Июдин, Х. Л. Гайнутдинов

47 Селективная спектроскопия низкочастотных межмолекулярных движений в жидкости на основе техники двухимпульсного лазерного контроля
В. Г. Никифоров, Д. К. Жарков, А. Г. Шмелев, А. В. Леонтьев, В. С. Лобков

54 Исследования датчика малых размеров для низкополевых магнитно-резонансных томографов
А. А. Баязитов, А. Р. Фахрутдинов, Я. В. Фаттахов

59 Термометрия твёрдых тел методом оптической интерферометрии на примере полиметилметакрилата и кремния
Б. Ф. Фаррахов, Я. В. Фаттахов, М. Ф. Галяутдинов, В. И. Нуждин, В. Ф, Валеев, А. Л. Степанов

62 Анализ поверхности кремния, имплантированного ионами серебра, методами спектральной эллипсометрии и дифракции отражённых электронов
В. В. Базаров, В. В. Воробьев, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Ю. Н. Осин, А. Л. Степанов

66 Устройства для разрезания твёрдотельных материалов
В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев

68 Усовершенствованное устройство для подачи жидкого азота в систему охлаждения низкотемпературного приёмника ионного ускорителя ИЛУ-3
В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Д. А. Коновалов

71 Формирование и модификация сплава GeSi с наночастицами Ag путём ионной имплантации и лазерного отжига
Р. И. Баталов, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Д. А. Бизяев, А. А. Бухараев, В. В. Воробьев, Ю. Н. Осин, А. Л. Степанов

80 Формирование сильно легированных поли- и монокристаллических слоёв n-Ge:Sb на подложках p-Ge и p-GaAs под действием мощных ионных и лазерных пучков
Р. М. Баязитов, Р. И. Баталов, Г. А. Новиков, И. А. Файзрахманов, Н. М. Лядов, В. А. Шустов, В. В. Воробьев

86 Исследование методом ЭПР особенностей обмена железа у профессиональных спортсменов
М. И. Ибрагимова, А. И. Чушников, В. Ю. Петухов

91 Магнитные свойства h-$YMnO_3$
Р. М. Ерёмина, Т. П. Гаврилова, И. В. Яцык, Д. В. Мамедов, В. А. Шустов

94 Высокочастотные спектры ЭПР иона Fe^{2+} в кристаллах синтетического берилла и природного гошенита
Г. С. Шакуров, Р. И. Хайбуллин

98 ЭПР исследование магнитных свойств новых дендримерных комплексов Fe(III) первой генерации
Н. Е. Домрачева, В. Е. Воробьёва

103 ЭПР прекурсора [Fe(Salten)Cl] в поликристаллическом состоянии и в разбавленных застеклованных растворах в ацетонитриле
Е. Н. Фролова, Т. А. Иванова, О. А. Туранова, Л. В. Мингалиева, В. А. Шустов, И. В. Овчинников

109 Сигналы ЭМР тканей спинного мозга после его травматического повреждения
С. В. Юртаева, Г. Г. Яфарова, И. В. Яцык, Х. Л. Гайнутдинов

112 О влиянии локализованных магнитных состояний на трансформацию дираковского полуметалла Cd_3As_2 в полуметалл Вейля
Ю. В. Горюнов

117 Изучение диффузии лития в новом катодном материале $Li_{0.8}[Ni_{0.6}Sb_{0.4}]O_2$ методом ЯМР
Т. М. Салихов, Э. Р. Клышева, Е. Л. Вавилова

121 ЭПР исследование магнитоупорядоченных фаз в кристаллах Bi_2Te_3, легированных марганцем
В. О. Сахин, Е. Ф. Куковицкий, Н. М. Лядов, В. А. Шустов, Н. Н. Гарифьянов, Ю. И. Таланов, Г. Б. Тейтельбаум

128 Контроль спектральных характеристик параметрического рассеяния света в нелинейных кристаллах с периодической доменной структурой
Д. О. Акатьев, А. А. Калачёв

131 Противонаправленный режим спонтанного параметрического рассеяния в нелинейном волноводе PP KTP
И. З. Латыпов, А. А. Шухин, Д. О. Акатьев, А. В. Шкаликов, А. А. Калачёв

134 Биения фотонного эха: наблюдение и применение
В. Н. Лисин, А. М. Шегеда, В. В. Самарцев

142 Теоретическое исследование спонтанного четырёхволнового смешения в суженных оптических волокнах
А. А. Шухин, А. А. Калачёв

146 Комбинационное рассеяние света красителя метилового оранжевого, осаждённого на кремнии с наночастицами серебра
В. В. Воробьев, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Ю. Н. Осин, А. Л. Степанов

150 Оптическое отражение для кремния с ионно-синтезированными наночастицами серебра
В. В. Воробьев, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Ю. Н. Осин, А. Л. Степанов

155 Способ получения алмазных дифракционных элементов методом ионной имплантации
А. Л. Степанов, М. Ф. Галяутдинов, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, В. В. Воробьев, Ю. Н. Осин, Н. В. Курбатова

Аспиранты и молодые учёные

160

80-летие К. М. Салихова

161 Кев Минуллинович Салихов. К 80-летию со дня рождения
А. Ф. Андреев, С. Н. Багаев, В. К. Воронкова, А. А. Калачёв, Ю. Н. Молин, Л. В. Мосина, И. В. Овчинников, Р. З. Сагдеев, В. Ф. Тарасов, В. В. Устинов, Ю. Д. Цветков, И. А. Щербаков

162 Репортаж с торжественного заседания, посвящённого 80-летию К. М. Салихова

165 Специальный выпуск журнала “Zeitschrift für Physikalische Chemie”, посвящённый 80-летнему юбилею профессора К. М. Салихова

170 В 80 лет жизнь только начинается!
К. М. Салихов

172 Некоторые поздравления, поступившие в адрес К. М. Салихова

Персоналии

176 Евгений Иванович Штырков. К 80-летию со дня рождения
М. Ф. Галяутдинов, Н. В. Курбатова
177 Владимир Сергеевич Лобков. К 70-летию со дня рождения
Н. В. Курбатова, В. Г. Никифоров
178 Валерий Николаевич Лисин. К 70-летию со дня рождения
В. В. Самарцев, А. А. Калачёв, Р. Н. Шахмуратов, Т. Г. Митрофанова, В. С. Романов, Н. К. Соловаров, А. В. Шкаликов, И. З. Латыпов, К. Р. Каримуллин, Д. Д. Кельина
179 Григорий Бенционович Тейтельбаум. К 70-летию со дня рождения
Н. Н. Гарифьянов, В. А. Жихарев, Ю. И. Таланов
180 Ильгиз Абдулсаматович Гарифуллин. К 70-летию со дня рождения
Н. Н. Гарифьянов, В. А. Жихарев, Ю. И. Таланов
181 Святослав Яковлевич Хлебников. К 70-летию со дня рождения
И. А. Гарифуллин, Н. Н. Гарифьянов
184 Анатолий Михайлович Шегеда. К 70-летию со дня рождения
В. В. Самарцев, А. А. Калачёв, В. Н. Лисин, Р. Н. Шахмуратов, Т. Г. Митрофанова, В. С. Романов, А. В. Шкаликов, И. З. Латыпов, Н. К. Соловаров, Д. Д. Кельина, К. Р. Каримуллин
186 Рустэм Махмудович Баязитов. К 70-летию со дня рождения
И. А. Файзрахманов
187 Памяти Максута Мухамедзяновича Зарипова
В. Ф. Тарасов, В. А. Уланов, Р. М. Ерёмина, М. Л. Фалин, Г. С. Шакуров

Научно-организационная деятельность

190 Выездная научная сессия Отделения физических наук, посвящённая 70-летию КФТИ
191 Репортаж с празднования 70-летия КФТИ
193 Выступление А. А. Калачёва на торжественном заседании 5 февраля 2016 года
195 Некоторые поздравления, поступившие в адрес института
197 О работе Учёного совета КФТИ КазНЦ РАН
В. К. Воронкова
198 Аспирантура как третья ступень высшего образования
Т. Г. Митрофанова
200 XI Международная научная школа “Наука и инновации-2016”: от фундаментальных достижений до уникальных технологических компетенций
И. И. Попов, В. В. Самарцев, К. Р. Каримуллин
203 Двадцатая Международная молодёжная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”
М. Х. Салахов, В. В. Самарцев, Д. И. Камалова
205 Annual International Conference “Modern Development of Magnetic Resonance-2016” (October 31–November 4, 2016, Kazan, Russia)
А. А. Калачёв
206 Встреча с нобелевскими лауреатами по физике
А. А. Шухин
208 Премия им. М. Л. Блатта 2016
В. Н. Лисин
209 Международная премия им. Е. К. Завойского 2016
Л. В. Мосина

210 Журнал “Applied Magnetic Resonance”
Л. В. Мосина
211 “EPR newsletter”: на пороге 15-летнего юбилея Казанской редакции издания
Л. В. Мосина
212 Репортаж с торжественного заседания, посвящённого проводам старого и встрече Нового 2017 года
Л. Г. Гафиятуллин, Т. П. Гаврилова
215 Выступление А. А. Калачёва на торжественном собрании, посвящённом проводам старого и встрече Нового года (29 декабря 2016 года)

СМИ о сотрудниках института

217 День российской науки и 70-летие Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского отметили в Казани
218 Юбилей института
220 Наука в радость
223 Премию им. Завойского вручили молодым казанским учёным
224 В Академии наук РТ двум профессорам из США вручили международную премию им. Завойского
225 Кев Салихов: “Где ещё, кроме науки, человек может полностью реализовать себя!”
227 Книга “Физическая наука в Татарстане”

Цифры и факты

228 2016 год в цифрах
229 Темы государственного задания на 2016 год
229 Проекты, финансируемые на конкурсной основе
232 Публикации сотрудников института
240 Патенты
240 Защиты, награды
241 Участие сотрудников института в преподавательской деятельности
242 Конференции, организованные КФТИ и при участии КФТИ
251 Участие сотрудников в конференциях
260 Гости института

СТРУКТУРА ИНСТИТУТА

Дирекция

Директор
Калачёв Алексей Алексеевич, д.ф.-м.н.,
профессор РАН

Зам. директора по научной работе
Мамин Ринат Файзрахманович, д.ф.-м.н.

Зам. директора по общим вопросам
Аджалиев Юнус Амзанович

Учёный секретарь
Воронкова Виолета Константиновна,
заслуженный деятель науки РТ, д.ф.-м.н.

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.
председатель
Овчинников Игорь Васильевич, д.ф.-м.н.
Воронкова Виолета Константиновна, д.ф.-м.н.
Баязитов Рустэм Махмудович, д.ф.-м.н.
Бухараев Анастас Ахметович, д.ф.-м.н.
Богданова Халида Галимзяновна, д.ф.-м.н.
Гарифуллин Ильгиз Абдулсаматович, д.ф.-м.н.
Лисин Валерий Николаевич, к.ф.-м.н.
Моисеев Сергей Андреевич, д.ф.-м.н.
Петухов Владимир Юрьевич, д.ф.-м.н.
Салихов Кев Минуллинович, д.ф.-м.н., действительный член РАН и АН РТ
Самарцев Виталий Владимирович, д.ф.-м.н.
Тарасов Валерий Фёдорович, д.ф.-м.н.
Тейтельбаум Григорий Бенционович, д.ф.-м.н.
Файзрахманов Ильдар Абдулкабирович, д.ф.-м.н.
Фаттахов Яхья Валиевич, к.ф.-м.н.
Хлебников Святослав Яковлевич, к.ф.-м.н.
Курбатова Надежда Васильевна
технический секретарь

Научные и научно-вспомогательные подразделения

Отдел химической физики
Заведующий: действительный член РАН и АН РТ, заслуженный деятель науки РФ, проф., д.ф.-м.н. Салихов Кев Минуллинович

Лаборатория спиновой физики и спиновой химии
Заведующий: заслуженный деятель науки РТ, д.ф.-м.н. Воронкова Виолета Константиновна

Лаборатория физики и химии поверхности
Заведующий: член-корр. АН РТ, заслуженный деятель науки РТ, проф., д.ф.-м.н. Бухараев Анастас Ахметович

Лаборатория быстропротекающих молекулярных процессов
Заведующий: к.ф.-м.н. Лобков Владимир Сергеевич

Лаборатория углеродных наноструктур и композитных систем
Заведующий: заслуженный деятель науки РТ, д.ф.-м.н. Сулейманов Наиль Муратович

Лаборатория квантовой оптики и информатики
Заведующий: заслуженный деятель науки РТ, д.ф.-м.н. Моисеев Сергей Андреевич

Отдел медицинской физики
Заведующий: к.ф.-м.н. Фаттахов Яхъя Валиевич

Лаборатория методов медицинской физики
Заведующий: к.ф.-м.н. Фаттахов Яхъя Валиевич

Отдел радиационных воздействий на материалы
Заведующий: заслуженный деятель науки РТ, д.ф.-м.н. Файзрахманов Ильдар Абдулкабирович

Лаборатория радиационной физики
Заведующий: заслуженный деятель науки РТ, д.ф.-м.н. Файзрахманов Ильдар Абдулкабирович

Лаборатория интенсивных радиационных воздействий
Заведующий: заслуженный деятель науки РТ, д.ф.-м.н. Баязитов Рустэм Махмудович

Лаборатория радиационной химии и радиобиологии
Заведующий: заслуженный деятель науки РТ, проф., д.ф.-м.н. Петухов Владимир Юрьевич

Лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков
Заведующий: заслуженный деятель науки РТ, проф., д.ф.-м.н. Тарасов Валерий Фёдорович

Лаборатория молекулярной радиоспектроскопии
Заведующий: заслуженный деятель науки РФ и РТ, проф., д.ф.-м.н. Овчинников Игорь Васильевич

Лаборатория физики перспективных материалов
Заведующий: заслуженный деятель науки РТ, проф., д.ф.-м.н. Тейтельбаум Григорий Бенционович

Лаборатория нелинейной оптики
Заведующий: академик РАЕН, заслуженный деятель науки РФ и РТ, проф., д.ф.-м.н. Самарцев Виталий Владимирович

Лаборатория физического приборостроения
Заведующий: к.ф.-м.н. Садыков Марат Фердинандович

Лаборатория моделирования физико-механических процессов и систем имени С. К. Черникова
Заведующий: к.т.н. Садчиков Юрий Викторович

Группа нанооптики и наноплазмоники
Заведующий: д.ф.-м.н. Степанов Андрей Львович

Отдел криогенной техники
Заведующий: к.ф.-м.н. Хлебников Святослав Яковлевич

Группа информационной безопасности, телекоммуникационных и сетевых технологий
Руководитель: к.ф.-м.н. Коновалов Дмитрий Александрович

Научно-техническая библиотека
Заведующая: Фалина Гульшат Эльгизовна

Редакционно-издательская группа
Руководитель группы на общественных началах: действительный член РАН и АН РТ, заслуженный деятель науки РФ, проф., д.ф.-м.н. Салихов Кев Минуллинович

Научно-организационный отдел
Руководитель: учёный секретарь Воронкова Виолета Константиновна

Службы

Приёмная
Секретарь директора:
Губайдуллина Альфия Закировна

Бухгалтерия
Главный бухгалтер:
Гусева Раиса Рафаиловна

Финансово-экономическая группа
Руководитель (главный экономист):
Голенева Валентина Михайловна

Группа по работе с кадрами и режиму
Руководитель: Мухтасарова Халима Лутфулловна

Аспирантура
Заведующий: к.ф.-м.н. Валидов Айдар Азатович

Канцелярия
Заведующая: Куркина Нина Георгиевна

Группа по охране труда и технике безопасности (ОТ и ТБ)
Инженер по ОТ и ТБ: Хлебникова Альбина Фердинандовна
Инженер по гражданской обороне и чрезвычайным ситуциям: Галеева Фарида Габидиновна

Административно-хозяйственная часть
Зав. хозяйством: Куприянова Ольга Олеговна

Группа по эксплуатации зданий
Руководитель (главный энергетик):
Аджалиева Зухра Тазиевна

Экспериментальная мастерская, группа текущего ремонта и инвентаризации зданий и сооружений
Руководитель: Смекалов Леонид Георгиевич

Группа по организации государственных закупок
Вед. инженер: Воронова Лариса Васильевна

Контрактный управляющий
Авхадиева Нина Васильевна

Гараж
Механик: Лукин Иван Тимофеевич

ВАЖНЕЙШИЕ СОБЫТИЯ ГОДА

Казанскому физтеху – 70 лет

Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского отмечал своё 70-летие по традиции в начале февраля 2016 года. 4-го февраля в конференц-зале КФТИ на Сибирском тракте состоялась выездная сессия ОФН. В Казань приехали учёные из Москвы, Черноголовки, Нижнего Новгорода и Санкт-Петербурга. От нашего института на сессии выступили А. А. Калачёв и К. М. Салихов. Доклады, представленные на сессии, вызвали большой интерес научного сообщества г. Казани. Праздник науки состоялся.

Юбилей КФТИ, как важное событие для всей Республики Татарстан, отмечали на торжественном собрании Академии наук РТ, посвящённом Дню российской науки. Собрание состоялось 5 февраля в канун праздника Дня науки. Заместитель премьер-министра РТ Шайхразиев Василь Габтелгаязович, поздравляя всё научное сообщество республики с праздником, особо остановился на достижениях и успехах Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского. За достигнутые успехи и в связи с 70-летием институт был награждён Благодарственным письмом Президента Республики Татарстан.



Момент вручения Благодарственного письма Президента РТ.

Юбилей академика К. М. Салихова

3 ноября 2016 года исполнилось 80 лет со дня рождения и более 55 лет педагогической, научной и научно-организационной деятельности доктора физико-математических наук, профессора, действительного члена Российской академии наук и Академии наук Республики Татарстан, лауреата Ленинской и государственной премий, научного руководителя Казанского физико-технического института имени Е. К. Завойского Казанского научного центра Российской академии наук Кева Минуллиновича Салихова.

К. М. Салихов – выдающийся российский учёный с мировым именем в области теории импульсной спектроскопии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и теоретической химической физики. Полученные им теоретические результаты оказали существенное влияние на формирование и развитие новой области науки – спиновой химии.

С 1988 года по 2015 год Кев Минуллинович успешно руководил в должности директора Казанским физико-техническим институтом им. Е. К. Завойского. С приходом К. М. Салихова существенно обновился приборный парк по радиоспектроскопии, пришла новая культура исследований: импульсные технологии, времяразрешённый ЭПР, ЯМР- и ЭПР-томография. В институте начали развиваться новые направления исследований: спиновая химия, фемтосекундная спектроскопия, атомно-силовая и сканирующая туннельная микроскопия, квантовая информатика и квантовые вычисления с использованием



Премьер-министр РТ
И. Ш. Халиков поздравляет
К. М. Салихова с юбилеем.

электронных спинов. В этот период в институте был создан отдел химической физики, который с момента создания и по настоящее время возглавляет К. М. Салихов.

Диссертационный совет по защитам кандидатских и докторских диссертаций, кафедра химической физики, международный журнал “Applied Magnetic Resonance”, ежегодная международная конференция “Современные достижения магнитного резонанса”, международная премия имени Е. К. Завойского, низкополевые магнитно-резонансные томографы, которые успешно эксплуатируются в поликлиниках РТ – это то, чем по праву гордится институт, и за что физтех благодарен Кеву Минуллиновичу.

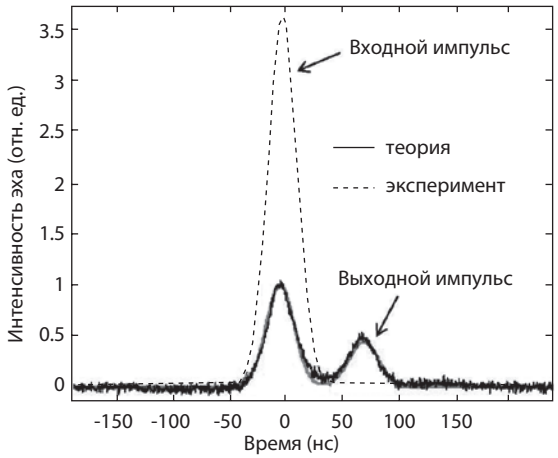
Юбилей К. М. Салихова стал важным событием для института и всего научного сообщества. К юбилею была приурочена Неделя науки в Казани “Горизонты магнитного резонанса”. Для участия в Неделе науки приехали учёные со всего мира: Австрия, Австралия, Великобритания, Бельгия, Германия, Израиль, Новая Зеландия, Нидерланды, Турция, Франция, Чехия, США, Япония и российские учёные из Москвы, Черноголовки, Санкт-Петербурга, Калининграда, Нижнего Новгорода, Красноярска, Новосибирска, Ижевска. Завершилась Неделя науки чествованием академика К. М. Салихова.

ВАЖНЕЙШИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГОДА

Важнейшие результаты фундаментальных исследований, рекомендованные Учёным советом КФТИ КазНЦ РАН в отчётный доклад РАН за 2016 год

1.

Реализация протоколов квантовой оптической памяти в изотопически чистом кристалле $^{143}Nd^{3+}:Y^7LiF_4$



Запись и воспроизведение слабого светового импульса длительностью 25 нс с помощью атомной частотной гребёнки, имеющей период 16 МГц, соответствующий времени задержки 60 нс. Атомная частотная гребёнка приготовлена на одном из оптических переходов примесных ионов неодима-143 в кристалле Y^7LiF_4, имеющем неоднородную ширину 70 МГц при концентрации примесных ионов 0.005 ат.%.

Аннотация. Впервые реализованы протоколы оптической квантовой памяти на основе атомной частотной гребёнки в изотопически чистом кристалле $YLiF_4$, обогащённом изотопом лития-7 и легированном примесными ионами неодима-143. Запись и воспроизведение слабых световых импульсов впервые реализована с использованием атомных частотных гребёнок, имеющих двойной период по частоте, а также с использованием перестраиваемого резонатора, находящегося в криостате при температуре жидкого гелия. Достигнута общая эффективность протокола квантовой памяти 12%.
Руководитель: Калачёв А.А. (КФТИ КазНЦ РАН)
Исполнители: Ахмеджанов Р.А., Гущин Л.А., Зеленский И.В., Собгайда Д.А. (КФТИ КазНЦ РАН; ИПФ РАН, Н. Новгород)
Публикации:

1. Akhmedzhanov R.A., Gushchin L.A., Kalachev A.A., Korableva S.L., Sobgayda D.A., Zelensky I.V.: Atomic frequency comb memory in an isotopically pure $^{143}Nd^{3+}:Y^7LiF_4$ crystal. Laser Phys. Lett. **13**, no. 1, 015202 (1–5) (2016)
2. Akhmedzhanov R.A., Gushchin L.A., Kalachev A.A., Nizov N.A., Nizov V.A., Sobgayda D.A., Zelensky I.V.: Cavity-assisted atomic frequency comb memory in an isotopically pure $^{143}Nd^{3+}:Y^7LiF_4$ crystal. Laser Phys. Lett. **13**, no. 11, 115203 (1–5) (2016)

2.

Возможность генерации спин-поляризованного тока в сверхпроводящем слое

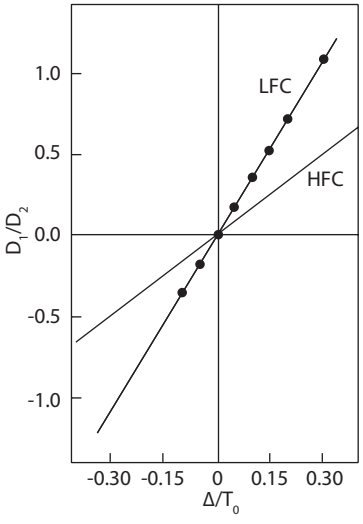
Аннотация. Обнаружен минимум в зависимости температуры сверхпроводящего перехода тонкоплёночной гетероструктуры Fe1/Fe2/Pb от угла между намагниченностями ферромагнитных слоёв железа Fe1 и Fe2. Установлено, что минимум обусловлен возникновением триплетной компоненты в куперовском конденсате. Последнее означает возможность генерации спин-поляризованного тока в сверхпроводящем слое, что будет использоваться при разработке элементной базы сверхпроводниковой спинтроники.
Руководитель: Гарифуллин И.А. (КФТИ КазНЦ РАН)
Исполнители: Гарифуллин И.А., Гарифьянов Н.Н., Лексин П.В., Камашев А.А., Валидов А.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Фоминов Я.В. (ИТФ РАН им. Л. Д. Ландау РАН, МФТИ), Шуманн Й., Катаев В., Клингелер Р., Шмидт О.Г., Бюхнер Б., Томас Й. (Институт твёрдого тела и материаловедения (IFW) Дрезден, Германия)

Публикации:

1. Leksin P.V., Garif'yanov N.N., Garifullin I.A., Fominov Ya.V., Schumann J., Krupskaya Y., Kataev V., Schmidt O. G., Büchner B.: Evidence for triplet superconductivity in a superconductor-ferromagnet spin valve. Phys. Rev. Lett. **109**, 057005 (2012)
2. Leksin P.V., Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Garifullin I.A., Fominov Ya., Schumann J., Hess C., Kataev V., Büchner B.: Peculiarities of performance of the spin valve for the superconducting current. Письма в ЖЭТФ **97**, 549 (2013)
3. Leksin P.V., Garif'yanov N.N., Kamashev A.A., Fominov Ya.V., Schumann J., Hess C., Kataev V., Büchner B., Garifullin I.A.: Superconducting spin-valve effect and triplet superconductivity in CoO_x/Fe1/Cu/Fe2/Cu/Pb multilayer. Phys. Rev. B **91**, 214508 (2015)
4. Leksin P.V., Kamashev A.A., Schumann J., Kataev V.E., Thomas J., Büchner B., Garifullin I.A.: Boosting the superconducting spin valve effect in a metallic superconductor/ferromagnet heterostructure. Nano Research **9**, 1005–1011 (2016)
5. Leksin P.V., Garif'yanov N.N., Kamashev A., Validov A.A., Fominov Ya.V., Schumann J., Kataev V., Thomas J., Büchner B., Garifullin I.A.: Isolation of proximity-induced triplet pairing channel in a superconductor/ferromagnet spin valve. Phys. Rev. B **93**, 100502(R) (1–5) (2016)

3.

Применение частотных гребёнок низкой чёткости для спектроскопии сверхвысокого разрешения



Зависимость отношения амплитуд первой D_1 и второй D_2 гармоник осцилляции интенсивности от резонансной расстройки Δ. Γ_0 – однородная ширина линии. LFC-результат для низкочастотной фазовой модуляции.

Аннотация. Развит новый метод спектроскопии, позволяющий определять резонансные частоты квантовых переходов с точностью до одной сотой естественной ширины линии поглощения. Метод основан на низкочастотной фазовой модуляции излучения, преобразующей его спектр в гребёнку с частотным интервалом меньшим ширины линии поглощения. Фильтрация такого излучения резонансной средой приводит к осцилляциям интенсивности. Вдали от точного резонанса основной вклад дают первая и вторая гармоники осцилляций. В точном резонансе остаётся только вклад второй гармоники. Исследуя частотный состав модуляции интенсивности излучения, можно определить резонансную частоту перехода с высокой точностью.

Руководитель: Шахмуратов Р.Н. (КФТИ КазНЦ РАН)

Исполнители: Вагизов Ф.Г. (КФУ), Скалли М.О., Кочаровская О. (T&M University, USA)

Публикация:

Shakhmuratov R.N., Vagizov F.G., Scully M.O., Kocharovskaya O.: Phys. Rev. A **94**, no. 4, 043849 (1–8) (2016)

4.

Развитие теории формы спектров магнитного резонанса с учётом переноса спиновой когерентности, вызванного случайным процессом релаксации

Аннотация. Развита последовательная теория формы спектров магнитного резонанса с учётом переноса спиновой когерентности, вызванного случайным процессом релаксации. Эта теория дала, в частности, последовательное описание известного в спектроскопии эффекта обменного сужения спектров. Общий подход, сформулированный в нашей работе, применён для детального исследования спинового обмена между парамагнитными зондами в растворах. Дан детальный теоретический анализ проявления спинового обмена между стабильными нитроксильными радикалами в стационарных спектрах электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). На основании полученных результатов предложен новый алгоритм определения скорости переноса спиновой когерентности из анализа формы спектров ЭПР. Этот алгоритм успешно применён для анализа изученных нами экспериментально трансформаций спектров ЭПР нитроксильных радикалов при изменении концентрации радикалов. Развитая в этой работе последовательная теория дала толчок для постановки новых опытов, поиска новых протоколов эксперимента, которые позволят с большей точностью определять скорости переноса спиновой квантовой когерентности из данных спектроскопии магнитного резонанса.

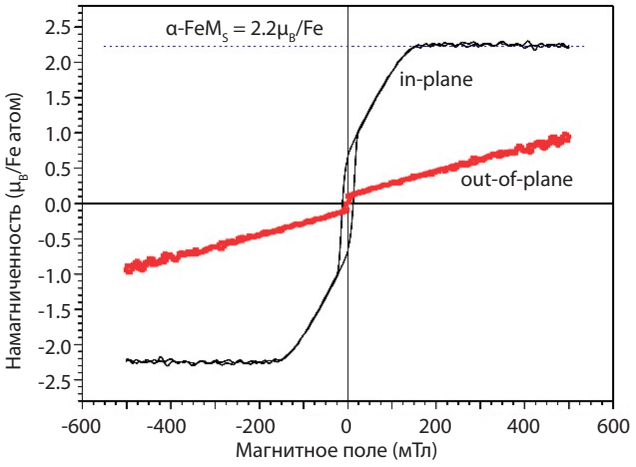
Руководитель: Салихов К.М. (КФТИ КазНЦ РАН)

Публикации:

1. Salikhov K.M., Bakirov M.M., Galeev R.T.: Detailed analysis of manifestations of the spin coherence transfer in EPR spectra of ^{14}N nitroxide free radicals in non-viscous liquids. Appl. Magn. Reson. **47**, iss. 10, 1095–1122 (2016)
2. Salikhov K.M.: Consistent paradigm of the spectra decomposition into independent resonance lines. Appl. Magn. Reson. **47**, iss. 11, 1193–1205 (2016)

5.

Впервые методом ионно-стимулированного осаждения получены тонкие плёнки нанокристаллического железа, проявляющие перпендикулярную к поверхности одноосную магнитную анизотропию и полосовую доменную структуру



Кривые намагничивания тонкой плёнки Fe^{57}, регистрируемые при комнатной температуре, как в плоскости (in-plane), так и перпендикулярно (out-of-plane) к плоскости плёнки.

Аннотация. Обнаружено, что тонкие (~100 нм) плёнки железа, полученные методом ионно-стимулированного осаждения, проявляют ряд особенностей в структуре и магнитных характеристиках. Плёнки представляют собой наноструктурированный материал, состоящий из нанометровых (~10 нм) кристаллитов α-Fe и межкристаллитной неупорядоченной среды (фазы) железа. Плёнки характеризуются микронапряжениями растяжения, величина которых более чем на порядок превышает предел пластической деформации массивного железа. Кривые намагничивания плёнок, регистрируемые при комнатной температуре, как в плоскости, так и перпендикулярно к плоскости плёнки свидетельствуют о наличии перпендикулярной к поверхности плёнки одноосной магнитной анизотропии. Плёнки проявляют полосовую магнитную доменную структуру. Термический отжиг в вакууме ведёт к кристаллизации плёнки, снятию микронапряжений, и отожжённые образцы проявляют типичное для кристаллических плёнок железа магнитное поведение.

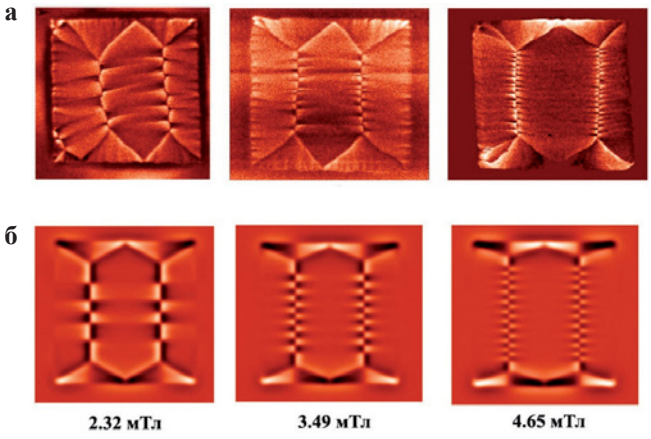
Исполнители: Лядов Н.М., Хайбуллин Р.И., Файзрахманов И.А., Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Шустов В.А. (КФТИ Казнц РАН)

Публикации:

1. Lyadov N.M., Bazarov V.V., Vagizov F.G., Vakhitov I.R., Dulov E.N., Kashapov R.N., Noskov A.I., Khaibullin R.I., Shustov V.A., Faizrakhmanov I.A.: Structural and magnetic studies of thin Fe^{57} films formed by ion beam assisted deposition. Appl. Surf. Sci. **378**, 114–119 (2016)
2. Лядов Н.М., Базаров В.В., Вагизов Ф.Г., Шустов В.А., Дулов Е.Н., Носков А.И., Хайбуллин Р.И., Файзрахманов И.А.: Анализ структуры и магнитно-фазового состава плёнок Fe^{57}, сформированных по технологии ионно-стимулированного осаждения. Сб. материалов XIV Междунар. конф. “Мёссбауэровская спектроскопия и её применения”, с. 90. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2016.

6.

Магнитоупругий эффект в микрочастицах пермаллоя



МСМ изображения (экспериментальные (**а**) и смоделированные (**б**)), отражающие трансформацию доменной структуры микрочастицы пермаллоя размером 25×25×0.3 мкм^3 при увеличении наведённой сжатием магнитоупругой анизотропии с 2.32 до 4.65 мТл.

Аннотация. С помощью двух независимых методов – ферромагнитного резонанса (ФМР) и магнитно-силовой микроскопии (МСМ) – исследован магнитоупругий эффект в микрочастицах пермаллоя. Из анализа спектров ФМР получены значения поля эффективной магнитоупругой анизотропии, индуцированной механическим сжатием микрочастиц. С использованием этих данных смоделированы МСМ изображения напряжённых и ненапряжённых микрочастиц, которые хорошо совпадают с экспериментальными МСМ изображениями. Продемонстрировано, что при сжатии микрочастиц происходит существенное снижение порога формирования в них однородной намагниченности под воздействием внешнего магнитного поля. Актуальность полученных результатов обусловлена возможностью их использования при создании запоминающих ячеек и логических элементов стрейнтроники.

Руководитель: Бухараев А.А. (КФТИ КазНЦ РАН)

Исполнители: Бизяев Д.А., Кандрашкин Ю.Е., Мингалиева Л.В., Нургазизов Н.И., Ханипов Т.Ф. (КФТИ КазНЦ РАН)

Публикации:

1. Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Кандрашкин Ю.Е., Мингалиева Л.В., Нургазизов Н.И., Ханипов Т.Ф.: Магнитоупругий эффект в микрочастицах пермаллоя. Письма в ЖТФ **42**, 24–32 (2016)
2. Chuklanov A.P., Nurgazizov N.I., Bizyaev D.A., Khanipov T.F., Bukharaev A.A., Petukhov V.Yu., Chirkov V.V., Gumarov G.G.: Investigation of strain-induced magnetization change in ferromagnetic microparticles. J. Phys. C **714**, 012006 (2016)
3. Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Нургазизов Н.И., Ханипов Т.Ф.: Исследование трансформации доменной структуры при механической деформации микрочастиц пермаллоя. Сб. статей XX Междунар. молодёжной науч. школы "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия" (Салахов М.Х., ред.), с. 57–60. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2016.

Важнейшие результаты, готовые к практическому применению

Способ получения алмазных дифракционных элементов методом ионной имплантации

Аннотация. Предложена новая методика формирования оптических дифракционных элементов на поверхности алмаза, основанная на низкоэнергетической высокодозовой имплантации алмаза ионами бора через маску. Показано, что в процессе имплантации в немаскированных областях облучаемого алмаза происходит его графитизация. Формирование периодических графитизированных микроструктур на поверхности алмаза контролировалось методами оптической, электронной, конфокальной и атомно-силовой микроскопии, а также рамановской спектроскопией. Периодически изменяемые комплексные показатели преломления дифракционных элементов обеспечиваются чередующимися областями необлученного алмаза и графитизированных микроструктур. Эффективность функционирования дифракционного алмазного элемента продемонстрирована при его зондировании излучением гелий-неонового лазера. Основным практическим применением полученных результатов является развитие ключевого направления фотоники по созданию новых эффективных элементов алмазной интегральной оптики.

Руководитель: Степанов А.Л. (груп. нанооптики и нанофотоники)

Исполнители: Галяутдинов М.Ф. (лаб. квантовой оптики и информатики), Нуждин В.И. (лаб. радиационной физики), Валеев В.Ф. (лаб. радиационной физики), Курбатова Н.В. (лаб. быстропротекающих молекулекулярных процессов)

Соисполнители: Осин Ю.Н. (КФУ), Воробьев В.В. (КФУ)

Публикации:

1. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Галяутдинов М.Ф., Курбатова Н.В., Воробьев В.В., Осин Ю.Н.: Алмазная дифракционная решётка, Патент РФ № 166144 (2016)
2. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Галяутдинов М.Ф., Курбатова Н.В., Валеев В.Ф., Воробьев В.В., Осин Ю.Н.: Создание дифракционной решётки на алмазной подложке имплантацией ионами бора. Письма в ЖТФ **43**, вып. 2, 38–44 (2017)
3. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Галяутдинов М.Ф.: Алмазная дифракционная решётка. Сб. статей "Наноструктуры в конденсированных средах", с. 243–248. Минск: ИТМО НАН Беларуси 2016.
4. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Галяутдинов М.Ф., Курбатова Н.В., Валеев В.Ф., Воробьев В.В., Осин Ю.Н.: Алмазная тонкоплёночная дифракционная решётка. Сб. статей конф. АН РТ "Развитие научных исследований в рамках взаимодействия Российского фонда фундаментальных исследований и Академии наук Республики Татарстан", посвящённой 25-летию образования Академии наук Республики Татарстан. Казань 2016.

Итоги конкурса научных работ сотрудников КФТИ 2016 года

В рамках ежегодной итоговой конференции КФТИ КазНЦ РАН проведён конкурс научных работ за 2016 год.

По итогам конкурса в области фундаментальных исследований присуждены одно первое и одно второе место:

1-е место:

– Тарасов В.Ф., Соловаров Н.К. (КФТИ КазНЦ РАН), Жариков Е.В. (ИОФ РАН, Москва): Эффект Ханле в субмиллиметровой ЭПР-спектроскопии примесных ионов тулия в синтетическом форстерите

2-е место:

– Калачёв А.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Ахмеджанов Р.А., Гущин Л.А., Зеленский И.В. (КФТИ КазНЦ РАН; ИПФ РАН, Н. Новгород), Кораблёва С.Л. (КФУ), Собгайда Д.А. (КФТИ КазНЦ РАН; ИПФ РАН, Н. Новгород): Квантовая память в изотопически чистом примесном кристалле $YLiF_4:Nd^{3+}$

На итоговой конференции молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН был проведён конкурс научных работ за 2016 год.

Конкурсная комиссия в составе: Вавилова Е.Л., Валидов А.А., Хантимеров С.М., присудила две премии.

– Жарков Д.К.: Когерентный лазерный контроль молекулярной динамики в бензонитриле
– Ягфарова А.Р. (студентка КФУ, кафедра квантовой электроники и радиоспектроскопии): Структура и магнитные свойства композитных материалов $(SrFe_{12}O_{19})_x(CaCu_3Ti_4O_{12})_{1-x}$

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

Квантовая память в изотопически чистом кристалле $YLiF_4:Nd^{3+}$

Р. А. Ахмеджанов, Л. А. Гущин, И. В. Зеленский, А. А. Калачёв, Д. А. Собгайда

Лаборатория нелинейной оптики

Обсуждаются результаты экспериментальной реализации оптической квантовой памяти на основе атомной частотной гребёнки в кристалле $YLiF_4$, обогащённом изотопом ^7Li и легированном ионами Nd^{3+} изотопа ^{143}Nd.

Введение

Создание оптической квантовой памяти (КП) является одной из основных задач квантовых информационных технологий, поскольку устройства, способные записывать и воспроизводить квантовые состояния света, необходимы для реализации масштабируемых квантовых вычислений [1] и дальнодействующей квантовой связи [2]. В настоящее время ведутся интенсивные разработки различных вариантов оптической КП, в основе которых лежит взаимодействие слабых световых импульсов с многоатомными системами (см. обзоры [3–8]). В качестве последних наиболее перспективными считаются примесные кристаллы, активированные редкоземельными ионами [9], поскольку при низких температурах они имеют большие времена фазовой релаксации как на оптических, так и на спиновых переходах примесных ионов, предоставляя при этом широкие возможности по управлению частотами переходов с помощью внешних электрических или магнитных полей, а также по интегрированию в оптические схемы. На сегодня наибольшее время хранения записанной информации (до одной минуты) продемонстрировано в кристалле $Y_2SiO_5:Pr^{3+}$ [10], а наибольшее время фазовой релаксации на спиновом переходе (до 6 часов) – в кристалле $Y_2SiO_5:Eu^{3+}$ [11]. Большой интерес вызывают также изотопически чистые примесные кристаллы, активированные редкоземельными ионами. Моноизотопный состав как самой матрицы, так и примесных частиц, позволяют достичь предельных значений времён фазовой релаксации и оптической плотности. Кроме того, такие кристаллы могут иметь очень малое неоднородное уширение оптических переходов, что позволяет реализовать в твёрдых телах схемы квантовой памяти, основанные на нерезонансном рамановском взаимодействии [12–17]. Примером такого материала является кристалл $YLiF_4$, обогащённый изотопами ^7Li и легированный трёхвалентными ионами эрбия или неодима. При малых концентрациях примесных частиц неоднородная ширина оптических переходов в этом кристалле уменьшается до ~10 МГц, что является, пожалуй, наименьшей величиной, наблюдаемой в примесных кристаллах. В настоящей статье обсуждаются первые эксперименты по реализации протоколов квантовой памяти в кристалле $Y^7LiF_4:^{143}Nd^{3+}$, представленные в работах [18, 19].

Основные результаты

В работах [18, 19] был реализован протокол оптической квантовой памяти, основанный на использовании атомной частотной гребёнки [20, 21]. Суть протокола проиллюстрирована на рис. 1. Сначала с помощью оптической накачки в пределах неоднородно уширенной резонансной линии примесных ионов создаётся эквидистантная система линий поглощения – атомная частотная гребёнка. При поглощении слабого оптического импульса (например, однофотонного) на резонансном переходе возбуждаются осциллирующие дипольные моменты, которые периодически сфазируются и расфазируются благодаря эквидистантности спектра. В результате, на выходе из резонансной среды, в общем случае, будет наблюдаться серия оптических импульсов – откликов эха, которую можно рассматривать как модулированный сигнал свободной световой индукции. Подбирая значение оптической

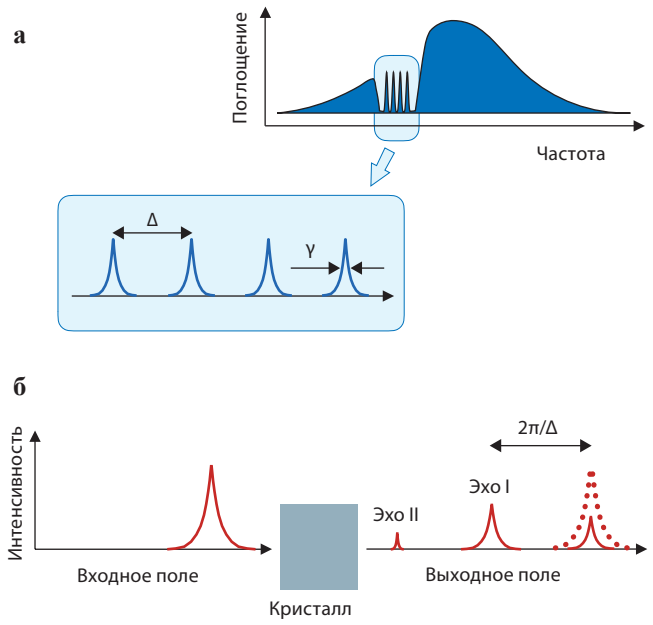


Рис. 1. Атомная частотная гребёнка (**а**) и последовательность импульсов, наблюдаемая после действия на кристалл слабого оптического импульса (**б**). Временной интервал между выходными импульсами равен $2\pi/\Delta$, где Δ – период атомной частотной гребёнки. В случае оптимальной оптической толщины кристалла $d/(\Delta/\gamma) \approx 2$, где d – оптическая толщина без частотной гребёнки, энергия первого импульса эха (Эхо I) составляет 54% от энергии входного импульса, а все оставшиеся выходные импульсы слабы.

толщины и параметров гребёнки можно добиться того, чтобы первый импульс эха содержал максимальную долю энергии входного импульса, а последующие импульсы были слабыми. Такая ситуация равносильна задержке входного импульса на время, равное интервалу между импульсами, что и соответствует эффекту памяти. В данном случае время задержки определяется периодом атомной частотной гребёнки, а эффективность памяти, равная отношению средней энергии первого импульса эха к средней энергии импульса на входе, ограничена величиной 54%, если кристалл не находится в резонаторе. Однако, используя перенос оптической когерентности на сверхтонкие подуровни основного электронного состояния примесных ионов, можно воспроизводить оптический импульс с большей задержкой [22]. Кроме того, можно поместить кристалл в резонатор [23–26] и таким образом снять ограничение по эффективности.

Кристалл Y^7LiF_4:$^{143}Nd^{3+}$, который использовались в экспериментах [18, 19], был выращен С. Л. Кораблёвой (КФУ). Концентрация примесных ионов составляла 0.005 ат.%, при этом доля изотопа лития-7 в матрице была равна 99.7%, а доля изотопа неодима-143 – 96.5%. В данном кристалле удалось продемонстрировать неоднородную ширину оптических переходов 70–90 МГц. В результате, в спектре поглощения хорошо разрешались линии, соответствующие переходам между различными сверхтонкими подуровнями основного и возбуждённого электронных состояний. Методом спектрального выжигания провалов была определена величина эффективного однородного уширения оптических переходов, которая получилась равной 5 МГц. При этом было обнаружено, что на некоторых оптических переходах при воздействии узкополосного лазера накачки вместо простой структуры спектрального провала шириной 5 МГц создавались провалы с частотной гребёнкой, имеющей период ~2.5 МГц и ширину пиков ~1 МГц. Возникновение данных структур, скорее всего, связано с суперсверхтонким взаимодействием ионов неодима, находящимися в возбуждённом состоянии, с окружающими ионами фтора. Подобные структуры наблюдаются и в основном состоянии ионов неодима методами ЭПР, но имеют существенно больший период. Кроме того, методом накачка-зондирование исследовалась динамика затухания спектральных провалов на различных оптических переходах. Пучок накачки создавал провал и после контролируемого времени задержки на образец посылался пробный пучок, частота которого сканировалась при помощи акусто-оптического модулятора. На всех исследуемых переходах наблюдалось быстрое и затем медленное перераспределение населённости. Для наиболее сильного оптического перехода время быстрого спада оказалось равным 840 мкс, а время медленного спада – 57 мс. Наличие двух временных масштабов предположительно связано с различной скоростью релаксации сверхтонких подуровней основного состояния примесных ионов $^4I_{9/2}$.

В первом эксперименте [18] использовался кристалл без резонатора (длина 1 см, оптическая толщина 2) и были реализованы три варианта частотной гребёнки: а) с частотным периодом 16 МГц, который определяется возбуждением лазерными импульсами на разных частотах; б) с частотным периодом 2.5 МГц, который определяется взаимодействиями ионов в кристалле и не требует возбуждения лазерными импульсами на разных частотах (“естественная” гребёнка); в) с двойным периодом по частоте (комбинация обоих типов). В первом случае достигнута эффективность 12%, а в случае решётки с двойным периодом продемонстрировано испускание сигналов фотонного эха с двумя временными задержками. Во втором эксперименте [19] реализован протокол оптической квантовой памяти на частотной гребёнке в кристалле, находящемся в резонаторе. Кристалл имел оптическую толщину 0.1 и помещался в перестраиваемый конфокальный резонатор длиной 8 мм, имеющий резкость около 7.8. Впервые подобный эксперимент проведён с использованием перестраиваемого конфокального резонатора, находящегося в криостате при температуре жидкого гелия. Достигнутая эффективность записи и воспроизведения составила 3%, что в 15 раз превышает эффективность протокола квантовой памяти в том же кристалле в отсутствии резонатора. Экспериментальное значение эффективности хорошо согласуется с теоретической оценкой.

Заключение

Впервые реализованы протоколы оптической квантовой памяти на основе атомной частотной гребёнки в изотопически чистом кристалле $YLiF_4$, обогащённом изотопом лития-7 и легированном примесными ионами неодима-143. Запись и воспроизведение слабых световых импульсов впервые реализована с использованием атомных частотных гребёнок, имеющих двойной период по частоте, а также с использованием перестраиваемого резонатора, находящегося в криостате при температуре жидкого гелия. В эксперименте с оптически толстым кристаллом без резонатора достигнута общая эффективность протокола квантовой памяти 12%, а в эксперименте с оптически тонким кристаллом, находящимся в резонаторе, достигнуто увеличение эффективности памяти в 15 раз.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 14-12-00806).

Литература

1. Kok P., Munro W.J., Nemoto K., Ralph T.C., Dowling J.P., Milburn G.J.: Rev. Mod. Phys. **79**, 135–174 (2007)
2. Sangouard N., Simon C., de Riedmatten H., Gisin N.: Rev. Mod. Phys. **83**, 33–80 (2011)
3. Lvovsky A.I., Sanders B.C., Tittel W.: Nature Photonics **3**, 706–714 (2009)
4. Hammerer K., Sørensen A.S., Polzik E.S.: Rev. Mod. Phys. **82**, 1041–1093 (2010)
5. Tittel W., Afzelius M., Chanelière T., Cone R.L., Kröll S., Moiseev S.A., Sellars M.: Laser Photonics Rev. **4**, 244–267 (2010)
6. Simon C., Afzelius M., Appel J., Boyer de la Giroday A., Dewhurst S.J., Gisin N., Hu C.Y., Jelezko F., Kröll S., Müller J.H., Nunn J., Polzik E.S., Rarity J.G., De Riedmatten H., Rosenfeld W., Shields A.J., Sköld N., Stevenson R.M., Thew R., Walmsley I.A., Weber M.C., Weinfurter H., Wrachtrup J., Young R.J.: Eur. Phys. J. D **58**, 1–22 (2010)
7. Bussières F., Sangouard N., Afzelius M., de Riedmatten H., Simon C., Tittel W.: Journal of Modern Optics **60**, 1519–1537 (2013)
8. Heshami K., England D.G., Humphreys P.C., Bustard P.J., Acosta V.M., Nunn J., Sussman B.J.: Journal of Modern Optics **63**, 2005–2028 (2016)
9. Thiel C.W., Böttger T., Cone R.L.: Journal of Luminescence **131**, 353–361 (2011)
10. Heinze G., Hubrich C., Halfmann T.: Phys. Rev. Lett. **111**, 033601(1-5) (2013)
11. Zhong M., Hedges M.P., Ahlefeldt R.L., Bartholomew J.G., Beavan S.E., Wittig S.M., Longdell J.J., Sellars M.J.: Nature **517**, 177–180 (2015)
12. Nunn J., Walmsley I.A., Raymer M.G., Surmacz K., Waldermann F.C., Wang Z., Jaksch D: Phys. Rev. A **75**, 011401(1-4) (2007)
13. Moiseev S.A. Tittel W.: New J. Phys. **13**, 063035(1-11) (2011)
14. Moiseev S.: Phys. Rev. A **88**, 012304(1-9) (2013)
15. Zhang X., Kalachev A., Kocharovskaya O.: Phys. Rev. A **87**, 013811(1-9) (2013)
16. Kalachev A., Kocharovskaya O.: Phys. Rev. A **88**, 033846(1-7) (2013)
17. Zhang X., Kalachev A., Kocharovskaya O.: Phys. Rev. A **90**, 052322(1-8) (2014)
18. Akhmedzhanov R.A., Gushchin L.A., Kalachev A.A., Korableva S.L., Sobgayda D.A., Zelensky I.V.: Laser Phys. Lett. **13**, 015202(1-5) (2016)
19. Akhmedzhanov R.A., Gushchin L.A., Kalachev A.A., Nizov N.A., Nizov V.A., Sobgayda D.A., Zelensky I.V.: Laser Phys. Lett. **13**, 115203(1-4) (2016)
20. de Riedmatten H., Afzelius M., Staudt M.U., Simon C., Gisin N.: Nature **456**, 773–777 (2008)
21. Afzelius M., Simon C., de Riedmatten H., Gisin N.: Phys. Rev. A **79**, 052329(1-9) (2009)
22. Afzelius M., Usmani I., Amari A., Lauritzen B., Walther A., Simon C., Sangouard N., Minář J., de Riedmatten H., Gisin N., Kröll S.: Phys. Rev. Lett. **104**, 040503(1-4) (2010)
23. Afzelius M., Simon C.: Phys. Rev. A **82**, 022310(1-4) (2010)
24. Moiseev S.A., Andrianov S.N., Gubaidullin F.F.: Phys. Rev. A **82**, 022311(1-6) (2010)
25. Sabooni M., Li Q., Kröll S., Rippe L.: Phys. Rev. Lett. **110**, 133604(1-5) (2013)
26. Jobez P., Usmani I., Timoney N., Laplane C., Gisin N., Afzelius M: New J. Phys. **16**, 083005(1-14) (2014)

Применение частотных гребёнок низкой чёткости для спектроскопии сверхвысокого разрешения

Р. Н. Шахмуратов

Лаборатория нелинейной оптики

Развит новый метод спектроскопии, который позволяет измерять частоты резонансных переходов с высокой точностью. Метод основан на фазовой модуляции излучения с частотой меньшей ширины линии поглощения исследуемой среды. Применение метода требует использование оптически плотных сред. Нами проведено экспериментальное измерение резонансной частоты с точностью до одной сотой ширины линии. В принципе, увеличивая время наблюдения, можно измерить частоту и с существенно большей точностью. Прецизионное измерение резонансных частот актуально в исследованиях постоянства фундаментальных констант, измерении гравитационного красного смещения и метрологии.

Излучение, спектр которого представляет собой эквидистантную серию линий одинаковой ширины, называют частотными гребёнками. Если частотный интервал гребёнки больше спектральной ширины отдельной линии, то гребёнка обладает высокой чёткостью. Частотные гребёнки высокой чёткости применяются для измерения частот излучения в широком интервале, простирающемся от инфракрасного до ультрафиолетового диапазонов частот [1, 2]. Также эти гребёнки применялись для точного измерения частот переходов между состояниями ядра в гамма диапазоне [3–5].

В оптическом диапазоне частот частотные гребёнки создаются с помощью синхронизации мод лазера с последующей стабилизацией получаемой последовательности импульсов. В гамма области частотные гребёнки создаются с помощью механических колебаний источника излучения по отношению к поглотителю, спектральные линии которого исследуется создаваемой гребёнкой. Такой способ измерения частот обладает большей точность по сравнению со стандартными методами мёссбауэровской спектроскопии. Суть метода гамма-гребёнок заключается в том, что механические колебания источника (или поглотителя) приводят к модуляции фазы излучения, наблюдаемого поглотителем:

$$E_S(t-t_0) \propto \theta(t-t_0) \times \exp(-\mathrm{i}\omega_S + \Gamma_0/2)(t-t_0) + \mathrm{i}kz + \mathrm{i}\varphi(t), \quad (1)$$

где ω_S и k – частота и волновой вектор излучения, z – расстояние от источника до поглотителя, Γ_0 – скорость распада возбуждённого состояния ядра в источнике, $\theta(t-t_0)$ – ступенчатая функция Хэвисайда, t_0 – момент времени формирования возбуждённого состояния ядра в источнике, $\varphi(t) = ka_z(t)$ – фаза излучения, изменяющаяся благодаря периодическим колебаниям положения источника по отношению к поглотителю с частотой Ω и амплитудой a_0: $a_z(t) = a_0\cos\Omega t$.

Электромагнитное поле (1) можно представить в виде полихроматического излучения с набором частот $\omega_S - n\Omega$ ($n = 0, \pm1, \pm2, \pm3, \ldots$):

$$E_S(t-t_0) = E_C(t-t_0)\exp(-\mathrm{i}\omega_S(t-t_0) + \mathrm{i}kz) \times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(m)\exp(\mathrm{i}n\Omega t), \quad (2)$$

где $E_C(t-t_0) = E_0\theta(t-t_0)\exp(-\Gamma_0(t-t_0)/2)$ – общая часть компонент поля, E_0 – амплитуда поля, $J_n(m)$ – функция Бесселя n-го порядка и $m = ka_0$ – индекс модуляции фазы излучения. Фурье образ поля (2) имеет вид частотной гребёнки:

$$E_S(\omega) = E_0\sum_{n=-\infty}^{+\infty}\frac{J_n(m)\exp(\mathrm{i}kz + \mathrm{i}n\Omega t_0)}{\Gamma_0/2 + \mathrm{i}(\omega_S - n\Omega - \omega)}. \quad (3)$$

Если частотный интервал гребёнки Ω намного превышает ширину линии излучения Γ_0, то гребёнка обладает высокой чёткостью.

Перлоу и Монахан [3, 4] предложили метод наблюдения осцилляций гамма-излучения, прошедшего через оптически толстый образец. Они показали, что число фото-отсчётов детектора, регистрирующего фотоны на выходе из поглотителя, осциллирует во времени и эти осцилляции можно описать с помощью формулы:

$$N(t) = N_0\sum_{n=0}^{\infty} D_n\cos[n\Omega(t-t_n)], \quad (4)$$

где D_n и $n\Omega t_n$ определяют амплитуду и фазу n-ой гармоники осцилляций. В случае, если частота излучения источника ω_S точно совпадает с резонансной частотой поглотителя ω_A, то амплитуда осцилляции фото-отсчётов первой гармоники D_1 точно равна нулю. С ростом величины отстройки от резонанса $\Delta = \omega_A - \omega_S$ отношение амплитуд первой и второй гармоник осцилляций изменяется линейным образом (см. рис. 1).

Появление осцилляций интенсивности излучения после прохождения через резонансную среду обязано интерференции амплитуд нулевой и первой гармоник частотной

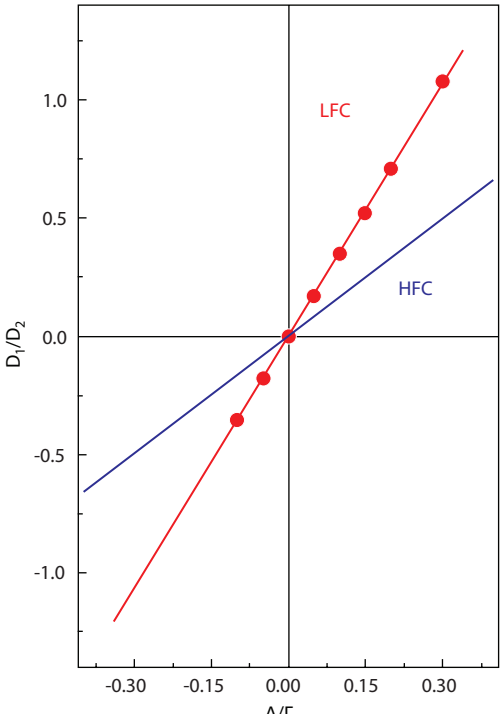


Рис. 1. Теоретическая зависимость отношения амплитуд первой ко второй гармонике осцилляций интенсивности излучения, прошедшего через колеблющуюся среду, от отстройки несущей частоты излучения от резонансной частоты поглотителя Δ. Синей линией показана зависимость для гребёнки высокой чёткости (HFC - high frequency comb) с частотным интервалом Ω = 10 МГц, который на порядок превышает ширину одиночной линии поглощения. Красной линией показана зависимость для гребёнки низкой чёткости (LFC - low frequency comb) с частотным интервалом Ω = 200 кГц в пять раз меньшим ширины линии поглощения. Точками на этой зависимости показаны результаты экспериментальных измерений.

гребёнки (2). Обычно простая фазовая модуляция излучения не приводит к модуляции интенсивности излучения. Чтобы перевести фазовую модуляцию в модуляцию интенсивности необходимо ввести дополнительные изменения амплитуд и фаз спектральных компонент частотной гребёнки (3). Эти изменения происходят в результате фильтрации излучения резонансной средой. В случае частотной гребёнки высокой чёткости в основном изменяется центральная компонента (n = 0), которая находится в резонансе или её частота близка к резонансной частоте поглотителя. Анализ [3, 4] показал, что амплитуда первой гармоники осцилляций интенсивности D_1 пропорциональна произведению $J_0(m)J_1(m)$, поскольку она возникает благодаря интерференции изменённой амплитуды нулевой гармоники, пропорциональной $J_0(m)$, и неизменённой амплитуды первой гармоники, пропорциональной $J_1(m)$. Произведение $J_0(m)J_1(m)$ имеет первый максимум при значении индекса модуляции m равном 1.08. Это оптимальное значение индекса модуляции, при котором достигается наибольшая чувствительность и следовательно точность измерения резонансной частоты поглотителя с помощью частотных гребёнок высокой чёткости.

Нами предложено использовать частотные гребёнки низкой чёткости, для которых выполняется соотношение $\Omega << \Gamma_0$ [6]. Для них число спектральных компонент, участвующих во взаимодействии с резонансной средой, значительно больше. Поэтому их чувствительность к выполнению условий точного резонанса значительно выше по сравнению с частотными гребёнками высокой чёткости.

Мы получили аналитические выражения для амплитуд и фаз гармоник осциллирующей интенсивности излучения:

$$N(t)/N_0 = I_0(\Delta) + 2\,\mathrm{Re}\sum_{n=1}^{+\infty} I_n(\Delta)\exp(\mathrm{i}n\Omega t)\,, \qquad (5)$$

$$I_0(\Delta) = J_0^2(m)B_{00}(\Delta) + \sum_{n=1}^{+\infty} J_n^2(m)[B_{nn}(\Delta) + B_{(-n)(-n)}(\Delta)]\,, \qquad (6)$$

$$I_1(\Delta) = \sum_{n=0}^{+\infty} J_n(m)J_{n+1}[B_{n(n+1)}(\Delta) - B_{(-n-1)(-n)}(\Delta)]\,, \qquad (7)$$

$$I_2(\Delta) = -J_1^2(m)B_{-11}(\Delta) + \sum_{n=1}^{+\infty} J_n(m)J_{n+2}(m)[B_{n(n+2)}(\Delta) + B_{(-n-2)(-n)}(\Delta)]\,, \qquad (8)$$

где коэффициенты $B_{nk}(\Delta)$ описывают изменение амплитуд и фаз спектральных компонент гребёнки (3) после прохождения через поглотитель. Для поглотителя с одиночной линией поглощения, имеющей ширину $\Gamma_A = \Gamma_0$, эти коэффициенты описываются формулой:

$$B_{nk}(\Delta) = \frac{\Gamma_S}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp\left[-\dfrac{b}{\Gamma_A/2 + \mathrm{i}(\Delta + n\Omega - \omega)} - \dfrac{b}{\Gamma_A/2 - \mathrm{i}(\Delta + k\Omega - \omega)}\right]}{(\Gamma_S/2)^2 + \omega^2}\,\mathrm{d}\omega\,, \qquad (9)$$

где $b = fn_A\sigma\Gamma_0/4$, f – фактор Дебая-Валлера, n_A – концентрация резонансных ядер в поглотителе и σ – сечение резонансного поглощения одного ядра.

Сравнение зависимости отношения D_1/D_2 от отстройки от резонанса Δ для частотной гребёнки низкой чёткости, у которой $\Omega = \Gamma_0/5$ и индекс модуляции m равен 5.7, с зависимостью D_1/D_2 для частотной гребёнки высокой чёткости с параметрами $\Omega = 10\Gamma_0$ и m = 1.08 показано на рис. 1. В обоих случаях параметр b, который зависит от толщины поглотителя, равен $1.3\Gamma_0$. Для гребёнки низкой чёткости мы взяли индекс модуляции m = 5.7, при котором интервал частот $m\Omega$, покрываемый спектральными компонентами со значимыми амплитудами, почти равен ширине линии поглощения Γ_A. В этом случае почти все компоненты гребёнки изменяются после прохождения через фильтр и поэтому их интерференция наблюдается в виде осцилляций интенсивности излучения, регистрируемого

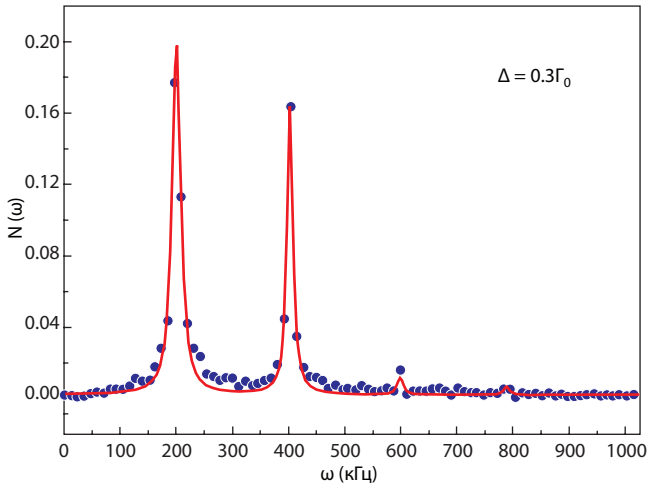


Рис. 2. Спектр экспериментально наблюдаемых осцилляций фото-отсчётов излучения, прошедшего через колеблющийся поглотитель. Вертикальная шкала приведена в относительных единицах.

детектором. Поскольку для гребёнки низкой чёткости в формировании осцилляций участвует намного большее число спектральных компонент по сравнению с гребёнкой высокой чёткости, увеличение амплитуды первой гармоники с ростом отстройки от резонанса происходит намного быстрее чем для гребёнки высокой чёткости.

Мы экспериментально исследовали чувствительность предлагаемого метода с использованием радиоактивных ядер кобальта 57, внедрённых в родиевую матрицу, в качестве источника излучения гамма-квантов с энергией 14.4 кэВ. В качестве поглотителя мы использовали фольгу нержавеющей стали с естественным содержанием ядер железа 57, которые в этой матрице имеют одиночную линию поглощения из основного в возбуждённое состояние с энергией 14.4 кэВ. Фольга, толщиной 25 мкм, была приклеена к полимерному пьезо-преобразователю, толщиной 28 мкм. Под действием переменного напряжения, подаваемого из радиочастотного генератора, пьезо-преобразователь создавал колебания фольги с частотой 200 кГц вдоль направления распространения гамма-квантов. Ширина линии излучения источника составляла 1.13 МГц. Напряжение подбиралось таким, чтобы получить индекс модуляции $m = 5.7$. Результаты Фурье анализа наблюдаемых осцилляций числа фото-отсчётов излучения во времени после прохождения через колеблющуюся фольгу показаны на рис. 2 для случая $\Delta = 0.3\Gamma_S$. Из рисунка видно, что основной вклад в сигнал дают первая и вторая гармоники, в то время как вклад третьей гармоники едва различим. На рис. 1 точками показаны значения отношения D_1/D_2 для разных значений отстройки частоты излучения от резонансной частоты поглотителя.

Таким образом, мы теоретически и экспериментально показали, что использование гребёнок низкой чёткости даёт большую точность измерения резонансной частоты поглощения образца по сравнению с гребёнками высокой чёткости. В нашем эксперименте удалось измерить резонансную частоту с точностью до одной сотой однородной ширины линии поглощения. Поскольку регулярный сигнал растёт с увеличением времени наблюдения как N, где N число зарегистрированных фото-отсчётов, а шум растёт как $N^{-1/2}$, то можно ожидать, что увеличивая время наблюдения можно ещё на порядок увеличить точность измерения резонансных частот поглощения.

Работа выполнена совместно с доцентом Казанского Федерального Университета Ф. Г. Вагизовым.

Литература

1. Hänsch T. W.: Passion for Precision, Nobel lecture, December 8, 2005.
2. Hall J.L.: Defining and Measuring Optical Frequencies: the Optical Clock Opportunity - and More, Nobel lecture, December 8, 2005.
3. Perlow G.J.: Phys. Rev. Lett. **40**, 896 (1978)
4. Monahan J.E., Perlow G.J.: Phys. Rev. A **20**, 1499 (1979)
5. Helistö P., Ikonen E., Katila T., Potzel W., Riski K.: Phys. Rev. B **30**, 2345 (1984)
6. Shakhmuratov R.N., Vagizov F.G., Scully M.O., Kocharovskaya O.: Phys. Rev. A **94**, 143849(1-8) (2016)

Новый взгляд на явление обменного сужения спектров

К. М. Салихов

Отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Развит подход анализа спектров в условиях, когда релаксационные процессы индуцируют не только потерю квантовой когерентности, но и индуцируют перенос квантовой когерентности. Подход основан на нахождении коллективных мод эволюции квантовой когерентности в многоуровневых системах. Показано, что в условиях обменного сужения спектра в эксперименте проявляется только одна коллективная мода, остальные моды практически не проявляются.

Введение

В спектроскопии магнитного резонанса довольно часто наблюдается явление коллапса сложного спектра поглощения в одну узкую линию, которое получило название обменного сужения спектра. В качестве хорошо известных примеров можно отметить трансформации спектров ЭПР, вызванные спиновым обменом между парамагнитными частицами при их парных столкновениях в разбавленных растворах [1], или трансформации спектров ЯМР, вызванные химическим обменом, например, в результате обратимой мономолекулярной изомеризации молекул [2]. Интересным примером может служить также случайная миграция электронов в результате случайных перескоков с одной молекулы на другую [3]. Надо отметить, что речь идет об обменном сужении спектра, которое индуцируется переносом спиновой когерентности в ходе случайных процессов, например, столкновения частиц, изомеризации молекул, которые приводят к парамагнитной релаксации.

Для иллюстрации обсуждаемых в этой статье трансформаций спектров рассмотрим простейшую модель обратимого химического обмена. Рассмотрим молекулы А с одним протоном. Предположим, что есть два изомера А1 и А2, которые отличаются химическими сдвигами резонансной частоты протона. Предположим, что в начальный момент приготавливается смесь, содержащая одинаковое количество А1 и А2 изомеров, и что происходит случайная обратимая изомеризация молекул:

$$\mathrm{A1} \underset{K}{\overset{K}{\rightleftharpoons}} \mathrm{A2},$$

где K – скорость изомеризации молекул.

При "замораживании" изомеризации, т.е. $K = 0$, в спектре ЯМР протонов должны наблюдаться две резонансные линии на частотах ω_1 и ω_2. Изомеризация сокращает время жизни молекул в том или другом изомерном состоянии, поэтому при $K \neq 0$ резонансные линии должны уширяться в соответствии с соотношением неопределённости для энергии и времени жизни состояния. При этом уширение линий $\Delta\Omega \sim K$. Но хорошо известно, с ростом K не происходит просто уширения линий. При $K >> |\omega_1 - \omega_2|$ наблюдаемый спектр ЯМР протона трансформируется в одну линию в центре тяжести $\omega_{ср} = (\omega_1 + \omega_2)/2$. Таким образом, с ростом скорости изомеризации молекул K частоты, на которых наблюдается резонанс, сдвигаются к центру тяжести спектра. Когда K сравнивается с начальным расщеплением, $K \sim |\omega_1 - \omega_2|$, происходит коллапс спектра в одну линию, причём эта линия проявляет замечательное свойство: её ширина уменьшается с ростом K. При $K \to \infty$, когда время жизни каждого изомерного состояния стремится к нулю, скорость изомеризации молекул перестаёт проявляться в ширине наблюдаемого резонанса. Это удивительно! Возникает вопрос, что собой представляет суженная линия: является ли она суммой двух узких линий резонансного поглощения или наблюдается только один резонанс? Если это сумма двух резонансных линий, то это какой-то вариант вырожденного резонанса. А если наблюдаемая линия описывает один резонанс, то получается, что в условиях сужения спектра происходит сокращение числа резонансов, что невозможно.

В этой работе проведено детальное исследование трансформаций спектров, вызванных переносом когерентности в ходе случайных процессов, ответственных за парамагнитную релаксацию. С этой целью проанализированы две точно решаемые модели с двумя и тремя резонансными частотами. Для анализа использован метод нахождения коллективных мод эволюции квантовой когерентности в многоуровневых системах, который был предложен автором статьи при написании книги [1], но до недавнего времени не привлекал внимания исследователей. В [1] теоретически было предсказано, что в области сравнительно медленного спинового обмена между спиновыми зондами в растворах (это соответствует условию $K << |\omega_1 - \omega_2|$ для приведённой выше модели) отдельные резонансные линии в спектре поглощения должны неизбежно представлять смесь поглощения и дисперсии. Это предсказание было сделано в [1] в результате нахождения коллективных мод эволюции спинов в рамках теории возмущений в пределе медленного спинового обмена. Этот вклад дисперсии был экспериментально многократно подтверждён [4, 5]. Это

стимулировало дальнейшее развитие подхода, основанного на нахождении коллективных мод спиновой эволюции с учётом случайных процессов парамагнитной релаксации, не только в области относительно медленного переноса спиновой когерентности, но и в области быстрого переноса спиновой когерентности, когда наступает обменное сужение спектров [6].

В работе [6] сформулирован общий формализм и дано точное решение задачи проявления переноса когерентности в форме спектра для простейших моделей.

Здесь приводятся основные положения и дополнительные комментарии к новой интерпретации явления обменного сужения спектров, которая была развита в [6].

Общий формализм расчётов формы спектра с учётом переноса когерентности, индуцированного спиновой релаксацией

Анализ спектров поглощения обычно проводят следующим образом. На первом этапе для независящего от времени гамильтониана системы $\boldsymbol{H}_0$ решают уравнение Шредингера

$$\boldsymbol{H}_0\Psi_n = E_n\Psi_n. \quad (1)$$

Взаимодействие $\boldsymbol{H}$ спинов с переменным электромагнитным полем H может вызвать переходы между стационарными состояниями системы (ур.(1)). Интенсивность этих переходов определяется матричным элементом перехода

$$H_{nk} = \langle\Psi_n|\boldsymbol{H}|\Psi_k\rangle. \quad (2)$$

Если $H_{nk} \neq 0$, то на частоте внешнего поля $\omega = (E_n - E_k)/\hbar$ ожидается резонансный пик в спектре поглощения, интенсивность которого пропорциональна $|H_{nk}|^2$.

На втором этапе начинают учитывать влияние релаксации на форму спектров. Если когерентности отдельных переходов релаксируют независимо, то с ростом скорости релаксации пропорционально растёт ширина резонансных линий в соответствии с соотношением неопределённостей. Но в рамках такого подхода непросто объяснить наблюдаемые сдвиги частот резонансов, коллапс всех линий в одну узкую резонансную линию.

Сдвиги линий и явление коллапса спектра в узкую линию связаны с тем, что в ходе релаксации возможен перенос когерентности. Это означает, что соответствующие разным переходам когерентности оказываются связанными между собой. В такой ситуации когерентности отдельных $n \leftrightarrow k$ переходов эволюционируют не независимо, но можно ввести коллективные переменные – суперпозиции когерентностей отдельных $n \leftrightarrow k$ переходов, которые действительно являются независимыми переменными.

Общая схема нахождения таких коллективных мод эволюции когерентности состоит в следующем.

В упоминавшихся выше ситуациях спинового и химического обмена известны кинетические уравнения, которые описывают связанную эволюцию квантовых когерентностей на разных разрешённых переходах между стационарными состояниями независящего от времени гамильтониана $\boldsymbol{H}_0$.

Введём вектор $\boldsymbol{M}$, компоненты которого равны квантовым когерентностям на разных переходах для $\boldsymbol{H}_0$. Отметим, что для спинов 1/2 вектор $\boldsymbol{M}$ имеет одну компоненту $M = M_x - iM_y$, где M_x и M_y являются поперечными компонентами намагниченности. Кинетическое уравнение для $\boldsymbol{M}$ имеет вид [1, 7]

$$\partial\boldsymbol{M}/\partial t - \boldsymbol{L}\boldsymbol{M} = -i\gamma B_1\boldsymbol{M}_{eq}. \quad (3)$$

Здесь $\boldsymbol{L}$ – линейный лиувиллевский оператор, который описывает спиновую динамику и спиновую релаксацию. Правая часть(3) описывает взаимодействие с внешним переменным магнитным полем B_1, $\boldsymbol{M}_{eq}$ – это z-проекция равновесной намагниченности.

В пределе линейного отклика форма спектра даётся выражением $J = -\mathrm{Im}\sum M_k$, где M_k находятся из решения следующего уравнения:

$$\boldsymbol{L}\boldsymbol{M} - i\gamma B_1\boldsymbol{M}_{eq} = 0. \quad (4)$$

Обычно решают эту систему уравнений, рассчитывают спектр, **J**, и интерпретируют полученную форму спектра.

Однако, для понимания физики явления сужения спектра в области быстрого переноса когерентности следует применить другой подход [1, 6], основанный на нахождении коллективных независимых мод эволюции вектора квантовой когерентности $\boldsymbol{M}$. Для этого находим собственные значения $\{\lambda_k\}$ оператора эволюции $\boldsymbol{L}$, решив уравнение

$$|\boldsymbol{L} - \lambda\boldsymbol{I}| = 0, \quad (5)$$

где $\boldsymbol{I}$ – единичный оператор. Каждому собственному значению соответствует собственный вектор x_k, который удовлетворяет уравнению

$$\boldsymbol{L}\boldsymbol{x}^{(k)} = \lambda_k\boldsymbol{x}^{(k)}. \quad (6)$$

Эти собственные вектора являются суперпозицией квантовых когерентностей различных $n \leftrightarrow k$ переходов. Эти собственные вектора являются независимыми коллективными модами эволюции квантовых когерентностей системы. Каждая коллективная мода, в принципе, может дать эффект резонансного отклика на внешнее воздействие на частоте, которая равна мнимой части соответствующего собственного значения λ_k, а реальная часть λ_k определяет ширину резонанса. Наблюдаемый спектр поглощения является суммой независимых вкладов резонансных откликов коллективных мод на воздействие внешнего переменного поля. Остается найти, как внешнее поле возбуждает каждую коллективную моду [8]. Для этого надо найти матрицу $\boldsymbol{X}$, совершающую преобразование подобия от матрицы $\boldsymbol{L}$ к диагональной матрице $\boldsymbol{X}^{-1}\boldsymbol{L}\boldsymbol{X}$. Соответственно надо преобразовать вектор $\boldsymbol{F}$, который

описывает действие внешнего возмущения $\boldsymbol{F} \equiv i\gamma B_1 \boldsymbol{M}_{eq}$ (см. (4)). После преобразования этот вектор задаётся как $\boldsymbol{F^*} = i\gamma B_1 \boldsymbol{X}^{-1}\boldsymbol{M}_{eq}$. Аналогичным образом преобразуется также вектор $\boldsymbol{M}$ при переходе к коллективным модам, $\boldsymbol{M^*} = \boldsymbol{X}^{-1}\boldsymbol{M}$. В результате вклад коллективных мод в наблюдаемый спектр задаётся величинами

$$M^*_k = F^*_k/\lambda_k. \quad (7)$$

Резонансный эффект наблюдается, когда $Abs(\lambda_k)$ принимает минимальное значение. Отметим, что λ_k имеют вид $\lambda_k = (-i(\omega_k - \omega) - \Delta\Omega_k)$. Мнимая часть λ_k определяет частоту резонанса ω_k, а реальная часть задаёт "ширину" резонанса.

Вклад коллективных мод в спектр определяется компонентами вектора $\boldsymbol{F^*}$. Было показано [4, 6], что в общем случае $F_k = c_k + if_k$. В результате получаем, что вклад отдельной коллективной моды в спектр поглощения равен

$$J_k^* = -ImM_k^* = (f_k\Delta\Omega_k - c_k(\Omega_k - \omega))/((\Omega_k - \omega)^2 + \Delta\Omega_k{}^2). \quad (8)$$

Отсюда видно, что в общем случае резонанс коллективной моды представляет собой смесь лоренцевской линии поглощения и лоренцевской линии дисперсии. Следуя описанному алгоритму, в работе [6] был проведён детальный анализ проявления переноса когерентности в форме наблюдаемого спектра магнитного резонанса для двухчастотной и трёхчастотной модели.

Здесь приводятся наиболее интересные наблюдения, сделанные в работе [6].

Двухчастотная модель

Двухчастотная ситуация может реализоваться во многих системах. Для примера, рассмотрим разбавленный раствор стабильных свободных радикалов, в которых неспаренный электрон взаимодействует только с одним магнитным ядром со спином $I = 1/2$. Константа сверхтонкого взаимодействия (СТВ) равна a. Весь ансамбль радикалов можно разбить на два подансамбля с разными проекциями ядерного спина на направление внешнего постоянного магнитного поля. Предположим, что перенос когерентности индуцируется обменным и диполь-дипольным взаимодействиями. Когерентности спинов, относящихся к двум подансамблям радикалов, описываются кинетическими уравнениями

$$\partial M_{1-}/\partial t = (-i(\omega_0 + a/2 - \omega) - \Gamma)M_{1-} - WM_{1-} + VM_{2-} - i(1/2)\,\omega_1 M_0,$$

$$\partial M_{2-}/\partial t = (-i(\omega_0 - a/2 - \omega) - \Gamma)M_{2-} - WM_{2-} + VM_{1-} - i(1/2)\omega_1 M_0. \quad (9)$$

Слагаемые с W описывают необратимую релаксацию спиновой когерентности, а слагаемые с V описывают перенос когерентности, вызванные обменным и диполь-дипольным взаимодействием. Поэтому W и V пропорциональны концентрации радикалов. Параметр Γ описывает вклад таких механизмов релаксации, которые не приводят к переносу когерентности. В этой ситуации имеем

$$\boldsymbol{L} = \{\{-i\,(\omega_0 + a/2 - \omega) - \Gamma - W,V\},\ \{V, -i(\omega_0 - a/2 - \omega) - \Gamma - W\}\}. \quad (10)$$

Собственные значения $\boldsymbol{L}$ равны

$$\lambda_1 = -i(\omega_0 - \omega) - R/2 - \Gamma - W,\ \lambda_2 = -i(\omega_0 - \omega) + R/2 - \Gamma - W. \quad (11)$$

где $R \equiv (-a^2 + 4V^2)^{1/2}$.

Если скорость переноса когерентности пренебрежимо мала, $V \approx 0$, расстояние между двумя линиями в спектре равно константе a. В области $2\,|V| < |a|$ расщепление линий в спектре равно $(a^2 - 4V^2)^{1/2}$, т.е. расщепление линий стремится к нулю при приближении к критической скорости переноса когерентности $|V_c| = |a|/2$. При этом оба резонанса имеют одинаковую ширину равную $W + \Gamma$.

В области $|V| \geq |a|/2$ имеются также два резонанса. Частоты этих резонансов совпадают, но они имеют разные ширины: $\Delta\Omega_\pm \approx W + \Gamma \pm (1/2)R$. Когда $2|V| >> |a|$, ширины линий можно приближенно представить как $\Delta\Omega_\pm \approx W + \Gamma \pm (V - a^2/(8V))$. Один из резонансов оказывается сравнительно узким, $\Delta\Omega_- \approx W - V + \Gamma + a^2/(8V)$. Если вклад диполь-дипольного взаимодействия мал по сравнению со вкладом обменного взаимодействия, то $W = V$. В этой ситуации $\Delta\Omega_- \approx \Gamma + a^2/(8V) \rightarrow \Gamma$, и ширина резонанса перестаёт зависеть от спинового обмена. Этот эффект хорошо известен как обменное сужение спектров [1]. Если вкладом диполь-дипольного взаимодействия нельзя пренебречь, то $\Delta\Omega_- \approx W - V + \Gamma + a^2/(8V) \rightarrow W - V + \Gamma$.

Второй резонанс имеет большую ширину $\Delta\Omega_+ \approx W + V + \Gamma - a^2/(8V) \rightarrow W + V + \Gamma$.

Таким образом в условиях обменного сужения, спектр состоит из двух линий с одинаковой частотой резонанса, но одна из них узкая линия, а другая широкая.

Собственные значения оператора L дают информацию о частоте и ширине резонансных возбуждений системы. Но форма резонансных линий и интегральная интенсивность резонансного отклика разных коллективных мод зависит от того, как внешнее поле возбуждает эти коллективные моды, т.е. от величин F^*_k (см. (7)). Расчёты, проведённые по описанному в предыдущем разделе алгоритму, приводят к результату

$$\boldsymbol{F^*} = i\gamma B_1 \boldsymbol{X}^{-1}\boldsymbol{M}_{eq} = (i\gamma B_1/2)M_0\{(-2V - ia + R)/(2R),\ (2V + ia + R)/(2R)\}. \quad (12)$$

В условиях обменного сужения, когда скорость переноса когерентности $V > a/2$,

$$\boldsymbol{F^*} \approx (i\gamma B_1/2)M_0\{(-ia/(4V),\ 1 + ia/(4V)\} \rightarrow \{(-i0(a/(4V)),\ \mathbf{1} + i(0)(a/(4V))\}. \quad (13)$$

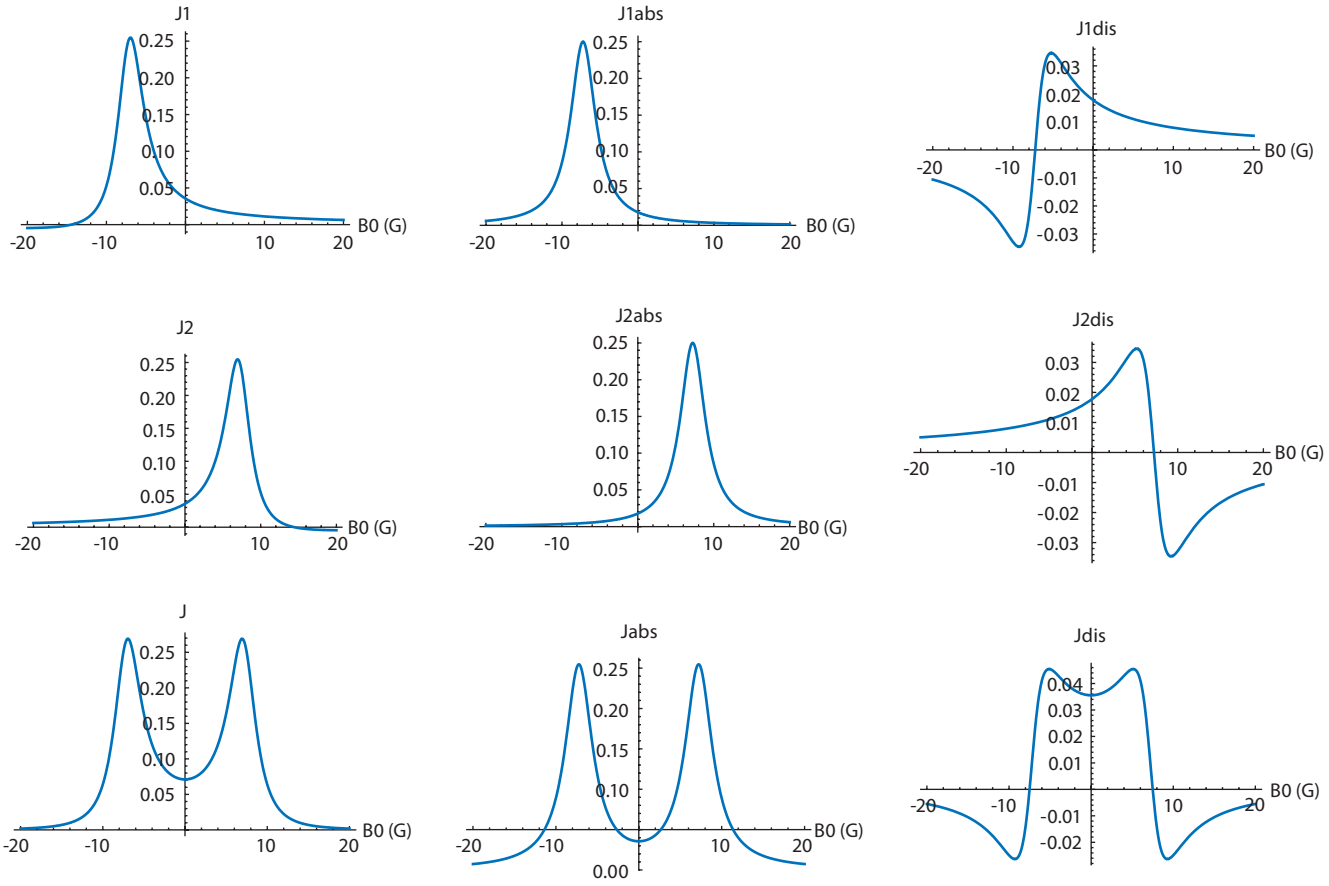


Рис. 1. Вклад в ЭПР спектр коллективной моды с частотой $\omega_0 + (a^2 - 4V^2)^{1/2}/2$ (верхний ряд кривых) и $\omega_0 - (a^2 - 4V^2)^{1/2}/2$ (средний ряд кривых) и суммарный вклад обеих коллективных мод, $J = J_1 + J_2$ (нижний ряд кривых). В этих расчётах использованы следующие параметры a = 15 Гс, V = 2 Гс, W = V, Γ = 0.

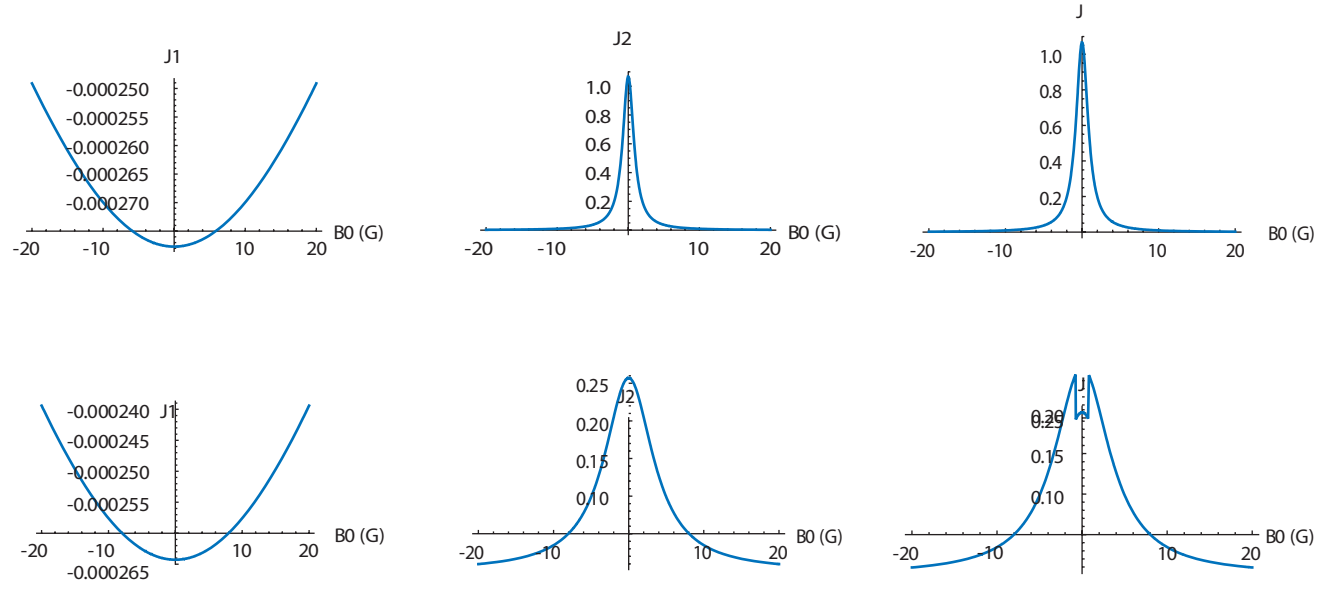


Рис. 2. Вклады в спектр ЭПР двух коллективных мод в условиях обменного сужения (кривые в левой колонке и средней колонке) и суммарный спектр (кривые в правой колонке). Приведены рассчитанные спектры для двух случаев: **а** в перенос когерентности вклад вносит только спиновый обмен, V = 30 Гс, W = V, a = 15 Гс (верхний ряд кривых); **б** в перенос когерентности вклады вносят спиновый обмен и диполь-дипольное взаимодействие, V = 30 Гс, W = 33 Гс, a = 15 Гс (нижний ряд кривых).

Отсюда видно, что внешнее переменное магнитное поле B_1 эффективно возбуждает только одну из коллективных мод эволюции спиновой когерентности. Детальный анализ показывает [6], что внешнее поле возбуждает коллективную моду с узким резонансом.

Для иллюстрации трасформации спектра с ростом скорости переноса когерентности на рис. 1 и 2 приведены рассчитанные спектры для ситуации сравнительно медленного переноса когерентности, $|V| < |V_c|$ (рис. 1) и ситуации быстрого переноса когерентности $|V| > |V_c|$ (рис. 2).

На рис. 1 для каждой коллективной моды приведена форма ожидаемой резонансной линии, J_1, J_2 (см. кривые в левой колонке). Эти резонансные линии имеют смешанную форму, они являются суммой лоренцевской линии поглощения и лоренцевской линии дисперсии, $J_k = J_{k,abs} + J_{k,dis}$. Вклады поглощения и дисперсии показаны кривыми в центральной колонке и правой колонке, соответственно.

Рисунок 1 наглядно иллюстрирует, что коллективные резонансы имеют смешанную форму. Отметим, что с ростом скорости переноса когерентности V вклад дисперсии растёт [6]. При приближении к ситуации обменного сужения, когда $|V| \to |V_c|$, вклады поглощения и дисперсии в наблюдаемый спектр ЭПР сравниваются [6].

Из рис. 2 видно, в условиях обменного сужения основной вклад в наблюдаемый спектр вносит одна коллективная мода (узкая резонансная линия), дисперсия не вносит вклада. Очень интересно, что коллективная мода с широким резонансом даёт вклад с отрицательным знаком (см. кривые в левой колонке).

Трёхчастотная модель

В работе [6] детально проанализирована трансформация спектра для трёхчастотной модели. В ЭПР такая ситуация реализуется, например, для ^{14}N нитроксильных радикалов. В общих чертах влияние переноса когерентности на форму наблюдаемого спектра аналогично тому, что происходит в двухчастотной ситуации. Но есть и отличия. Предположим, что в отсутствие переноса спиновой когерентности проявляются резонансы на частотах $\omega_1 = \omega_0 + a$, $\omega_2 = \omega_0$, $\omega_3 = \omega_0 - a$. Можно было ожидать, что в условиях быстрого переноса когерентности (обменного сужения спектра) все три коллективные моды будут давать резонанс на средней частоте ω_0. Но оказывается, что при любых скоростях переноса когерентности резонансные частоты трёх коллективных мод оказываются разными. Это оставляет шанс наблюдать все три резонанса даже в условиях так называемого обменного сужения спектра.

Заключение

Для анализа формы спектров магнитного резонанса при наличии случайного переноса спиновой когерентности, развит новый подход, основанный на нахождении коллективных независимых мод эволюции спиновой когерентности. Этот подход позволил дать последовательное описание известного в спектроскопии эффекта обменного сужения спектров.

Развитая в этой работе последовательная теория даёт толчок для постановки новых опытов, поиска новых протоколов эксперимента, которые позволят с большей точностью определять скорости переноса спиновой квантовой когерентности из данных спектроскопии магнитного резонанса.

Автор благодарен проф. Б. Бейлзу (США) и своим коллегам М. М. Бакирову, В. К. Воронковой, Р. Б. Галееву, В. Ф. Тарасову за многочисленные обсуждения данной проблемы. Эта работа была поддержана бюджетом госзадания КФТИ и Программой Президиума РАН 1.26 П.

Литература

1. Замараев К.И., Молин Ю.Н., Салихов К.М.: Спиновый обмен. Наука, Сибирское отделение, Новосибирск 1977, 317 с.
2. McConnell H.M.: J. Chem. Phys. **28**, 430 (1956)
3. Ogawa S., Fessenden R.W.: J. Chem. Phys. **41**, 994 (1964)
4. Bales B.L., Peric M.: J. Phys. Chem. B **101**, 8707 (1997)
5. Bales B.L., Peric M.: J. Phys. Chem. A **106**, 4846 (2002)
6. Salikhov K.M.: Appl. Magn. Reson. **47**, no.11, 1207–1228 (2016)
7. Салихов К.М., Семенов А.Г., Цветков Ю.Д.: Электронное спиновое эхо и его применение Наука, Сибирское отделение, Новосибирск 1976, 342 с.
8. Смирнов В.И.: Курс высшей математики, том 3, часть 1. Из-во физико-математической литературы. Москва 1958, 327 с.

Исследование магнитоупругого эффекта микрочастиц пермаллоя

А. А. Бухараев, Д. А. Бизяев, Ю. Е. Кандрашкин, Л. В. Мингалиева, Н. И. Нургазизов, Т. Ф. Ханипов

Отдел химической физики, лаборатория физики и химии поверхности, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Магнитоупругий эффект в микрочастицах пермаллоя был исследован с использованием двух независимых методов: ферромагнитного резонанса (ФМР) и магнитно-силовой микроскопии (МСМ). На основе анализа угловой зависимости спектров ФМР были найдены значения поля эффективной магнитной анизотропии, индуцированной механическим сжатием микрочастиц. Полученные значения поля хорошо совпали со значениями, найденными на основе анализа МСМ изображений напряжённых и ненапряжённых микрочастиц. Также с помощью МСМ было зафиксировано существенное уменьшение поля переключения частицы внешним магнитным полем при её механическом сжатии.

Введение

Хорошо известно, что магнитоупругий эффект (эффект Виллари) может использоваться для управления намагниченностью микро- и наночастиц [1–4]. Созданные на базе частиц, обладающих магнитоупругим эффектом, электронные логические элементы могут иметь существенно более низкое энергопотребление по сравнению с используемыми сейчас. Повышенный интерес к исследованию влияния механических напряжений на магнитные свойства ферромагнитных микро- и наноструктур привел к появлению нового перспективного научного направления – стрейнтроники (от английского “strain” – деформация) [4].

В данной работе исследовался магнитоупругий эффект в микрочастицах пермаллоя. При этом количественно оценивались изменение эффективного поля анизотропии (H_k) и намагниченности насыщения (M_s) пермаллоевой (Py) частицы при механическом сжатии, и трансформация её доменной структуры. Такая оценка проводилась по данным о ферромагнитном резонансе (ФМР) исследуемого образца. Подобный подход ранее успешно использовался для исследования влияния упругих напряжений на магнитные свойства тонких плёнок. В частности, с использованием сканирующего ФМР спектрометра было визуализировано латеральное распределение наведенной деформацией магнитоупругой анизотропии с пространственным разрешением порядка 1 мм [5]. В нашем случае ФМР измерения были дополнены исследованиями методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ), которая широко применяется для визуализации структуры намагниченности микро- и нанообъектов [6, 7]. С помощью МСМ было установлено распределение локальных магнитных моментов в отдельной Py частице и визуализирована зависимость этого распределения от степени деформации частицы при её механическом сжатии.

Исследуемые образцы

Для проведения исследований были созданы образцы, которые представляли собой массив Py частиц ($Ni_{75}Fe_{25}$), равномерно расположенных на поверхности стеклянных и кремниевых подложек. Для создания таких массивов использовалось напыление через квадратную металлическую сетку, которое проводилось в сверхвысоковакуумной установке MultiprobeP (Omicron) методом распыления твёрдотельной мишени электронным лучом. За счёт использования сеток двух типов были созданы образцы, состоящие из массива Py микрочастиц размерами $25\times25\times0.02$ мкм^3 или $7\times7\times0.03$ мкм^3. Схема приготовления образца с ненапряжёнными частицами представлена на рис. 1а. Снимок части образца, полученный с помощью оптического микроскопа, приведён на рис. 2а. Топографическое изображение Py частиц, полученное с помощью сканирующего зондового микроскопа, работающего в атомно-силовом режиме, приведено на рис. 2б.

Для создания напряжения в микрочастицах часть подложек перед проведением напыления была упруго согнута

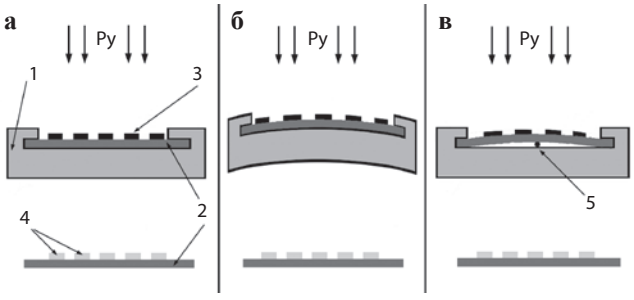


Рис. 1. Схемы приготовления образцов. Образец с ненапряжёнными частицами (**а**). Образец с частицами, испытывающими одинаковую степень сжатия по всему образцу (**б**). Образец с частицами, степень сжатия которых увеличивается от края к центру образца (**в**). Цифрами обозначены: 1 – держатель образца, 2 – подложка для напыления, 3 – металлическая сетка, 4 – сформированные частицы, 5 – металлическая проволока, обеспечивающая изгиб подложки во время напыления Py.

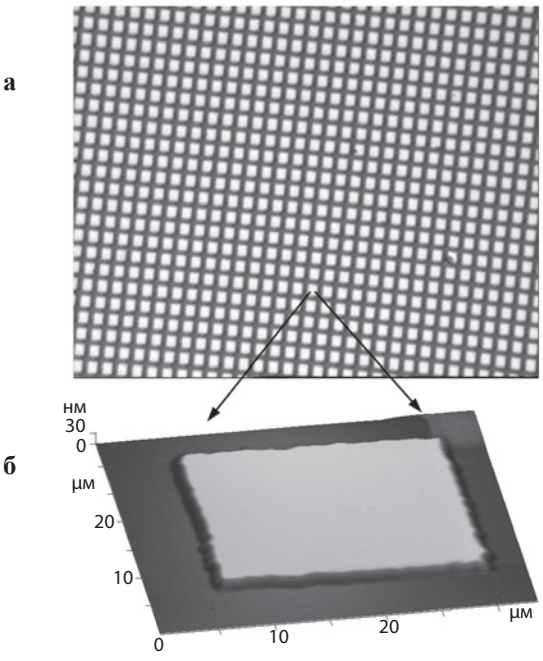


Рис. 2. Оптическая фотография массива Ру частиц 25×25×0.02 мкм^3, сформированных на поверхности стекла (**а**). Топографическое 3D изображение отдельной Ру частицы (**б**), полученное зондовым микроскопом.

при помощи специальных держателей. После напыления подложка разгибалась, что приводило к формированию упругих напряжений в микрочастицах. Было создано два типа напряжённых образцов. Первый тип состоял из Ру частиц имеющих одинаковую степень сжатия. Для этого перед проведением напыления подложки крепились в держателях имеющих постоянный радиус изгиба (рис. 1б). При этом степень сжатия частиц можно было варьировать за счёт использования подложек с различной толщиной (чем толще подложка, тем сильнее сжимались частицы после её распрямления).

Второй тип образцов состоял из частиц, степень сжатия которых изменялось вдоль одной из осей образца. Для создания такого градиента перед проведением напыления под центр подложки подкладывалась проволока, а её концы надёжно закреплялись (рис. 1в). После проведения напыления, подложка распрямлялась, и получался образец, в котором наиболее сильно сжатые частицы находились в центре образца. Аналогичный подход использовался в работе [5] для создания градиента напряжений в ферромагнитных плёнках.

МСМ исследования

Для МСМ исследований использовался сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) Solver P47 (НТ-МДТ) и магнитные кантилеверы марки N18/Co-Cr (MikroScience). Для визуализации распределения намагниченности в частице по МСМ изображению использовался следующий подход. Вначале, по трёхмерному изображению Ру частицы (рис. 2б), с помощью программы OOMMF [8] моделировалось распределение в ней локальных магнитных моментов (рис. 3б). Затем, при помощи созданной ранее компьютерной программы “Виртуальный МСМ” [7] моделировалось МСМ изображение для данного распределения (рис. 3в). В качестве варьируемого параметра использовалось значение поля эффективной анизотропии (H_k). При совпадении модельных и экспериментальных МСМ изображений (рис. 3е, г) делался вывод о правильности смоделированного распределения намагниченности и определялось значение H_k, соответствующее данному распределению локальных моментов.

Согласно полученным МСМ изображениям (рис. 3а) ненапряжённая Ру частица имеет классическую четырёхдоменную структуру (рис. 3б) с доменами одинаковыми по размерам. У напряжённых Ру частиц наблюдается перераспределение локальных магнитных моментов (рис. 3г). Происходит увеличение размера доменов с намагниченностью направленной перпендикулярно оси сжатия (рис. 3д). При этом между этими доменами в центре частицы образуется доменная стенка, наблюдаемая на МСМ изображении, как характерная перемычка (рис. 3г). Было установлено, что на равномерно напряжённых образцах (первого типа) длина перемычки одинакова для всех частиц. На неравномерно напряжённых образцах (второго типа) длина перемычки была больше у частиц находящихся в центре образца (рис. 4). Это хорошо согласуется с результатами моделирования тензора напряжённости в тонких плёнках, проведённого в работе [5]. Таким образом, размер перемычки может использоваться в качестве параметра, характеризующего степень сжатия частицы (или значение тензора напряжений в данной точке образца).

МСМ измерения и компьютерное моделирование полученных изображений позволили оценить эффективное поле анизотропии для образцов первого типа и его изменение для образцов второго типа. Для равномерно напряжённых образцов приготовленных на стеклянных подложках толщиной 300 мкм H_k составило примерно 1.0 мТл, что согласуется с данными полученными при ФМР измерениях. Для образцов второго типа была проведена оценка изменения H_k вдоль направления, перпендикулярного оси, вокруг которой сгибался образец при напылении и, соответственно, изменялась степень сжатия частиц. Для этого были проведены МСМ измерения отдельных частиц на образце размерами примерно 5×3 мм^2 с шагом 200 мкм вдоль длинной оси. Образец был сформирован на стеклянной подложке толщиной 300 мкм, под которую при напылении подкладывалась проволока диаметром 80 мкм. На полученных магнитных изображениях Ру частиц наблюдалось увеличение длины перемычки при перемещении поля сканирования от края к центру образца (рис 4а–в). Согласно результатам моделирования H_k увеличивался от 1.2 мТл на краю образца до 4.5 мТл в центре (рис. 4г–е).

Также с помощью МСМ было определено изменение поля переключения Ру частиц при механическом сжатии. Для этого использовались образцы, представляющие

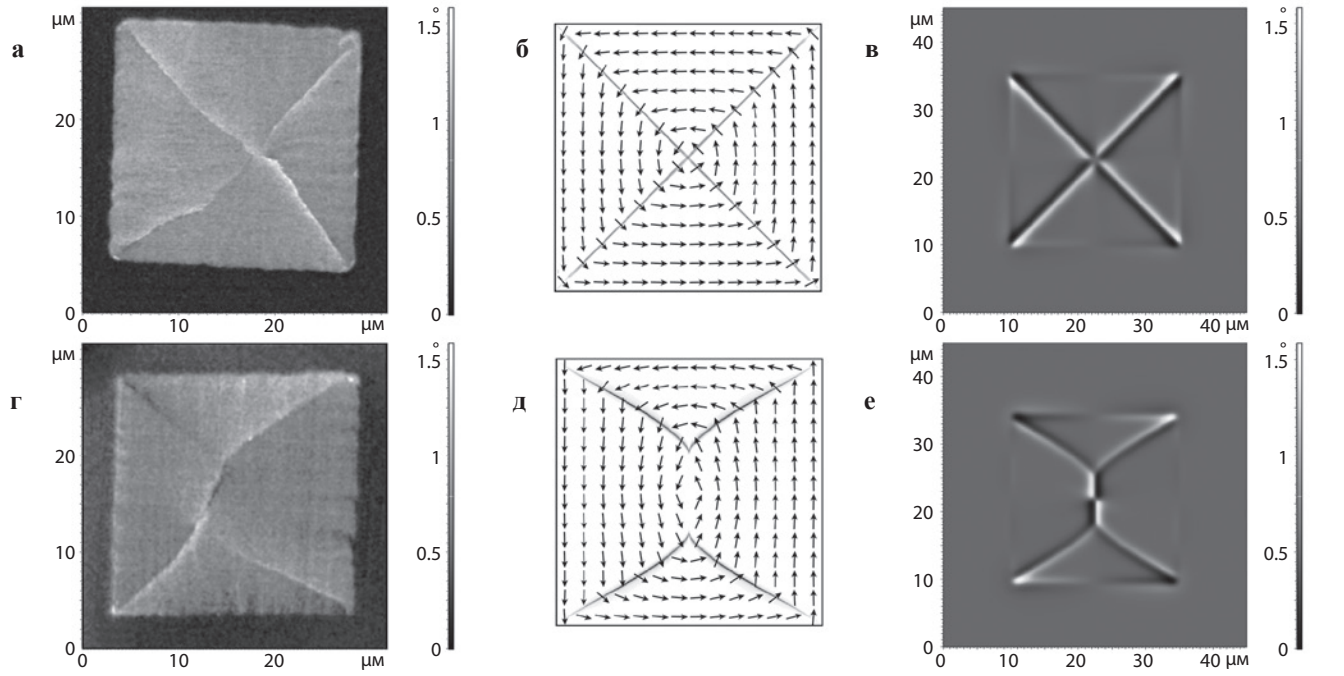


Рис. 3. Экспериментальные МСМ изображения ненапряжённой (**а**) и напряжённой (**г**) Py частицы 25×25×0.02 мкм^3. Смоделированное в OOMMF распределение намагниченности для ненапряжённой (**б**) и напряжённой (**д**) частицы и соответствующие этим распределениям модельные МСМ изображения (**в** и **е**). При моделировании напряжённой частицы использовалось эффективное поле анизотропии 1.2 мТл, полученное из ФМР данных.

собой массив частиц с размерами 7×7×0.03 мкм^3. Такие частицы за счёт анизотропии формы имеют более высокую коэрцетивность по сравнению с частицами размером 25×25 мкм^2. Под полем переключения частицы H_a здесь понималась величина внешнего магнитного поля, при котором происходит переход частицы из многодоменного состояния в состояние с однородной намагниченностью. При этом на МСМ изображении на

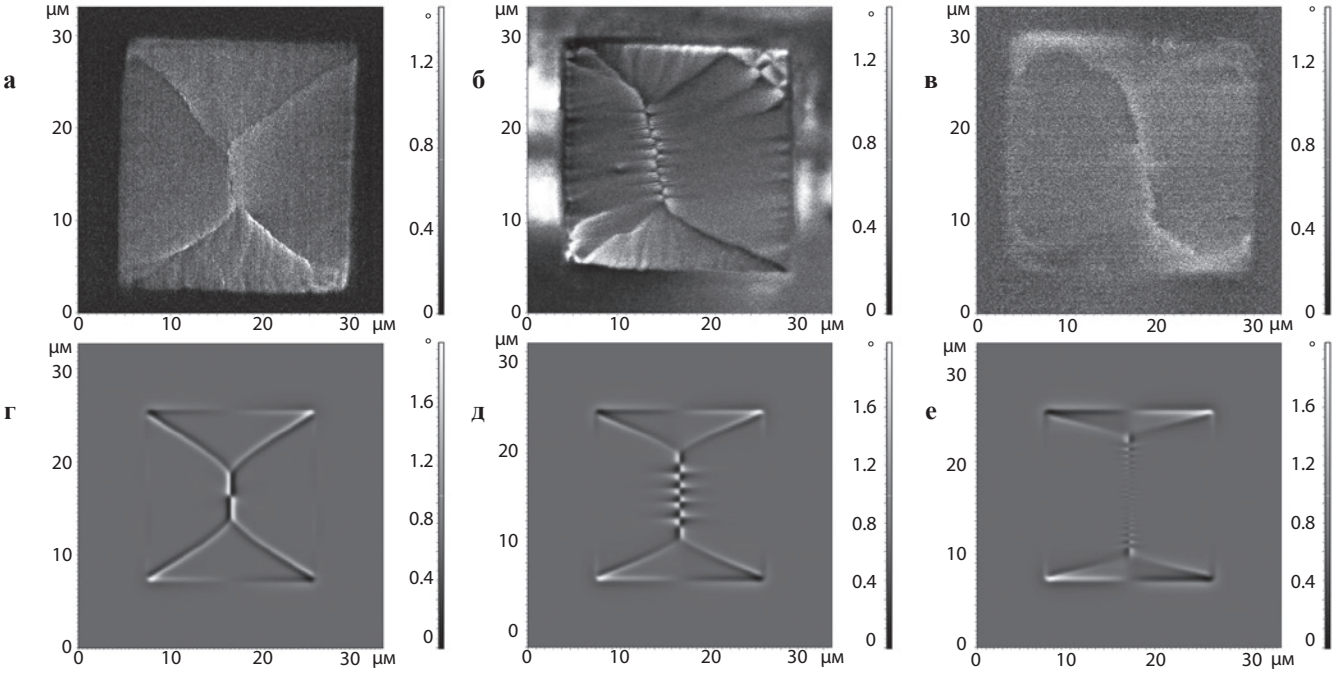


Рис. 4. Экспериментальные МСМ изображения напряжённых Py частиц 25×25×0.02 мкм^3 (**а**–**в**) и соответствующие им модельные изображения (**г**–**е**). Степень сжатия частиц увеличивается от края к центру образца (от **а** к **в**). Эффективное поле анизотропии при расчётах составило **г** – 1.12 мТл, **д** – 2.24 мТл, **е** – 4.48 мТл.

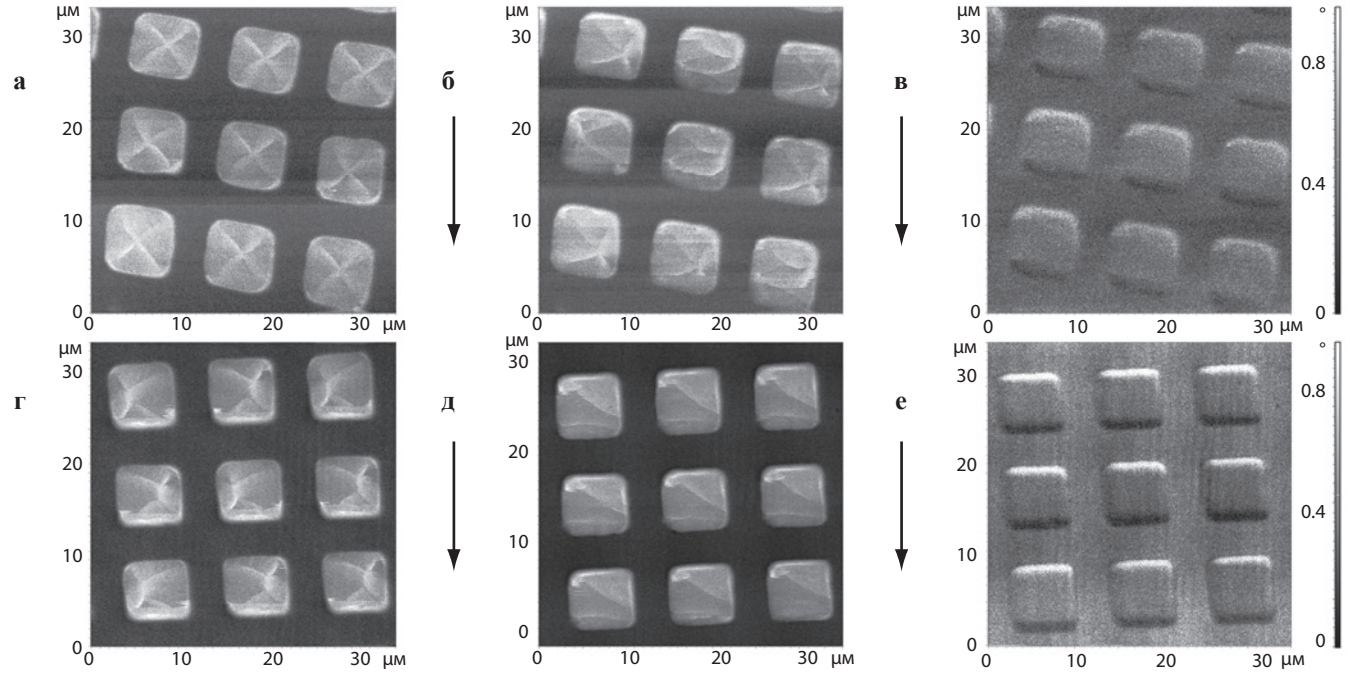


Рис. 5. МСМ изображения Ру частиц 7×7×0.03 мкм^3 во внешнем магнитном поле. Несжатые частицы во внешнем магнитом поле: **а** – 0 Э, **б** – 15 Э, **в** – 25 Э. Сжатые частицы во внешнем магнитом поле: **г** – 0 Э, **д** – 5 Э, **е** – 10 Э. Направление магнитного поля указано стрелкой. Ось сжатия частиц перпендикулярна направлению магнитного поля.

краях частицы появляется характерный чёрно-белый контраст (рис. 5в, е).

Для измерения Наиспользовался “home-made” магнит, инсталлированный в C3M Solver P47. Шаг по полю у магнита составлял 5 Э, что не позволило построить детальную петлю гистерезиса Ру частиц. Образец ориентировался в магнитном поле таким образом, чтобы направление сжатия частиц было перпендикулярно внешнему магнитному полю. Согласно проведённым измерениям для ненапряжённых частиц многодоменная структура (рис. 5б) сохранялась до значения поля 20 Э и однородное намагничивание происходило в поле 25 Э (рис. 5в). Напряжённые частицы сохраняли многодоменную структуру при внешнем поле 5 Э (рис. 5д) и становились однородно намагниченными при поле 10 Э (рис. 5е). Полученные данные позволяют говорить о существенном снижении поля переключения частиц под действием механического напряжения.

ФМР исследования

ФМР измерения проводились на установке Bruker EMX Plus с полем (H_{ex}) до 1.4 Тл и микроволновым полем H_{mw} с частотой 9.8 ГГц, перпендикулярным H_{ex}. Измерения проводились на образцах с Ру частицами с размерами 25×25×0.02 мкм^3, имеющими одинаковую степень сжатия. Снималась угловая зависимость спектров в диапазоне от 0° до 360° с шагом в 10°. При этом плоскость образца выставлялась параллельно внешнему магнитному полю, и вращение проводилось вокруг оси нормальной к поверхности образца. Изменение резонансного положения линий ФМР в зависимости от угла поворота образца в магнитном поле представлены на рис. 6. На рис. 6а приведены линии, соответствующие минимальному и максимальному значению резонансного поля для образца с напряжёнными частицами. На рис. 6б представлены угловые зависимости резонансного поля от угла поворота образцов с напряжёнными и ненапряжёнными частицами. На рис. 6в эти зависимости приведены в полярных координатах, что позволяет по характерной форме кривой сделать вывод о формировании в напряжённых частицах одноосной анизотропии.

По угловой зависимости резонансного поля с помощью расчётов были определены M_s (намагниченность насыщения) и H_k (эффективное поле анизотропии). Расчёт основывался на решении уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта для тонких плёнок [5]. Решения уравнения для случая $\alpha \cdot H_{mw} << H_k \cdot H_{ex}$ имеют вид:

$$\omega^2 = \gamma^2 \cdot (H_{min} + H_k) \cdot (H_{min} + H_k + \mu_0 M_s), \quad (1)$$

$$\omega^2 = \gamma^2 \cdot (H_{max} - H_k) \cdot (H_{max} + \mu_0 M_s), \quad (2)$$

где H_{min} и H_{max}, найденные из эксперимента, минимальные и максимальные значения резонансного поля, γ – гиромагнитное отношение пермаллоя. Расчёты H_k и M_s проводились для обоих типов образцов, с напряжёнными (механически сжатыми) и ненапряжёнными Ру микрочастицами. В результате численного решения уравнений (1) и (2) были получены следующие значения: для ненапряжённых частиц (H_{min} = 94.0 мТл, H_{max} = 95.1

мТл): H_k = 0.45 мТл, M_s = 886 кА/м; для напряжённых частиц (H_{min} = 95.3 мТл, H_{max} = 97.4 мТл): H_k = 1.06 мТл, M_s = 867 кА/м.

Согласно полученным данным в механически сжатых Ру частицах происходит существенное увеличение эффективного поля анизотропии. Это обусловлено тем, что в первом приближении поле магнитоупругой анизотропии прямо пропорционально величине индуцированных напряжений. В частности, для Ру частиц размерами 25×25×0.02 мкм^3 было показано, что при механическом сжатии (изменение латеральных размеров 0.2%) поле увеличивается в два раза. При этом намагниченность насыщения изменяется слабо с M_s = 886 кА/м для ненапряжённых частиц до M_s = 867 кА/м для напряжённых частиц.

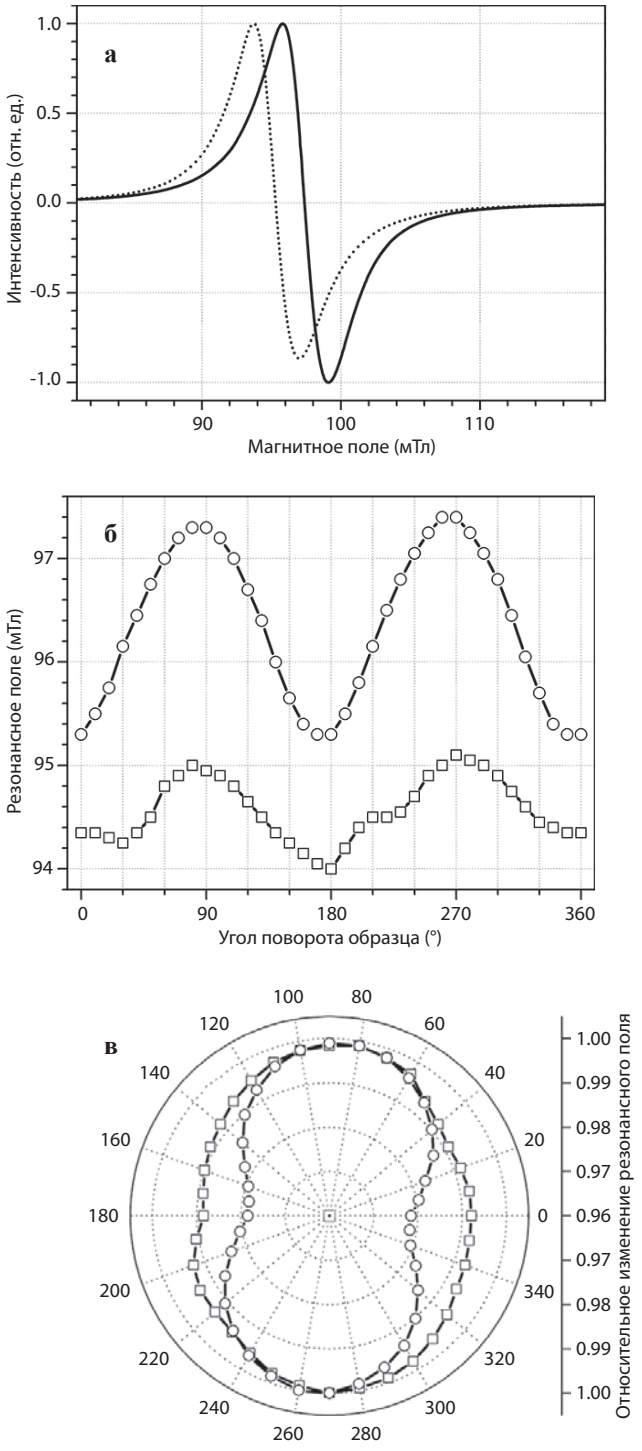


Рис. 6. ФМР спектры, соответствующие максимальному и минимальному значению резонансного поля напряжённой Ру частицы 25×25×0.02 мкм^3 (**а**). Угловая зависимость сдвига резонансного поля для напряжённых и ненапряжённых частиц (**б**) и относительное изменение резонансного поля в угловых координатах (**в**).

Заключение

В ходе проведённых исследований было показано, что методы ФМР и МСМ хорошо дополняют друг друга, позволяя получать независимую информацию о магнитных свойствах объекта исследования. Была использована методика, которая позволяет на основе данных ФМР микрочастиц определить величину их намагниченности насыщения и значение поля эффективной магнитной анизотропии. Для Ру частиц размерами 25×25×0.02 мкм^3 было установлено, что при одноосном механическом сжатии (изменение латеральных размеров 0.2%) происходит сильное увеличение поля анизотропии частиц с 0.45 мТл до 1.06 мТл при слабом изменении намагниченности насыщения.

МСМ измерения позволили установить локальное распределение намагниченности в частицах. Было показано, что при помощи МСМ измерений можно контролировать степень сжатия частиц и оценивать однородность распределения индуцированных напряжений в образце, что важно для корректной интерпретации данных ФМР. Также было показано, что МСМ измерения могут косвенно подтвердить правильность определения значений поля эффективной магнитной анизотропии и величины намагниченности насыщения частиц, полученных на основе данных ФМР. При помощи МСМ измерений во внешнем магнитном поле было продемонстрировано, что при сжатии микрочастиц происходит существенное снижение порога формирования в них однородной намагниченности под воздействием внешнего магнитного поля.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 15-02-02728) и программ Президиума РАН.

Литература

1. Морозов А.И.: ФТТ. **56**, вып. 5, 833 (2014)
2. Bur A., Wu T., Hockel J. et al.: J. Appl. Phys. **109**, 123903 (2011)
3. Dai G., Zhan Q., Yang H. et al.: J. Appl. Phys. **114**, 173913 (2013)
4. Nikonov D.E., Young, I.A.: J. Mater. Res. **29**, 2109 (2014)
5. Беляев Б.А., Изотов А.В.: ФТТ. **49**, вып. 9, 1537 (2007)
6. Нургазизов Н.И., Бизяев Д.А., Бухараев А.А: ФТТ. **58**, вып. 5, 917 (2016)
7. Овчинников Д.В., Бухараев А.А.: ЖТФ. **71**, вып. 8, 85 (2001)
8. Donahue M.J., Porter D.G.: http://math.nist.gov/oommf/

Эффект Ханле в субмиллиметровой ЭПР-спектроскопии примесных ионов тулия в синтетическом форстерите

В. Ф. Тарасов, Н. К. Соловаров

Лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков; отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Впервые в ЭПР спектроскопии зарегистрировано увеличение резонансного поглощения в области пересечения электронно-ядерных уровней – аналог известного в оптической спектроскопии эффекта Ханле. Показано, что форма сигнала пересечения уровней в общем случае определяется двумя качественно различными механизмами: 1) интерференцией неустановившихся вкладов в динамику атомных когерентностей с близкими частотами – "биениями на нулевой частоте", и 2) сложением резонансных сигналов, обусловленных установившейся динамикой тех же атомных когерентностей. Определено время релаксации атомных когерентностей на ЭПР переходе ионов Tm^{3+} в синтетическом форстерите.

Введение

Оптические и магнитные свойства диэлектрических кристаллов в значительной степени определяются содержанием элементов переходных групп, которые всегда присутствуют в кристалле в виде неконтролируемой примеси, или вводятся специально, например, в качестве активных центров лазерной генерации. В последнее время большое внимание привлекают редкоземельные (РЗ) ионы в оксидных кристаллах, рассматриваемые в качестве материальной основы устройств квантовой информатики. Для реализации оптической квантовой памяти на РЗ ионах необходимо, чтобы они имели большое время сохранения когерентного состояния. Этого можно достичь переносом оптической когерентности на электронно-ядерные уровни РЗ центров в кристаллах. Поэтому важно знать времена фазовой релаксации электронных и ядерных спинов таких центров. Для их измерения широко используются импульсные методы ядерного и электронного магнитного резонанса. Для крамерсовых ионов с полуцелым полным электронным магнитным моментом импульсные методы коммерческих спектрометров ЭПР позволяют определять время затухания когерентности резонансных переходов между расщепляемыми магнитным полем уровнями. Для некрамерсовых ионов с целочисленным электронным магнитным моментом система электронных уровней часто расщепляется электрическим кристаллическим полем до синглетных состояний, разность энергий между которыми превышает энергию микроволнового кванта обычных спектрометров ЭПР. Это не позволяет изучать характеристики некрамерсовых (в том числе и многих РЗ) ионов на таких спектрометрах. Некрамерсовы ионы можно изучать на перестраиваемых по частоте квазиоптических спектрометрах ЭПР с генераторами когерентного микроволнового излучения на лампах обратной волны [1]. Такие спектрометры обладают широким диапазоном непрерывной перестройки частоты от 50 до 1500 ГГц в субмиллиметровом диапазоне длин волн. При этом широкополосная ЭПР-спектроскопия даёт возможность регистрировать резонансные переходы как в больших, так и малых магнитных полях, включая нулевое.

В оптике известны методы спектроскопии сверхвысокого разрешения, основанные на квантовой интерференции атомных состояний [2], позволяющие измерять времена жизни атомной когерентности без использования импульсной спектроскопии. Они основаны на наблюдении квазирезонансных спектров поглощения или люминесценции атомов при пересечении атомных уровней [3]. Частным случаем проявления пересечения атомных уровней является эффект Ханле (ЭХ) [4], когда происходит пересечение зеемановских подуровней возбуждённого и (или) основного уровней атомной системы в нулевом магнитном поле. В настоящее время эффектом Ханле называют резкую квазирезонансную зависимость физических характеристиках веществ от постоянного внешнего магнитного поля в узкой симметричной окрестности нулевого значения напряжённости поля [5]. Например, в [6] сообщалось об исследовании "магнетосопротивления Ханле" в тонких металлических плёнках. Большинство экспериментальных наблюдений ЭХ сделано в оптической спектроскопии, где он проявлялся в виде квазирезонансных лоренцевых линий в спектрах поглощения или люминесценции при нулевой напряжённости магнитного поля. В последнее время наблюдение оптического эффекта Ханле стало одним из основных методов исследований в спинтронике [7]. Нами в [8, 9] были представлены результаты первого наблюдения эффекта Ханле в ЭПР-спектроскопии трёхвалентного тулия в монокристаллах синтетического форстерита (Mg_2SiO_4). Аппаратура и методика наблюдений описаны в [1, 10]. В [11, 12] указывалось, что трёхвалентный тулий в оксидных кристаллах (являющийся некрамерсовым ионом с основным электронным мультиплетом $^3H_6$) может рассматриваться в качестве возможного активного центра для реализации элементов квантовой памяти.

Эксперимент

Измерения проводились на широкополосном высокочастотном спектрометре ЭПР [1] в диапазоне частот 270–310 ГГц. Для генерации когерентного линейно поляризованного микроволнового излучения в спектрометре используются лампы обратной волны, допускающие плавную перестройку частоты генерации. Спектрометр собран по безрезонаторной схеме с квазиоптическим трактом, подводящим микроволновое излучение к исследуемому образцу, установленному в зазоре электромагнита, и далее к полупроводниковому болометру на основе антимонида индия, охлажденного до 4.2 К. Эксперименты проводились при температуре образца 4.2 К в геометрии Фогта, соответствующей ортогональной ориентации волнового вектора микроволнового излучения относительно направления внешнего магнитного поля $\boldsymbol{B}_0$, создаваемого резистивным электромагнитом в диапазоне от отрицательного значения –0.3 Тл до положительного 0.9 Тл с прохождением через нулевое значение. При записи спектров ЭПР вектор микроволнового магнитного поля $\boldsymbol{B}_1$ всегда был направлен параллельно направлению внешнего магнитного поля $\boldsymbol{B}_0$. Монокристалл был выращен методом Чохральского из шихты с концентрацией 10 вес.% тулия в расплаве.

Ранее, исследуя примесные центры трёхвалентного тулия в монокристаллах синтетического форстерита (Mg_2SiO_4), мы установили [10], что ионы тулия замещают преимущественно ионы магния в кристаллографической позиции M2, характеризующейся зеркальной симметрией локального кристаллического поля, и определили параметры эффективного спинового гамильтониана, описывающего магнитные свойства тулия. Было установлено, что основное и первое возбуждённое электронные состояния ионов Tm^{3+} в форстерите являются квазидублетом с начальным расщеплением в нулевом магнитном поле Δ_0. Единственный стабильный изотоп тулия ^{169}Tm имеет ядерный спин $I = 1/2$, и каждый электронный уровень расщепляется на два ядерных подуровня. В области малых магнитных полей магнетизм примесного иона имеет поляризационный характер, а величина его магнитного момента пропорциональна магнитному полю. Поэтому, при использовании стандартной для ЭПР-спектроскопии модуляционной методики записи спектров, сигналы ЭПР в малых магнитных полях должны уширяться, а их амплитуда уменьшаться из-за ослабления зависимости энергий электронных уровней от магнитного поля. Это хорошо видно на рис. 1, где приведены экспериментальные спектры ионов тулия в форстерите с начальным расщеплением $\Delta'_0 = 276$ ГГц, записанные на разных частотах (смысл обозначений Δ_0, Δ'_0 показан на рис. 2а).

Как и ожидалось, при приближении частоты записи спектра к величине, соответствующей расщеплению квазидублета в кристаллическом поле (в частотных единицах), резонансное значение магнитного поля уменьшается, ширина линий на спектрах увеличивается, а их амплиту-

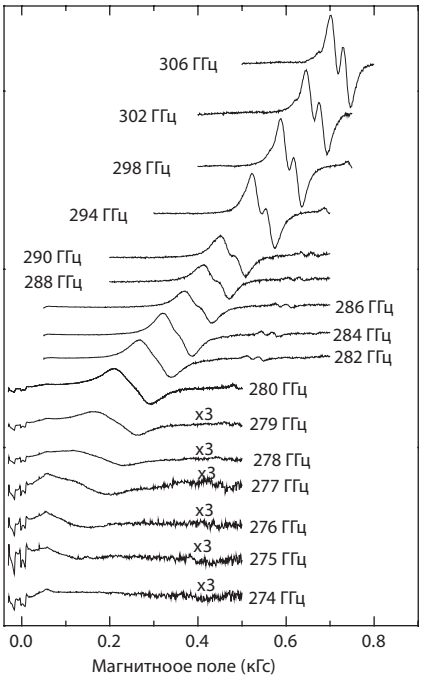


Рис. 1. Спектры ЭПР примесных ионов Tm^{3+} в форстерите, записанные на разных частотах. Частота модуляции постоянного магнитного поля 15 кГц, амплитуда модуляции 0.8 мТл.

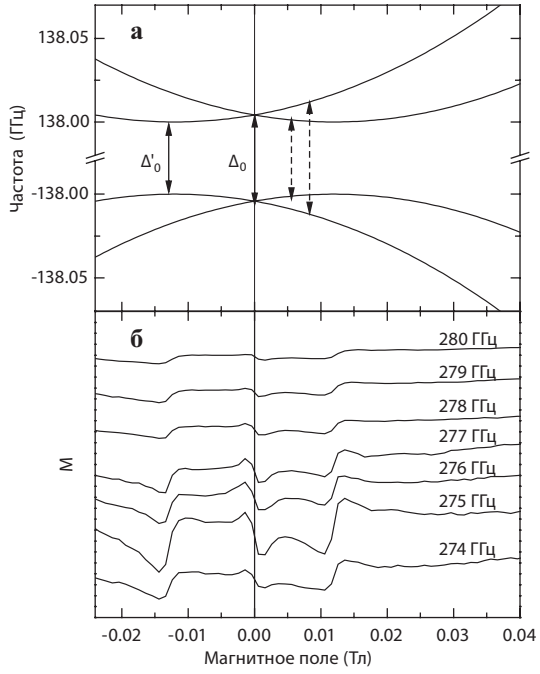


Рис. 2. а Теоретические зависимости энергии (в единицах частоты) электронно-ядерных уровней от магнитного поля для иона с расщеплением электронных уровней в кристаллическом поле $\Delta'_0 = 276$ ГГц. Штриховые стрелки показывают разрешённые переходы между сверхтонкими подуровнями с одинаковыми проекциями ядерного магнитного момента. **б** Спектры ЭПР иона Tm^{3+} в форстерите вблизи нулевого значения магнитного поля. Цифры в правой части спектров показывают рабочую частоту спектрометра.

да падает. Однако на спектрах, записанных в диапазоне частот 274–280 ГГц, соответствующем неоднородной ширине резонансных переходов ионов тулия в нулевом магнитном поле, видны дополнительные узкие линии, появляющиеся вблизи нулевого значения напряжённости магнитного поля. В этой области частота резонансных переходов очень слабо зависит от величины магнитного поля. На рис. 2 видно, что в области магнитных полей, где появляются узкие линии, изменение резонансной частоты не превышает 0.1 ГГц, в то время как неоднородная ширина резонансных переходов, вызванная неоднородностью локального кристаллического поля, составляет около 3 ГГц. Поэтому появление узких линий на спектрах не связано с модуляцией резонансных условий при модуляции магнитного поля. Исследование характеристик сигналов в малых полях показало, что амплитуда этих линий пропорциональна квадрату микроволновой мощности. Отметим, что амплитуда обычных сигналов ЭПР в отсутствие насыщения прямо пропорциональна величине микроволновой мощности.

Обсуждение

Мы полагаем, что наблюдаемые резкие изменения величины поглощения микроволнового излучения в малых магнитных полях связаны с проявлением особенностей спиновой динамики в этой области магнитных полей. На рис. 2а приведена расчётная зависимость энергий двух сверхтонких компонент резонансного перехода между электронными уровнями тулия в форстерите от магнитного поля в малых магнитных полях, а на рис. 2б представлены экспериментальные спектры, более детально показывающие наблюдаемую форму узких линий. Отметим, что зависимость величины сверхтонкого расщепления от магнитного поля, мало изменяется в пределах неоднородной ширины линии резонансных переходов. Видны две узкие линии, имеющие различную фазу. Точно в нулевом магнитном поле наблюдается линия, фаза которой совпадает с фазой основного сигнала ЭПР (смотри рис. 1). Линия в магнитном поле около ±11 мТл имеет обратную фазу, соответствующую уменьшению величины резонансного поглощения микроволновой энергии примесными ионами тулия в форстерите. Линии имеют разную природу. На рис. 2а видно, что в магнитном поле ±11 мТл для одного из разрешённых резонансных переходов зависимость частоты от магнитного поля имеет экстремум. В этом поле магнитный момент иона равен нулю и ион становится нечувствительным к флуктуациям локального магнитного поля, вызванным случайными изменениями ориентации соседних парамагнитных центров. При этом вклад спектральной диффузии в спиновую динамику парамагнитных центров исчезает, и при достаточной мощности микроволнового излучения происходит насыщение резонансного перехода в узкой области магнитных полей вблизи экстремума, что сопровождается уменьшением резонансного поглощения. Ранее этот эффект наблюдался для примесных двухвалентных ионов железа [13] и хрома [14] в монокристаллах синтетического форстерита и теоретически описан в [14].

Фаза сигнала в нулевом магнитном поле указывает на “резонансное” увеличение поглощения.

Этот сигнал мы связываем с ЭХ, т.е. с проявлением “квантовых биений с нулевой частотой, не усредняющихся при интегральном по времени наблюдении” [1, 4]. Термин “квантовые биения с нулевой частотой…” [1] мало распространён при описании ЭХ, хотя он выглядит наиболее соответствующим наглядной модели его формирования [1, 15]. Следуя [1, 15] сигнал Ханле (СХ) представляет собой сигнал, обязанный суперпозиции двух одинаково затухающих атомных когерентностей с близкими собственными частотами и одинаковыми начальными фазами. Гармоническую зависимость такого сигнала от разности частот атомных когерентностей ассоциируют с биениями. Каждый атом в стационарном квазирезонансном поле находится в суперпозиционном состоянии с неравной нулю вероятностью находиться в основном состоянии, или, что равнозначно, часть атомов ансамбля примесных центров всегда находится в основном состоянии. Только эта часть атомов участвует в формировании СХ.

Динамика атомной когерентности на переходах каждого атома моделируется вынужденной динамикой первоначально невозбуждённого гармонического осциллятора под действием гармонической квазирезонансной силы. Т.е. возбуждающее поле на таких атомах в произвольный момент времени моделируется ступенчатой (пропорциональной тэта-функции) функцией. Вынужденная динамика классического осциллятора с затуханием в таком поле представляет собой сумму затухающего колебания с частотой, близкой к собственной частоте осциллятора, и установившегося колебания с определённой амплитудой, фазой и частотой вынуждающей гармонической силы (внешнего квазирезонансного поля) [16]. Суммарный вклад пар затухающих атомных когерентностей, осциллирующих с близкими частотами и одинаковыми начальными фазами, усреднённый по моментам возбуждения атомов, формирует СХ [2, 4, 15].

Форма наблюдаемой нами линии СХ заметно отличается от чисто лоренцевой, характерной для оптических СХ [2–7]. Это побудило нас проанализировать возможные механизмы искажений формы СХ. Наблюдаемые ранее отклонения формы оптических СХ от лоренцевой объяснялись нелинейным по мощности переменного (лазерного) поля взаимодействием резонансного поля с атомной системой [5], в частности, процессами переноса когерентности и населённости между несколькими уровнями, участвующими в процессе. В наших экспериментах изменений формы линии при изменении мощности микроволнового поля не зафиксировано. Поэтому мы ограничились рассмотрением возможных вкладов в форму СХ за счёт не учитываемых в простой модели [2–4, 15] механизмов. В [9] показано, что форма СХ может исказиться за счёт вклада от установившихся компонент

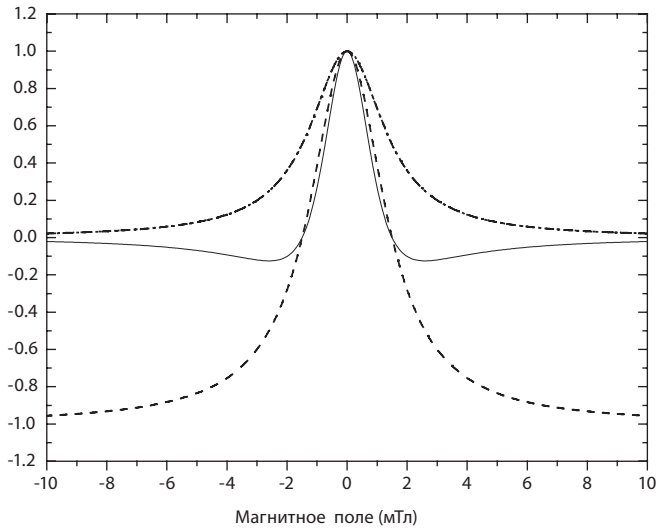


Рис. 3. Форма резонансного вклада в сигнал Ханле. Штрих-пунктирная линия – лоренцева линия, штриховая линия – косинус разности фаз установившихся атомных когерентностей, сплошная линия – резонансный сигнал Ханле.

атомных когерентностей, осциллирующих с частотой возбуждающего поля, но имеющих разные фазы [16]. Форма такого "резонансного" (из-за равенства частот интерферирующих атомных когерентностей) вклада в СХ показана на рис. 3. Строго говоря, ввести определённое время фазовой релаксации в этом случае нельзя. Однако, можно сделать численные оценки, определяя эффективное время фазовой релаксации из наблюдаемой полуширины СХ. В нашем случае для иона тулия в форстерите при температуре 4.2 К это время $\approx 5 \cdot 10^{-8}$ с.

Заключение

Нами впервые в ЭПР-спектроскопии наблюдался сигнал Ханле (СХ) в виде узкой линии поглощения микроволновой мощности при нулевой напряжённости внешнего магнитного поля. Проанализированы возможные причины отклонения формы линии наблюдаемого СХ от лоренцевой линии, обычной для ЭХ в оптической спектроскопии. По ширине линии СХ оценено время жизни когерентности на нижнем электронном переходе иона тулия в синтетическом форстерите $\approx 5 \cdot 10^{-8}$ с при 4.2 К.

Работа выполнена в сотрудничестве с Е. В. Жариковым (Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва и Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва) при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 12-02-97018 «р_а».

Литература

1. Tarasov V.F., Shakurov G.S.: Appl. Magn. Reson. **2**, no.3, 571–576 (1991)
2. Александров Е.Б., Калитеевский Н.И., Чайка М.П.: УФН **129**, №2, 155–165 (1979)
3. Показаньев В.Т., Скроцкий Г.В.: УФН **107**, №4, 623–656 (1972)
4. Новиков Л.Н., Скроцкий Г.В., Соломахо Г.И.: УФН **113**, №4, 597–625 (1974)
5. Budker D., Gawlik W., Kimball D.F., Rochester S.M., Yashchuk V.V., Weis A.: Rev. Mod. Phys. **74**, no.4, 1153–1201 (2002)
6. Vélez S., Golovach V.N., Bedoya-Pinto A., Isasa M., Sagasta E., Abadia M., Celia Rogero C., Hueso L.E., Bergeret F.S., Casanova F.: Phys. Rev. Lett. **116**, no.1, 1016603 (2016)
7. Кусраев Ю.Г.: УФН **180**, №7, 759–773 (2010)
8. Тарасов В.Ф., Соловаров Н.К., Жариков Е.В.: Письма в ЖЭТФ **104**, №2, 91–96 (2016)
9. Соловаров Н.К., Тарасов В.Ф., Жариков Е.В.: Оптика и спектроскопия **121**, №4, 614–620 (2016)
10. Konovalov A.A., Lis D.A., Subbotin K.A., Tarasov V.F., Zharikov E.V.: Appl. Magn. Reson. **30**, no.3-4, 673–682 (2006)
11. Lin H., Wang T., Wilson G.A., Mossberg T.W.: Opt. Lett. **20**, no.1, 91–93 (1995)
12. Thiel C.W., Sinclair N., Tittel W., Cone R.L.: Phys. Rev. Lett. **113**, no.16, 160501 (2014)
13. Тарасов В.Ф.: Письма в ЖЭТФ **68**, №5, 370–375 (1998)
14. Salikhov K.M., Tarasov V. F.: Magn. Res. Chem. **43**, no.S1, S221–S228 (2005)
15. Александров Е.Б., Запасский В.С.: О фотонах и спинах. СПб.: Изд-во СПб ун-та 2009.
16. Yoe Y.S., Satanin A.M., Kim Ch.S.: Phys. Scr. **74**, no.2, 259–266 (2006)

К алгоритму определения константы скорости спинового обмена из анализа формы спектра ЭПР раствора парамагнитных зондов

М. М. Бакиров, Р. Т. Галеев, К. М. Салихов

Отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Мы провели численные расчёты спектров ЭПР парамагнитных зондов. В данной работе мы проанализировали проявления обменного и диполь-дипольного взаимодействий в форме спектра ЭПР в невязких растворах, содержащих парамагнитные зонды (свободные нитроксильные радикалы). Численные расчёты подтвердили, что в области медленного спинового обмена компоненты спектра ЭПР могут содержать вклад поглощения и вклад дисперсии. Нами установлено, что с хорошей точностью вклад дисперсии не зависит от сверхтонкого взаимодействия неспаренного электрона со спинами ядер водорода метильных групп радикала. Это свойство позволяет определить константу скорости спинового обмена из вклада дисперсии линий ЭПР при низких концентрациях спинового зонда.

Введение

Спиновый обмен между частицами в растворах привлекает внимание исследователей. Например, при исследовании доступности различных участков белков используют проявления спинового обмена в форме спектра ЭПР спиновой метки [1, 2].

Форма спектра ЭПР спиновых зондов зависит от фазовой релаксации спинов и переноса спиновой когерентности между зондами. Эти параметры системы зависят от различных взаимодействий: обменного взаимодействия, диполь-дипольного взаимодействия и сверхтонкого взаимодействия (СТВ) неспаренных электронов с магнитными ядрами. Целью работы является получение константы скорости спинового обмена с учётом существующих взаимодействий.

На основе анализа экспериментальных данных группой Бейлса [3, 4] разработан метод получения константы скорости спинового обмена между радикалами в растворах, который можно характеризовать как феноменологический. В работе [5] на основе кинетических уравнений для поперечной намагниченности детально рассмотрены вклады диполь-дипольного и обменного взаимодействий между спиновыми зондами в ширину и форму линий спектра ЭПР и предлагаются подходы для разделения вкладов данных взаимодействий, и в итоге определения константы скорости спинового обмена. Однако, в работе [5] сверхтонкое взаимодействие с магнитными ядрами учитывалось не полностью: учитывалось только расщепление спектра ЭПР нитроксильных радикалов за счёт взаимодействия неспаренного электрона с магнитными ядрами азота.

Данная работа (см. [6]) является дальнейшим развитием работы [5]: дан детальный анализ трансформаций спектра ЭПР с учётом сверхтонкого взаимодействия неспаренного электрона зонда со всеми магнитными ядрами. В итоге сформулирован модифицированный алгоритм определения константы скорости спинового обмена между нитроксильными радикалами. Найдена область применимости предложенного в работе [5] алгоритма определения скорости спинового обмена, который был сформулирован для модельной ситуации без учёта СТВ с протонами, для реальных систем с учётом СТВ не только с ядрами азота, но и с протонами.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим раствор ^{14}N-нитроксильных радикалов. Спектр ЭПР радикалов состоит из трёх компонент, каждая компонента имеет Гауссову форму. Такая форма компонент спектра объясняется присутствием неразрешённой сверхтонкой структуры, обусловленной протонами метильных групп. Известно, что с ростом концентрации радикалов компоненты спектра уширяются и линии сдвигаются к центру спектра. Форма компонент спектра ЭПР становится ассиметричной. Форму линий ЭПР можно представить в виде суммы сигнала поглощения и сигнала дисперсии. При больших концентрациях радикалов происходит обменное сужение спектра.

В рассматриваемой ситуации кинетические уравнения для поперечных компонент намагниченности M_k^- подансамблей радикалов, которые относятся к k-ой сверхтонкой компоненте спектра, обусловленной сверхтонким взаимодействием неспаренных электронов с магнитными ядрами, ядрами азота и протонами, имеет вид [6]:

$$\frac{\partial M_k^-}{\partial t} = -\mathrm{i}(\omega_k - \omega - \Gamma_{0k})M_k^- - WM_k^- + g_k \sum VM_n^- - \mathrm{i}\,\omega_1 M_{kz} \qquad (1)$$

Здесь ω_k – резонансная частота компоненты k, Γ_{0k} – собственная ширина компоненты k, M_k^- – намагниченность компоненты k, W – скорость фазовой релаксации, V – скорость переноса спиновой когерентности. С учётом обменного взаимодействия и диполь-дипольного взаи-

модействия имеем $W = K_{ex}C + K_{sd}C$ и $V = K_{ex}C - K_{dsct}C$, где K_{ex} – константа спинового обмена, обусловленного обменным взаимодействием при столкновениях радикалов, K_{sd} – константа потери фазовой релаксации, обусловленной диполь-дипольным взаимодействием и K_{dsct} – константа переноса спиновой когерентности, обусловленной диполь-дипольным взаимодействием, C – концентрация радикала. В отсутствие эффекта насыщения спектра ЭПР можно пренебречь изменением z-компоненты намагниченностей подансамблей радикалов в последнем слагаемом в (1). Решая уравнениее (1), находим форму спектра ЭПР с помощью соотношения $Y(\omega) = -\mathrm{Im}\sum M_k^-$.

Предположим, что все протоны магнитно эквивалентны. Тогда форма спектра ЭПР определяется соотношением:

$$Y(\omega) = -\mathrm{Im}\left(\mathrm{i}\frac{G(\omega)}{1+VG(\omega)}\right), \qquad (2)$$

$$G(\omega) = \sum_m \sum_j \frac{\rho_j}{-T_{2m}^{-1} - \mathrm{i}(\omega_0 + mA_0 - ja_p - \omega) - W}, \qquad (3)$$

где A_0 – константа СТВ с ядром азота, a_p – константа СТВ с протонами, ρ_j – биномиальные коэффициенты.

Используя уравнения (2) и (3), нами были рассчитаны спектры ЭПР для разных значений концентрации радикалов. Как и ожидалось, в области низких концентраций спинов, когда ещё не происходит обменного сужения сверхтонкой структуры, вызванной СТВ с протонами радикалов, концентрационное уширение компонент спектра сильно отличаются от того поведения, которое реализуется в модельной ситуации, рассмотренной в работе [5]. Поэтому в этой области концентраций спинов нельзя определять константу скорости спинового обмена просто из экспериментальных данных по ширине компонент спектра. В работе [5] для определения константы скорости спинового обмена (точнее скорости переноса спиновой когерентности) был развит другой алгоритм, основанный на концентрационной зависимости вклада дисперсии в наблюдаемый спектр поглощения. Благодаря вкладу дисперсии крайние азотные сверхтонкие компоненты в спектре ЭПР ^{14}N-нитроксильного радикала становятся несимметричными. Эта асимметрия задаётся величиной параметра p, который характеризует вклад дисперсии. Спиновый обмен между компонентами протонной сверхтонкой структуры внутри каждой азотной компоненты спектра изменяет форму спектра, но он оставляет форму азотной компоненты спектра симметричной, не приводит к её асимметрии, асимметрия азотных компонент вызывается переносом спиновой когерентности только между спинами, относящимся к разным азотным компонентам. Исходя из этого мы предположили, что в области медленного переноса спиновой когерентности для определения константы скорости спинового обмена можно применять алгоритм, развитый в [5] и для реальных систем с учётом СТВ с протонами. С целью проверки этого предположения мы провели расчёты по следующей схеме. Рассчитываем спектр при заданных W, V (см. (1)). Для конкретных значений параметров приведён модельный спектр на рис. 1.

Из рисунка следует, что крайние компоненты не симметричны, асимметрия характеризуется параметром $r = M_{max}/M_{min}$ [5]. Находим для крайних компонент спектра параметры r_1 и r_{-1}. Согласно [5] имеем

$$p = \frac{\sqrt{3}(1-\sqrt{|2r+1|})}{2}. \qquad (4)$$

По теории возмущений в области медленного переноса спиновой когерентности получено [5], что параметр p является линейной функцией V

$$p = -mV/a_N, \text{ где } m = 1,\ 0,\ -1. \qquad (5)$$

Таким образом, для каждого набора кинетических параметров W, V были рассчитаны спектры и с помощью уравнений (4) и (5) были рассчитаны значения

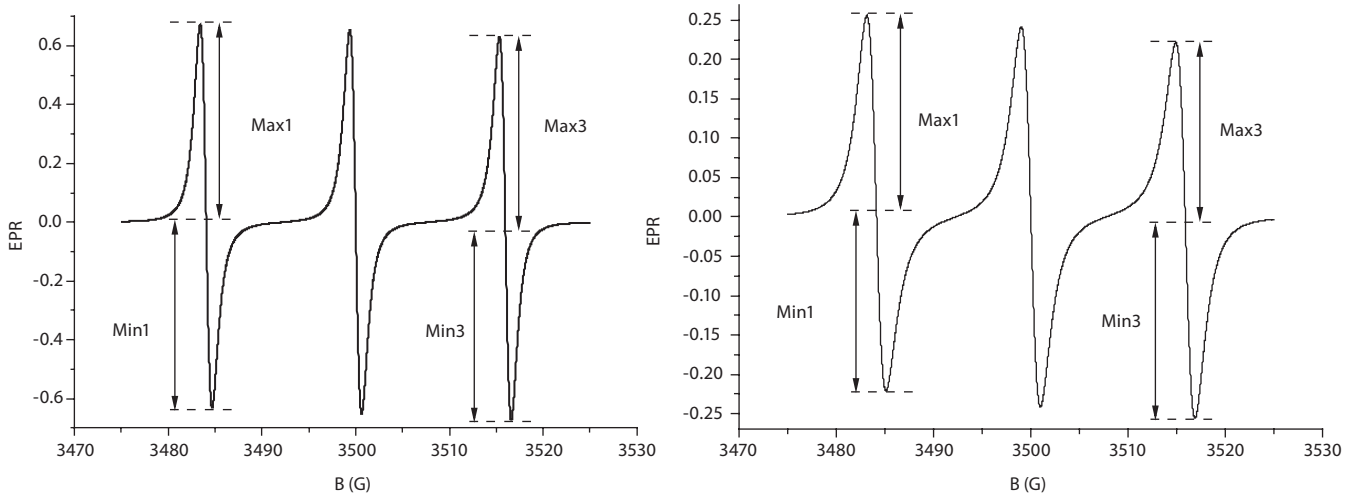


Рис. 1. Модельные спектры ЭПР нитроксильного радикала ^{14}N с 12 протонами. Параметры модельных спектров: Γ_k = T2k-1 = 0.2 Гс, a_N = 16 Гс, g = 2, число протонов = 12, a_P = 0.2 Гс, K_{ex} = 0.1 Гсл/мМоль, $K_{dsct} = K_{dsd}$ = 0: C = 10 мМоль/л (слева) и C = 20 мМоль/л (справа).

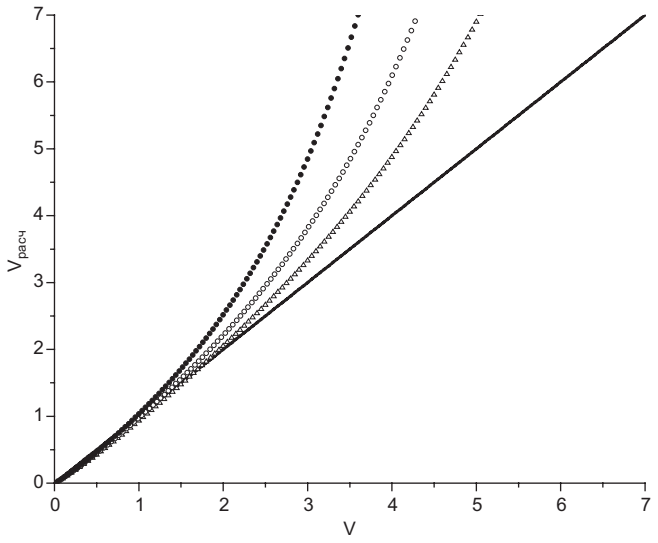


Рис. 2. Корреляция между исходным параметром переноса спиновой когерентности $V = K_{sct}C$ и величиной кинетического параметра $V_{расч}$, полученного из анализа дисперсии компонент модельных спектров ЭПР. Биссектриса показана прямой линией. Параметры модельных спектров: Γ_k = 0.2 Гс, a_N = 16 Гс, g = 2, число протонов = 12, a_P = 0.2 Гс, K_{ex} = 0.05 Гсл/мМоль, $K_{dsct} = K_{dsd}$ = 0 (не закрашенные треугольники); K_{ex} = 0.05 Гсл/мМоль, K_{dsct} = 0.005 Гсл/мМоль, K_{dsd} = 0.006 Гсл/мМоль (не закрашенные кружочки); K_{ex} = 0.05 Гсл/мМоль, K_{dsct} = 0.01 Гсл/мМоль, K_{dsd} = 0.012 Гсл/мМоль (закрашенные кружочки).

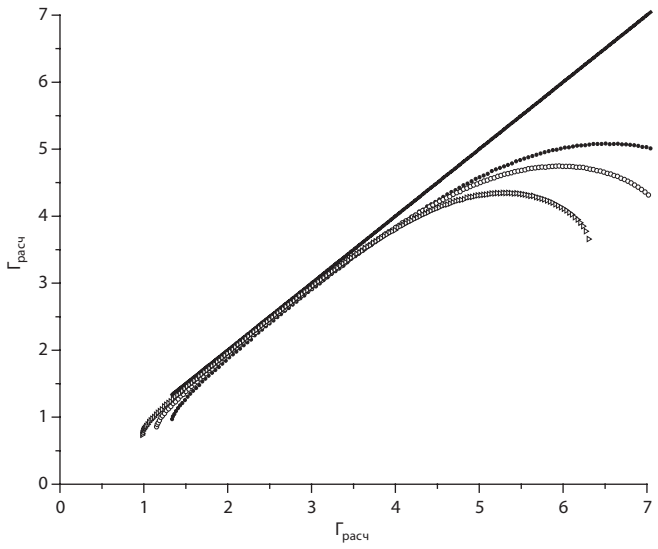


Рис. 3. Корреляция между исходным значением параметра ширины $\Gamma(C)$ и тем значением, которое получается из анализа рассчитанного модельного спектра, для низкополевой компоненты нитроксильного радикала для изотопа ^{14}N. Параметры модельных экспериментов: Γ_l = 0.2 Гс, a_N = 16 Гс, g = 2, число протонов = 12, a_P = 0.2 Гс, K_{ex} = 0.05 Гсл/мМоль, $K_{dsct} = K_{dsd}$ = 0 (не закрашенные тругольники); K_{ex} = 0.05 Гсл/мМоль, K_{dsct} = 0.005 Гсл/мМоль, K_{dsd} = 0.006 Гсл/мМоль (не закрашенные кружки); K_{ex} = 0.05 Гсл/мМоль, K_{dsct} = 0.01 Гсл/мМоль, K_{dsd} = 0.012 Гсл/мМоль (закрашенные кружочки).

скорости переноса спиновой когерентности $V_{расч}$. На рис. 2 показана зависимость между исходным параметром переноса спиновой когерентности V и величиной кинетического параметра $V_{расч}$, полученного из анализа дисперсии компонент модельных спектров ЭПР. Если предложенный алгоритм нахождения параметра V из анализа спектра ЭПР на основе уравнений (4), (5) применим при наличии протонной сверхтонкой структуры, то график на рис. 2, должен представлять собой прямую линию – биссектрису.

Рисунок 2 демонстрирует, что данные, полученные из анализа модельных спектров, следуют биссектрисе в области низких концентраций. Отклонения от линейности связаны с перекрыванием азотных компонент спектра. Таким образом, скорость переноса спиновой когерентности V может быть определена с хорошей точностью в диапазоне низких концентраций спинов, используя данные по асимметрии компонент спектра и используя алгоритм, описанный в [5].

Из рис. 2 видно, что скорости переноса спиновой когерентности, полученные из анализа модельных спектров, лежат на биссектрисе до концентрации около 30–40 мМоль/л в системе без диполь-дипольного взаимодействия (не закрашенные треугольники). При более высоких концентрациях, значения V, полученные из анализа модельных спектров, значительно отклоняются от биссектрисы. В системах с обменным и диполь-дипольным взаимодействием параметр V начинает отклоняться от биссектрисы при более низких концентрациях (рис. 2). Такое отклонение от прямой объясняется эффектом перекрывания азотных компонент спектра. Параметр асимметрии $r = M_{max}/M_{min}$ очень чувствителен к этому перекрыванию.

Скорость фазовой релаксации W и скорость переноса спиновой когерентности V определяют ширину компонент спектра ЭПР. Согласно [6], “ширина” линии $\Delta\Omega_m$, определяемая как расстояние между точками максимального наклона линии спектра, является линейной функцией концентрации спинов и дается соотношением:

$$\Delta\Omega_m = f(p)\ \Delta\Omega_{0m}, \qquad (6)$$

где

$$\Delta\Omega_{0m} = W - \frac{V}{3} + \frac{3a_p^2}{V} + \Gamma_{0m},$$

$$f(p) = 1.155 + 0.171p^2. \qquad (7)$$

Моделирование было сделано для того же набора параметров, как на рис. 2. Для модельных спектров были определены значения ширины линии ЭПР в зависимости от концентрации ($\Gamma_{расч}(C)$) и были сравнены с исходными. Результаты анализа модельных спектров показаны на рис. 3.

Рисунок 3 указывает, что в диапазоне концентраций (от 30 до 100 ммоль/л), зависимости, полученные из анализа модельных спектров ЭПР близки к биссектрисе. Таким образом, для промежуточных концентраций спинов алгоритм выдаёт достоверные результаты при определении скорости фазовой релаксации, зависящей от концентрации $\Gamma(C)$.

Из рис. 3 видно, что зависимость ширины линии ЭПР от концентрации не линейна при низких концентрациях $C < C_0$, и при больших концентрациях $C \approx C^*$ ($K_{cst}C^* = 3a_N$). Эти отклонения ожидаемые. При очень низких концентрациях, обменное сужение отдельных азотных компонент, вызванное спиновым обменом внутри азотной компоненты, накладывается на обменное уширение, вызванное спиновым обменом между азотными компонентами. При высоких концентрациях, перекрывание азотных компонент ЭПР влияет на обменное уширение линий.

Заключение

Традиционно константа скорости бимолекулярного спинового обмена в разбавленных растворах парамагнитных частиц при достаточно низких концентрациях спинов определяется из концентрационного уширения компонент спектра ЭПР (см., напримерр, [7]). В работе [5] был развит алгоритм определения константы скорости сравнительно медленного спинового обмена между нитроксильными радикалами на основе анализа вклада дисперсии в наблюдаемую форму азотных сверхтонких компонент спектра ЭПР. Однако в [5] учитывалась только сверхтонкая структура спектра ЭПР за счёт магнитных ядер азота. В реальных нитроксильных радикалах, как правило, спектр ЭПР нитроксильных радикалов имеет ещё сверхтонкую структуру, обусловленную и другими магнитными ядрами: протонами, дейтронами и т.д. Поэтому было не ясно, можно ли использовать алгоритм, развитый в работе [5], при анализе спектров ЭПР при наличии протонной сверхтонкой структуры. В данной работе на основе численных расчётов спектров ЭПР показано, что протокол определения константы скорости спинового обмена из вклада дисперсии в наблюдаемый сигнал ЭПР, развитый в работе [5] без учёта всех магнитных ядер нитроксильных радикалов, кроме ядер азота, можно применять для нахождения константы скорости спинового обмена между нитроксильными радикалами, спектр ЭПР которых может иметь протонную сверхтонкую структуру.

Работа поддержана программой Президиума РАН 1.26.П и грантом УМНИК №11187ГУ2/2016.

Литература

1. Khan N., Williams B.B., Swartz: Appl. Magn. Reson. **30**, 185–199 (2006)
2. Villamena F., Zweier J.: Antioxidants and redox signaling **6**, 619–629 (2004)
3. Bales B., Peric M.: J. Phys. Chem. B **101**, 8707–8716 (1997)
4. Bales B., Peric M.: J. Phys. Chem. A **106**, 4846–4854 (2002)
5. Salikhov K.: Appl. Magn. Reson. **38**, 237–256 (2010)
6. Salikhov K., Bakirov M., Galeev R.T.: Appl. Magn. Reson. **47**, 1095–1122 (2016)
7. Замараев К.И., Молин Ю.Н., Салихов К.М.: Спиновый обмен. Наука, Сибирское отделение, Новосибирск 1977, 317 с.

Изменение содержания оксида азота в тканях мозга лабораторных крыс после моделирования геморрагического инсульта: ЭПР исследование

В. В. Андрианов, Г. Г. Яфарова, В. С. Июдин, Х. Л. Гайнутдинов

Отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

На основе измерений спектров ЭПР впервые показано, что как после формирования геморрагического, так и ишемического инсульта уже через 5 часов ишемии образование NO в области гиппокампа уменьшается в 2-3 раза и это снижение сохраняется в течение 72 часов. Найдено, что ингибитор NOS L-NAME уменьшает в 3 раза этот сниженный уровень продукции NO при применении после 72 часов ишемии и, наоборот возвращает его к исходному уровню при применении после 5 часов ишемии.

Введение

При гипоксии и ишемии мозга нарушается функционирование нейромедиаторных систем, включая систему монооксида азота. Оксид азота (NO) известен как одна из важнейших сигнальных молекул, регулирующих физиологические функции организма и метаболизм клеток [1, 2]. Большой интерес привлекает участие NO в механизмах развития различных патологических состояний организма [3–6]. В жизнедеятельности животных особо значима роль NO в функционировании сердечно-сосудистой [2, 7, 8] и нервной систем [5, 9, 10]. В настоящее время нет единого мнения о роли эндогенного оксида азота в процессах, протекающих при повреждениях нервной системы. Помимо вазодилатирующих, нейротрансмиттерных и стресслимитирующих свойств, несомненно, участие NO в реакциях оксидантного стресса, глутамат-кальциевого каскада и воспаления. Развитие ишемии мозга и последующее возникновение инсульта связывают с нарушениями мозгового кровотока, а также с нарушениями его регуляции системой NO [7, 11]. NO, синтезируемый конститутивными изоформами NO-синтаз (NOS), обеспечивает адекватное кровоснабжение регионов мозга, влияет на активность нейронов, регулирует метаболизм клеток [12]. Не вызывает сомнения определяющая роль системы NO в патогенезе целого ряда заболеваний, связанных прежде всего с сосудистыми нарушениями [2, 3, 5, 6].

Ранее нашим коллективом методом ЭПР спектроскопии была проведена оценка *in vivo* влияния ишемического инсульта на интенсивность продукции NO в тканях мозга, сердца и печени крыс [13]. Было показано, что уже через 5 часов после моделирования ишемии наблюдается двукратное снижение продукции NO в тканях гиппокампа, сердца и печени, которое сохраняется в течение 3 суток. В данной работе работе мы изучили влияние геморрагического инсульта, вызываемого введением аутологичной крови, на интенсивность продукции NO в тканях гиппокампа крыс методом ЭПР спектроскопии с применением методики спиновых ловушек.

Материалы и методы исследования

Модель геморрагического инсульта воспроизводилась сотрудниками института физиологии НАН Беларуси, г. Минск проф. Кульчицким В. А., Пашкевич С. Н., Денисовым А. А., Досиной М. О., Стукач Ю. П. Эксперименты проведены на крысах-самцах массой тела 190–230 грамм [14, 15]. В день опыта крыс наркотизировали путём внутрибрюшинного введения смеси кетамин-хлоралоза-ацепромазин (55.6, 5.5 и 1.1 мг/кг, соответственно). В ткань мозга с помощью микроманипулятора погружали на глубину 4.5–5.0 мм стеклянную пипетку (диаметр кончика 2.0 мм) и вводили 40 мкл аутологичной крови (данные координаты и глубина введения микроманипулятора соответствуют CA1 области гиппокампа). Через 24 и 72 часа осуществляли забор гиппокампа у крыс, которым вводили в мозг аутологичную кровь и у тех, которым не осуществляли инъекции в мозг. Извлечение аналогичных образцов тканей производилось также и у интактных животных. Компоненты ловушки NO вводили за 40 мин до извлечения исследуемых тканей. Для оценки вклада разных источников NO были проведены исследования влияния неселективного блокатора NO-синтаз (NOS) на продукцию NO при моделировании геморрагического инсульта. В работе применялся L-NAME в дозе 10 мг/кг, который вводили внутрибрюшинно, предварительно за 60 мин до декапитирования.

Трудность определения содержания свободного NO в тканях организма заключается в коротком времени его жизни, что проявляется в его низкой концентрации в тканях. В последнее время одним из наиболее эффективных методов обнаружения и количественного определения NO в биологических тканях стал метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [16, 17] с использованием методики спиновых ловушек, которая позволяет детектировать NO в малых концентрациях [18]. Нами в качестве спиновой ловушки был применён комплекс Fe^{2+} с диэтилдитиокарбаматом – $(ДЭТК)_2$-Fe^{2+}. Комплекс спиновой ловушки с NO ($(ДЭТК)_2$-Fe^{2+}-NO) характеризуется легко распознаваемым спектром ЭПР со значением

g-фактора $g = 2.038$ и триплетной сверхтонкой структурой. Подробности эксперимента и методики описаны ранее [13, 19]. Масса образцов составляла 100 мг. Образцы тканей сразу замораживались в жидком азоте и в замороженном состоянии перевозились из Минска в Казань. Комплекс спиновой ловушки с NO ($(ДЭТК)_2$-Fe^{2+}-NO) в таком состоянии сохраняется, и сигнал от комплекса не изменяется в течение не менее месяца [17, 18, 20]. Регистрация приготовленных образцов проводилась на спектрометре ЭПР ER 200E SRC X-диапазона фирмы Bruker. Амплитуда модуляции, усиление и мощность СВЧ были подобраны таким образом, чтобы избежать перемодуляции и насыщения сигнала ЭПР, и сохранялись одинаковыми на протяжении всех измерений.

При статистической обработке получали среднее значение измеряемой величины и стандартную ошибку среднего M ± SEM. С применением *t*-критерия Стьюдента и U-критерия Манна-Уитни [21] проверяли достоверность отличия средних значений уровней NO в разных тканях контрольных крыс и крыс после моделирования инсульта. Различия считали значимыми при уровне значимости $p < 0.05$.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 показаны спектры ЭПР, полученные от тканей гиппокампа контрольной крысы и крысы после геморрагической гипоксии. На этих спектрах виден характерный триплетный сигнал от комплекса $(ДЭТК)_2$-Fe^{2+}-NO со значением *g*-фактора, равным 2.038. Кроме того, в этой же области присутствует сигнал от комплекса $(ДЭТК)_2$-Cu. Смоделированный вклад от комплекса $(ДЭТК)_2$-Fe^{2+}-NO получен последовательным вычитанием [10] из экспериментального спектра известных сигналов, присутствующих в спектре – от комплекса $(ДЭТК)_2$-Cu и от самого

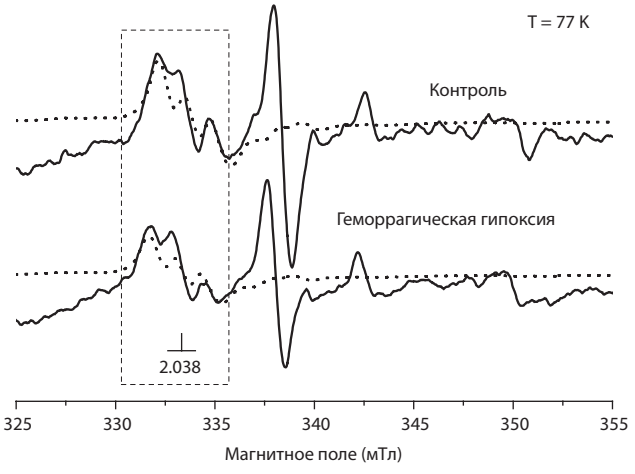


Рис. 1. Сигнал ЭПР гиппокампа контрольной крысы и крысы после геморрагической гипоксии. Сплошная линия – сигнал ЭПР, пунктир – вклад сигнала от $(ДЭТК)_2$-Fe^{2+}-NO.

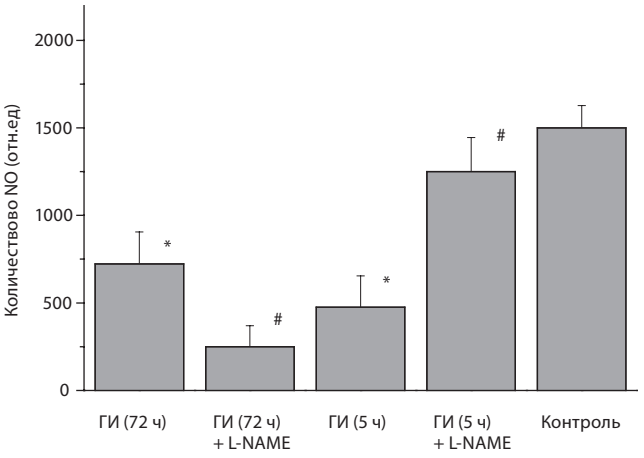


Рис. 2. Относительное количество продукции оксида азота в тканях мозга (гиппокампе) крыс через 5 и 72 часа после геморрагического инсульта и применении блокатора NOS – L-NAME. * – достоверное отличие ($p < 0.05$) от контроля, # – достоверное отличие ($p < 0.05$) от уровня до применения L-NAME. Ось ординат – относительная интегральная интенсивность сигнала $(DETC)_2$-Fe^{2+}-NO.

комплекса $(ДЭТК)_2$-Fe^{2+}-NO, с минимизацией остатка методом наименьших квадратов. На рис. 2 приведены статистические данные по интегральным интенсивностям сигнала $(ДЭТК)_2$-Fe^{2+}-NO в спектрах исследованных образцов гиппокампа. Видно достоверное снижение продукции NO в гиппокампе в 3 раза через 5 часов после моделирования геморрагического инсульта. Через 72 часа (трое суток) уровень продукции NO в гиппокампе остается также достоверно сниженным (в 2 раза).

NO синтезируется в ответ на физиологическую потребность с помощью фермента NO-синтазы (NOS) из его метаболического предшественника – аминокислоты L-аргинина. Известно несколько изоформ NOS; среди большого числа ингибиторов NOS наиболее известны нитро- и алкилпроизводные L-аргинина, т.е. структурные аналоги природного субстрата фермента (L-NAME, L-NNA и др.) [22, 23]. Учитывая, что NO может играть патогенетическую роль при целом ряде патологических состояний нервной системы, в том числе ишемии, некоторые ингибиторы NOS стали объектом интенсивного изучения в качестве возможных нейропротекторов. Отсюда следующим этапом наших исследований было изучение влияния блокаторов NOS на продукцию NO при моделировании геморрагического инсульта. В качестве неселективного блокатора NO-синтаз в работе применялся L-NAME в дозе 10 мг/кг. L-NAME вводили внутрибрюшинно, предварительно за 60 мин до декапитирования. Результаты показывают, что L-NAME достоверно уменьшает в 3 раза сниженный уровень продукции NO при применении после 72 часов ишемии и, наоборот возвращает его к исходному уровню при применении после 5 часов ишемии (рис. 2). Этот результат является чрезвычайно важным, возможное объяснение этому факту было получено в электрофизиологических экспериментах совместно с нашими белорусскими кол-

легами [24]. Подобное развитие событий свидетельствует о нарушении условий межнейронных коммуникаций и срыве input-output процессов на уровне отдельных нервных клеток и их популяций при снижении напряжения кислорода в ткани гиппокампа, который контролирует процессы запоминания и организации поведения. Эффект кратковременного возрастания амплитуды возбуждающих постсинаптических потенциалов и популяционных спайков на уровне выхода сигналов можно объяснить развитием эксайтотоксичности, при выбросе возбуждающих аминокислот [25]. Полученные экспериментальные данные о восстановлении баланса input-output взаимоотношений в популяции клеток гиппокампа после ингибирования NO синтаз свидетельствуют о целесообразности ингибирования избыточной продукции NO в ситуациях, сопровождающихся ослаблением доставки кислорода к различным участкам мозга.

Таким образом, было обнаружено, что моделирование геморрагического инсульта приводит к существенному снижению уровня продукции NO в тканях гиппокампа. Данное снижение наблюдается через 5 часов после инсульта и продолжается, как минимум, трое суток. Значительная роль NO во многих процессах, в том числе и в деятельности нервной системы, а также недостаточность сведений о количестве синтезируемого NO и его функциях при различных патологиях предопределяют значимость дальнейших исследований в данном направлении. Поэтому решение вопроса о динамике продукции NO в тканях при развитии различных процессов, включая патологические, представляется чрезвычайно актуальным и может способствовать выработке новых подходов к фармакологической коррекции возникающих нарушений.

Авторы благодарят сотрудников института физиологии НАН Беларуси, г. Минск: проф. Кульчицкого В. А., Пашкевич С. Н., Денисова А. А., Досину М. О., Стукач Ю. П. за воспроизведение модели геморрагического инсульта.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-54-00098).

Литература

1. Ванин А.Ф.: Соросовский образовательный журн. № 11, 7–12 (2001)
2. Реутов В.П., Охотин В.Е., Шуклин А.В., Сорокина Е.Г., Косицын Н.С., Гурин В.Н.: Успехи физиол. наук. **38**, №4, 39–58 (2007)
3. Pacher P., Beckman J.S., Liaudet L.: Physiol. Rev. **87**, 315–427 (2007)
4. Гайнутдинов Х.Л., Андрианов В.В., Гайнутдинова Т.Х., Муранова Л.Н., Обыночный А.А., Тимошенко А.Х., Штарк М.Б., Эпштейн О.И., Юртаева С.В., Яфарова Г.Г.: Бюлл. экспер. биол. мед. **146**, №12, 617–622 (2008)
5. Steinert J.R., Chernova T., Forsythe I.D.: Neuroscientist **16** 435–452 (2010)
6. Timoshin A.A., Pisarenko O.I., Tskitishvili O.V., Serebriakova L.I., Studneva I.M., Drobotova D.Iu., Ruuge E.K., Vanin A.F.: Biofizika **55**, no.6, 1099–107 (2010)
7. Manukhina E.B., Downey H.F., Mallet R.T.: Exp. Biol. Med. **231**, 343–365 (2006)
8. Андрианов В.В., Ситдиков Ф.Г., Гайнутдинов Х.Л., Юртаева С.В., Обыночный А.А., Яфарова Г.Г., Муранова Л.Н., Каримов Ф.К., Чиглинцев В.М., Июдин В.С.: Онтогенез **39**, №6. 437–442 (2008)
9. Самойленкова Н.С., Гаврилова С.А., Кошелев В.Б.: Докл. акад. наук **414**, №2, 283–285 (2007)
10. Gainutdinov Kh.L., Gavrilova S.A., Iyudin V.S., Golubeva A.V., Davydova M.P., Jafarova G.G., Andrianov V.V., Koshelev V.B.: Appl. Magn. Reson. **40**, no.3, 267–278 (2011)
11. Байдер Л.М., Реутов В.П., Крушинский А.Л., Кузенков В.С., Сорокина Е.Г., Кошелев В.Б., Фадюкова О.Е., Жумабаева Т.Т., Комисарова Л.Х., Пинелис В.Г., Косицын Н.С., Куроптева З.В.: Биофизика **54**, №5 894–899 (2009)
12. Bolanos J.P., Almeida A.: Biochimica et Biophysica Acta (BBA) **1411** 415–436 (1999)
13. Андрианов В.В., Яфарова Г.Г., Июдин В.С., Гайнутдинов Х.Л.: Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2014. Ежегодник, С. 45–48 Казань: КФТИ КазНЦ РАН 2015.
14. Гаркун Ю.С., Якубович Н.В., Денисов А.А., Молчанов П.Г., Емельянова А.А., Пашкевич С.Г., Кульчицкий В.А.: Бюлл. эксперим. биол. медицины **145**, №4, 372–374 (2008)
15. Денисов А.А., Булай П.М., Кулагова Т.А.: Вестн. БГУ. Сер.1, №3, 32–38 (2009)
16. Khramtsov V.V., Volodarsky L.B.: Biol. Magnet. Reson. **14**, 109–180 (1998)
17. Vanin A.F., Huisman A., Van Faassen E.E.: Methods in Enzymology **359**, 27–42 (2003)
18. Микоян В.Д., Кубрина Л.Н., Ванин А.Ф.: Биофизика **39**, 915–918 (1994)
19. Гайнутдинов Х.Л., Андрианов В.В., Июдин В.С., Юртаева С.В., Яфарова Г.Г., Файзуллина Р.И., Ситдиков Ф.Г.: Биофизика **58**, №2, 276–280 (2013)
20. Andrianov V.V., Pashkevich S.G., Yafarova G.G., Denisov A.A., Iyudin V.S., Bogodvid T.Kh., Dosina M.O., Kulchitsky V.A., Gainutdinov Kh.L.: Appl. Magn. Reson. **47**, no.9, 965–976 (2016)
21. Лакин Г.Ф.: Биометрия. М.: Высшая школа 1990. 113 с.
22. Forstermann U., Sessa W.C.: Eur. Heart J. **33**, 829–837 (2012)
23. Зарипова Р.И., Гайнутдинов Х.Л., Зефиров Т.Л.: Бюлл. экспер. биол. мед. **157**, №5. 554–556 (2014)
24. Gainutdinov Kh.L., Andrianov V.V., Iyudin V.S., Yafarova G.G., Denisov A.A., Khotyanovich M.O., Pashkevich S.G., Kulchitchkii V.A.: International conference “Modern development of magnetic resonance-2015”, Abstracts, P. 96–97. Kazan 2015.
25. Potkin V., Shcharbin D., Denisov A., Paschkevich S., Bryszewska M., Petkevich S., Kletskov A., Lapotko D., Kazbanov V., Gurinovich T., Kulchitsky V.: Cellular & Molecular Biology Letters **19**(2) 243–248 (2014)

Селективная спектроскопия низкочастотных межмолекулярных движений в жидкости на основе техники двухимпульсного лазерного контроля

В. Г. Никифоров, Д. К. Жарков, А. Г. Шмелев, А. В. Леонтьев, В. С. Лобков

Отдел химической физики, лаборатория быстропротекающих молекулярных процессов

Экспериментально реализована спектроскопия низкочастотного отклика межмолекулярных колебаний в бензонитриле на основе двухимпульсного лазерного контроля когерентных движений молекул и регистрации сверхбыстрого оптического эффекта Керра (ОЭК). Это позволило устранить неоднозначность при разделении молекулярных откликов путём выбора сценария двухимпульсного возбуждения, в котором отклики ориентационной анизотропии и внутримолекулярных колебаний оказываются подавленными. Детальный сравнительный анализ оптических молекулярных откликов третьего и пятого порядков убедительно показал, что применение двухимпульсного возбуждения сверхбыстрого ОЭК является мощным спектроскопическим методом для получения обоснованной информации о спектре межмолекулярных движений.

Введение

Межмолекулярные взаимодействия в жидкости являются предметом активного изучения, поскольку они лежат в основе множества физических, химических и биологических процессов. Молекулярная динамика, диктуемая этими взаимодействиями, включает в себя колебания, столкновения и либрации молекул, которые имеют характерные частоты в области 0–150 $см^{-1}$ [1–3].

Фемтосекундная поляризационная спектроскопия с регистрацией сверхбыстрого оптического эффекта Керра (ОЭК) даёт возможности изучать время-разрешённые отклики молекулярных движений в жидкости с частотами от 0 до 500 $см^{-1}$, что открывает возможности для детальных исследований межмолекулярных когерентных движений [2, 4–6]. В работах [2, 7] показано, что, в принципе, частотно разрешённая спектроскопия (например, спектроскопия комбинационного рассеяния) позволяет извлекать идентичную информацию. Однако из-за сильного релеевского рассеяния, которое сопровождает спектроскопию спонтанного рассеяния света, регистрация сигнала в отмеченной области спектра оказывается не простой задачей [8].

Процедура деконволюции, предложенная в работах [9–11] для анализа данных сверхбыстрого ОЭК, даёт возможность избавиться от эффектов, связанных с конечной длительностью лазерных импульсов, и разделить сигнал на электронную и ядерную компоненты. Именно ядерная компонента содержит спектроскопическую информацию о колебательных и вращательных движениях молекул в жидкости.

Важный этап изучения данных спектроскопии сверхбыстрого ОЭК основывается на анализе рамановской спектральной плотности [9–11]. Она содержит в себе информацию обо всех комбинационно активных молекулярных движениях. Для исследования межмолекулярных откликов из рамановской спектральной плотности необходимо удалить вклад, соответствующий внутримолекулярным колебаниям и ориентационным движениям молекул. Внутримолекулярные отклики имеют ярко выраженные интенсивные полосы с максимумами, соответствующими частотам внутримолекулярных колебательных мод, что позволяет легко выделить их вклад из совокупного спектра. Однако корректное разделение вкладов, соответствующих когерентным ориентационным и межмолекулярным движениям молекул, представляет собой сложную задачу, что затрудняет получение достоверной информации о низкочастотном спектре межмолекулярных движений.

Традиционный способ решения этой задачи заключается в вычитании ориентационного вклада из сигнала сверхбыстрого ОЭК [11, 12]. Ориентационная упорядоченность молекул, созданная интенсивным импульсом накачки, разрушается под действием процессов вращательной диффузии. Таким образом, ориентационный отклик представляет собой экспоненциально затухающую функцию с характерным временем релаксации более 1 пс. В результате этой процедуры получают редуцированную рамановскую спектральную плотность (РСП), которая должна отражать спектральные характеристики межмолекулярных движений. В настоящее время для описания РСП используют ряд функций [13–25], с большой точностью описывающих экспериментальные данные, но не дающих физической интерпретации полученным результатам.

Спектр межмолекулярных движений, в предположении, что они являются молекулярными либрациями, может быть также получен из анализа сигнала сверхбыстрого ОЭК, предложенного в работах [26, 27]. Этот подход мы применили для изучения молекулярных либраций в жидкости бензонитрила C_6H_5CN, которая хорошо изучена спектроскопией сверхбыстрого ОЭК, её РСП можно увидеть, например, в работах [28, 29]. Мы провели подробный анализ РСП и спектра молекулярных либраций и установили связь между ними.

Существенный акцент в нашей работе сделан на проблеме корректного разделения межмолекулярного и ориентационного вкладов в сигнале сверхбыстрого ОЭК для получения достоверной информации о спектре межмолекулярных движений. С этой целью мы провели эксперименты с двухимпульсным возбуждением сверхбыстрого ОЭК, что позволило применить технику лазерного контроля молекулярных движений для создания разных сценариев когерентных движений молекул в жидкости [30, 31]. Особое внимание мы уделили сценарию, в котором реализуется подавление откликов внутримолекулярных колебаний и молекулярных ориентаций. Таким образом, с помощью техники двухимпульсного возбуждения сверхбыстрого ОЭК мы экспериментально выделили межмолекулярный вклад.

Ниже мы проводим подробный анализ полученных оптических откликов межмолекулярных движений третьего порядка на основе (a) процедуры деконволюции [9–12] и (b) указанного выше теоретического подхода [26, 27, 30, 31]. Анализ оптических откликов пятого порядка проводился на основе теоретического подхода (b), поскольку процедура деконволюции (a) пригодна только для анализа результатов экспериментов по четырёхволновому смешению.

Теоретическая часть

Наблюдаемый в эксперименте сигнал сверхбыстрого ОЭК $S(\tau)$ описывается сверткой функции оптического нелинейного отклика среды $r(t)$ и автокорреляционной функции лазерных импульсов $G(t-\tau)$:

$$S(\tau) \sim \int_{-\infty}^{\infty} r(t)G(t-\tau)\,\mathrm{d}t\,, \tag{1}$$

$$G(x) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x+t)I(t)\,\mathrm{d}t\,, \tag{2}$$

где τ – задержка между возбуждающим и пробным импульсами, $I(t)$ – огибающая интенсивности лазерного импульса. Функция отклика $r(t)$ является суперпозицией независимых друг от друга "электронного" σ и "ядерного" $\mathrm{d}(t)$ молекулярных откликов:

$$r(t) = \sigma + \mathrm{d}(t). \tag{3}$$

"Электронный" отклик σ отражает состояние поляризуемости молекул вследствие изменения конфигурации электронной плотности внешним полем. Предполагается "мгновенная" реакция электронов на внешнее поле, в результате чего вклад этого отклика в наблюдаемый сигнал повторяет форму автокорреляционной функции $G(t)$, которая не несет в себе спектроскопическую информацию. Функция $\mathrm{d}(t)$, напротив, представляет главный спектроскопический интерес, поскольку она связывает изменение поляризуемости среды с когерентными движениями молекулярных ядер.

Для разделения "электронного" и "ядерного" откликов применяется известная процедура деконволюции сигнала сверхбыстрого ОЭК [9–11], которая использует Фурье-преобразование сигнала ОЭК и свойства указанных молекулярных откликов:

$$d^{(a)}(t) \sim \mathrm{i}\theta(t)\int_{-\infty}^{\infty}\exp(-\mathrm{i}\omega t)T(\omega)\,\mathrm{d}\omega\,, \tag{4}$$

$$T(\omega) = \mathrm{Im}\left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty}\exp(-\mathrm{i}\omega t)S(t)\,\mathrm{d}t}{\int_{-\infty}^{\infty}\exp(-\mathrm{i}\omega t)G(t)\,\mathrm{d}t}\right), \tag{5}$$

где $\theta(t)$ – функция Хевисайда.

В свою очередь функция "ядерного" отклика $d^{(a)}(t)$ представляет собой суперпозицию откликов разных молекулярных движений, которые по своему характеру можно разделить на внутримолекулярные колебания $r_{\mathrm{vib}}(t)$, ориентационную упорядоченность молекул в среде $r_{\mathrm{or}}(t)$ и молекулярные либрации $r_{\mathrm{lib}}(t)$, связанные с межмолекулярными взаимодействиями. Для изучения спектра межмолекулярных движений из совокупного сигнала ОЭК $S(t)$ удаляется вклад ориентационного отклика:

$$S_R(t) = S(t) - \int_{-\infty}^{\infty} r_{\mathrm{or}}(t)G(t-\tau)\,\mathrm{d}t\,, \tag{6}$$

затем функция $S_R(t)$ подвергается процедуре деконволюции (4) и (5), в результате которой получают редуцированную рамановскую спектральную плотность $T_{RSD}(\omega)$. При этом ориентационный отклик $r_{\mathrm{or}}(t)$ заменяется функцией вида:

$$r_{\mathrm{or}}^{(a)}(t) \sim \left(A\cdot\exp\left(-\frac{t}{\tau_{\mathrm{or}}^{(1)}}\right) + (1-A)\exp\left(-\frac{t}{\tau_{\mathrm{or}}^{(2)}}\right)\right) \times\left(1-\exp\left(-\frac{t}{\gamma}\right)\right), \tag{7}$$

где константа A принимает значения от 0 до 1, параметры $\tau_{\mathrm{or}}^{(i)}$ характеризуют время релаксации наведенной анизотропии в результате процесса вращательной диффузии, а параметр γ описывает время нарастания ориентационной анизотропии под действием импульса накачки.

Другой способ анализа экспериментальных результатов предполагает прямое моделирование молекулярных откликов и вычисление наблюдаемого сигнала на основании выражения (1). Следуя работам [26, 27, 30, 31], запишем отклик внутримолекулярных колебаний в виде:

$$r_{\mathrm{vib}}^{(b)}(t) = \theta(t)(\Omega')^{-1}\exp(-t/\tau_{\mathrm{vib}})\sin(\Omega' t), \tag{8}$$

$$\Omega' = (\Omega^2 - \tau_{\mathrm{vib}}^{-2})^{-1/2}, \tag{9}$$

$$S_{\mathrm{vib}}^{(b)}(\tau) \sim \int_{-\infty}^{\infty} r_{\mathrm{vib}}(t)G(t-\tau)\,\mathrm{d}t\,, \tag{10}$$

где Ω – частота внутримолекулярных колебаний, τ_{vib} – время релаксации. Величина $R_{\mathrm{vib}}^{(b)}(t) \sim \int_{-\infty}^{\infty} I(t-x)r_{\mathrm{vib}}^{(b)}(x)\,\mathrm{d}x$

отражает степень наведенной анизотропии, связанной с внутримолекулярным откликом среды $r_{\text{vib}}^{(b)}(x)$.

В подходе (b) предполагается, что межмолекулярными движениями являются молекулярные либрации – вращательные колебания молекул около равновесных положений. В основе описания либрационного отклика $r_{\text{lib}}^{(b)}(t)$ лежит представление о неоднородном распределении либрационных частот молекул, которое отражает разные варианты взаимодействия молекулы со своими соседями и учитывается с помощью функции распределения $\rho_{\text{lib}}^{(b)}(\omega)$:

$$r_{\text{lib}}^{(b)}(t) = \theta(t)\int_0^\infty \rho_{\text{lib}}^{(b)}(\omega)\omega^{-1}\sin(\omega t)\,\mathrm{d}\,\omega\,, \tag{11}$$

$$S_{\text{lib}}^{(b)}(\tau) \sim \int_{-\infty}^{\infty} r_{\text{lib}}^{(b)} G(t-\tau)\,\mathrm{d}\,t\,. \tag{12}$$

Выражение (11) предполагает, что доминирующим механизмом релаксации когерентных либраций, вызванных действием интенсивного импульса накачки, является их дефазировка.

Возникновение когерентных либраций, ориентирующих молекулы вдоль направления поляризации возбуждающего импульса, приводит к появлению ориентационной анизотропии среды, состояние которой описывается ориентационной функцией отклика $r_{\text{or}}^{(b)}(t)$:

$$r_{\text{or}}^{(b)}(t) \sim \theta(t)\exp(-t/\tau_{\text{or}}), \tag{13}$$

где τ_{or} – время релаксации ориентационной анизотропии. Выражение (13) учитывает факт того, что разрушение ориентационной упорядоченности в среде после действия лазерного импульса возникает в результате процессов вращательной диффузии. Предполагается, что степень ориентационной упорядоченности молекул $R_{\text{or}}^{(b)}(t)$ в среде пропорциональна амплитуде молекулярных либраций $R_{\text{lib}}^{(b)}(t)$:

$$R_{\text{or}}^{(b)}(t) \sim \int_{-\infty}^{\infty} R_{\text{lib}}^{(b)}(t-x) r_{\text{or}}^{(b)}(x)\,\mathrm{d}\,x\,, \tag{14}$$

$$R_{\text{lib}}^{(b)}(t) \sim \int_{-\infty}^{\infty} I(t-y) r_{\text{lib}}^{(b)}(y) r_{\text{or}}^{(b)}(y)\,\mathrm{d}\,y\,. \tag{15}$$

Тогда ориентационный вклад $S_{\text{or}}^{(b)}(t)$ в наблюдаемый сигнал ОЭК $S(t)$ является результатом свертки функций либрационного $r_{\text{lib}}^{(b)}(t)$ и ориентационного $r_{\text{or}}^{(b)}(t)$ откликов с автокорреляционной функцией лазерных импульсов $G(t-\tau)$:

$$\begin{aligned} S_{\text{or}}(\tau) &\sim \int_{-\infty}^{\infty} I(t-\tau)\,\mathrm{d}\,t \int_{-\infty}^{\infty} R_{\text{lib}}^{(b)}(t-x) r_{\text{or}}^{(b)}(x)\,\mathrm{d}\,x \\ &= \int\int_{-\infty}^{\infty} r_{\text{or}}^{(b)}(x) r_{\text{lib}}^{(b)}(y) G(x+y-\tau)\,\mathrm{d}\,x\,\mathrm{d}\,y\,. \end{aligned} \tag{16}$$

Как уже было отмечено, функцией "электронного" отклика является константа σ, которая определяет "электронный" вклад в совокупный сигнал сверхбыстрого ОЭК:

$$S_{\sigma}(\tau) \sim \sigma G(\tau). \tag{17}$$

Таким образом, выражения (8)–(17) описывают вклады всех молекулярных откликов в наблюдаемый сигнал ОЭК:

$$S(\tau) = S_{\sigma}(\tau) + S_{\text{vib}}(\tau) + S_{\text{lib}}(\tau) + S_{\text{or}}(\tau), \tag{18}$$

которые необходимы для моделирования экспериментальных результатов в случае одноимпульсного возбуждения сверхбыстрого ОЭК. Согласно [30, 31], выражения (8)–(18) могут быть обобщены на случай возбуждения среды двумя импульсами со взаимно ортогональными линейными поляризациями:

$$I(t) = I_x(t) + I_y(t), \tag{19}$$

где $I_x(t)$ и $I_y(t)$ – огибающие интенсивности импульсов накачки, линейно поляризованных вдоль осей x и y. В этом случае вводится возбуждающая функция $f_{\text{ex}}(t)$:

$$f_{\text{ex}}(t) = G_x(t) - G_y(t), \tag{20}$$

которая заменяет функцию $G(t)$ в выражениях (10), (12), (16) и (17) для расчёта молекулярных откликов.

Экспериментальная часть

В качестве источника фемтосекундных импульсов использовался титан-сапфировый лазер (производство Авеста-Проект, Троицк, Россия). Средняя энергия лазерных импульсов длительностью 45 фс на полувысоте с длиной несущей волны 790 нм составила $4 \cdot 10^{-9}$ Дж. В основе эксперимента лежала оптическая схема, описанная в работе [31]. Это позволяло возбуждать среду двумя интенсивными лазерными импульсами с линейными, взаимно ортогональными поляризациями. Регистрация сверхбыстрого ОЭК осуществлялась пробным импульсом с линейной поляризацией, ориентированной под углом 45° к линейным поляризациям возбуждающих импульсов. Интенсивность пробного импульса составляла 10% от интенсивности импульсов накачки. При регистрации сверхбыстрого оптического эффекта Керра использовались известные методы оптического гетеродинирования и синхронного детектирования. Все эксперименты проводились при комнатной температуре.

Регистрация с применением синхронного детектирования осуществлялась без учёта фазы. В этом случае наблюдаемый сигнал $S_{\text{det}}(\tau)$ связан с сигналом сверхбыстрого ОЭК $S(\tau)$ соотношением:

$$S_{\text{det}}(\tau) = \left| S(\tau) + C_{\text{det}} \right|, \tag{21}$$

где аппаратная постоянная C_{det} диктуется условиями регистрации.

В качестве среды мы выбрали прозрачную в области 790 нм чистую профильтрованную (размер пор фильтра

0.2 мкм) жидкость бензонитрила C_6H_5CN, которая помещалась в кварцевой кювете толщиной 3 мм. В бензонитриле наблюдаются интенсивные комбинационно активные колебательные и вращательные молекулярные отклики [28, 29, 32], которые создают условия для проведения экспериментов по двухимпульсному лазерному когерентному контролю молекулярной динамики.

Результаты

На рис. 1 показан сигнал сверхбыстрого ОЭК в бензонитриле, который содержит интенсивные отклики молекулярных колебаний и вращений. Спектр комбинационного рассеяния на рис. 2 показывает комбинационно активные низкочастотные внутримолекулярные моды с частотами 170, 378 и 458 см$^{-1}$. В эксперименте использовались возбуждающие лазерные импульсы $I_x(t)$ с линейной поляризацией вдоль оси x, огибающая интенсивности которых описывается выражением:

$$I_x(t) = \mathrm{sec}h(-t/\tau_l) + 0.17 \cdot \exp\{(-t^2/(8\tau_l)^2\}, \qquad (22)$$

где параметр τ_l имеет значение 13 фс. Данные импульсы характеризуются длительностью 45 фс на полувысоте, что позволяет эффективно возбуждать и регистрировать лишь низкочастотные колебания 170 см$^{-1}$.

На рис. 3 приведены результаты двух сценариев лазерного двухимпульсного контроля молекулярной динамики [30, 31, 33]. В эксперименте использовалась последовательность двух возбуждающих импульсов (19), в которой помимо импульса $I_x(t)$ на среду с задержкой

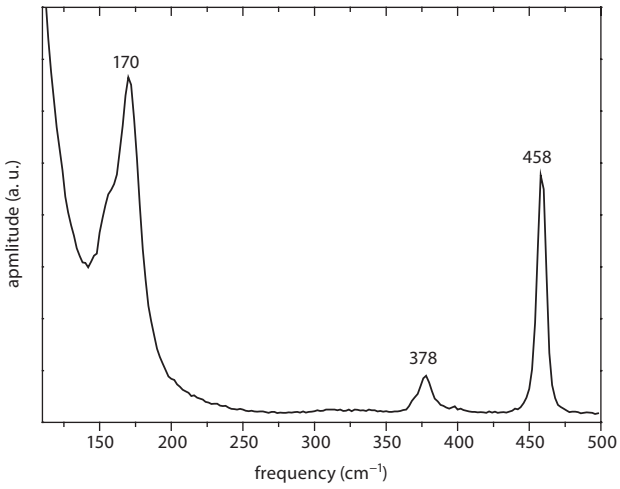


Рис. 2. Спектр комбинационного рассеяния в бензонитриле.

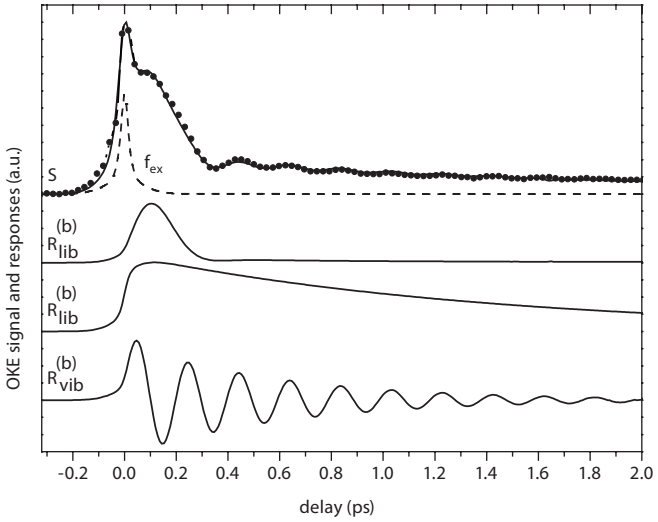


Рис. 1. Сигнал сверхбыстрого ОЭК в бензонитриле при одноимпульсном возбуждении. ● – экспериментальные данные, пунктирной кривой обозначена возбуждающая функция f_{ex}, сплошными кривыми обозначены моделирование S_{det} и компоненты анизотропии среды, соответствующие молекулярным либрациям $R^{(b)}_{lib}$, ориентациям $R^{(b)}_{or}$ и внутримолекулярным колебаниям $R^{(b)}_{vib}$.

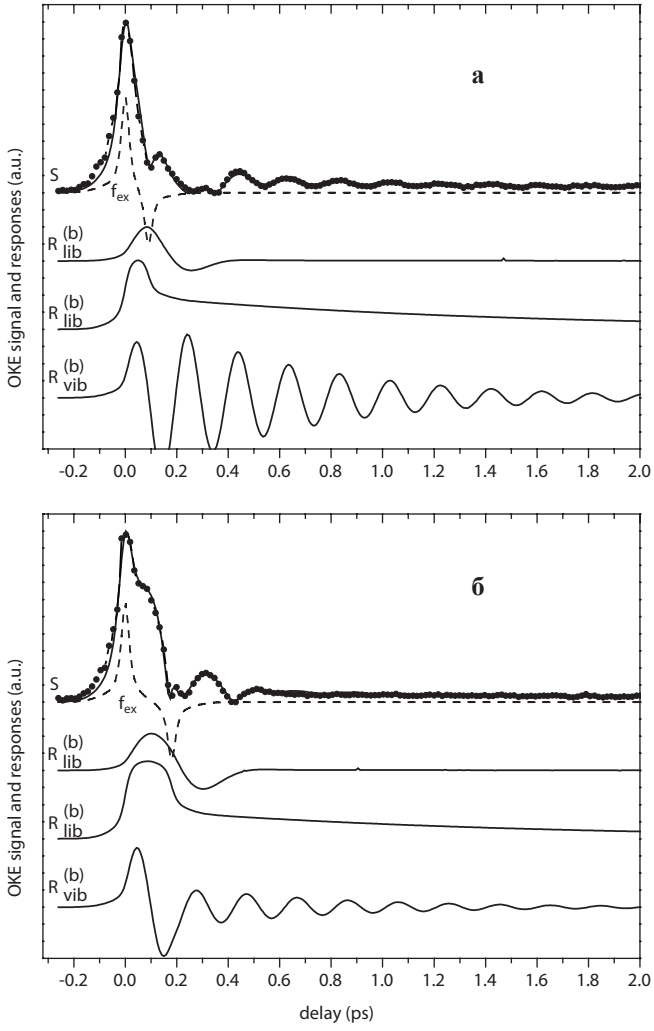


Рис. 3. Сигнал сверхбыстрого ОЭК в бензонитриле при двухимпульсном возбуждении с задержками 90 фс (**а**) и 180 фс (**b**). ● – экспериментальные данные, пунктирной кривой обозначена возбуждающая функция f_{ex}, сплошными кривыми обозначены моделирование S_{det} и компоненты анизотропии среды, соответствующие молекулярным либрациям $R^{(b)}_{lib}$, ориентациям $R^{(b)}_{or}$ и внутримолекулярным колебаниям $R^{(b)}_{vib}$.

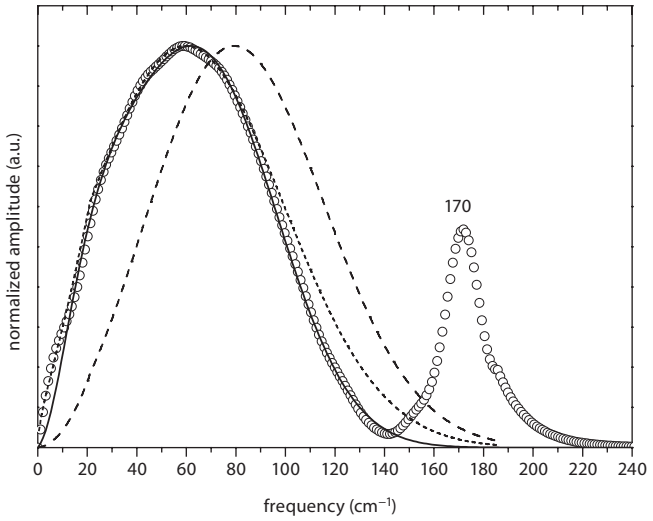


Рис. 4. Низкочастотный спектр межмолекулярных движений. o – редуцированная рамановская спектральная плотность T_{RSD}, сплошная кривая – спектральная функция $\rho_{RSD}^{(a)}$, длинный пунктир – спектр молекулярных либраций $\rho_{\text{lib}}^{(b)}$, короткий пунктир – функция $\rho_{\text{lib}}^{(b)}(\omega)/\omega$.

τ_{12} действовал импульс $I_y(t)$ с линейной поляризацией вдоль оси y и огибающей интенсивности:

$$I_y(t) = 0.6 \cdot I_x(t - \tau_{12}). \qquad (23)$$

В первом сценарии на рис. 3a задержка между импульсами τ_{12} составляет 90 фс. Видно, что действие второго импульса приводит к значительному подавлению ориентационной анизотропии среды $R_{\text{or}}^{(b)}(t)$. Задержка между импульсами 90 фс близка к значению π/Ω_{vib} = 98 фс, что соответствует режиму усиления амплитуды когерентных внутримолекулярных колебаний $R_{\text{vib}}^{(b)}(t)$ [31, 33].

На рис. 3b показан второй сценарий, где задержка между возбуждающими импульсами τ_{12} составляет 180 фс. Данные параметры также приводят к подавлению амплитуды ориентационного отклика $R_{\text{or}}^{(b)}(t)$. Однако, в отличие от первого сценария, задержка близка к значению $2\pi/\Omega_{\text{vib}}$ = 196 фс, что соответствует режиму подавления амплитуды колебательного отклика $R_{\text{vib}}^{(b)}(t)$. Таким образом, во втором сценарии после действия возбуждающей последовательности сигнал сверхбыстрого ОЭК в значительной мере формируется когерентными молекулярными либрациями, т.е. происходит селективная регистрация время-разрешённого либрационного отклика $R_{\text{lib}}^{(b)}(t)$.

Для анализа межмолекулярных колебаний в эксперименте с одноимпульсным возбуждением мы использовали процедуру деконволюции (a). Для этого из наблюдаемого сигнала сверхбыстрого ОЭК на основании выражения (6) был удален ориентационный отклик $r_{\text{or}}^{(a)}(t)$, который описывался феноменологической функцией (7) с параметрами A = 0.2, $\tau_{\text{or}}^{(1)}$ = 8 пс, $\tau_{\text{or}}^{(2)}$ = 0.4 пс и γ = 0.3 пс. Полученная в результате этой процедуры редуцированная рамановская спектральная плотность $T_{RSD}(\omega)$ показана на рис. 4. Характерный пик в области 170 см$^{-1}$ соответствует низкочастотным внутримолекулярным колебаниям. Широкую полосу в области 0-150 см$^{-1}$ соотносят со спектром межмолекулярных колебаний. Отметим, что полученная нами РСП в деталях согласуется с опубликованными данными по бензонитрилу, например, в работах [28, 29].

Нами также проведён анализ экспериментальных данных по сверхбыстрому ОЭК путём прямого моделирования молекулярных откликов третьего и пятого порядков на основании подхода (b), ключевые положения которого изложены выше и отражены в формулах (8)–(20). Следующие параметры молекулярной динамики Ω_{vib} =170 см$^{-1}$, τ_{vib} = 0.6 пс, τ_{or} = 1.3 пс вместе с функцией распределения $\rho_{\text{lib}}(\omega)$, показанной на рис. 4 длинной штриховой линией, были использованы для моделирования экспериментальных данных на рис. 1 и 4, где также показаны функции $R_i^{(b)}(\tau)$, характеризующие состояние анизотропии среды в момент зондирования τ.

Обсуждение

Оба представленных выше подхода (a) и (b) детально воспроизводят экспериментальные данные, однако рис. 4 ясно показывает существенное отличие РСП от спектра молекулярных либраций. При ширине спектров на полувысоте 70–80 см$^{-1}$ разница в положениях их максимумов составляет ~45 см$^{-1}$.

Важно отметить, что моделирование оптических откликов в сигнале сверхбыстрого ОЭК при одноимпульсном возбуждении и в сценариях двухимпульсного возбуждения проведено с единым набором параметров на основании подхода (b). Из рис. 1 и 3 видно, что расчёт хорошо согласуется с результатами эксперимента, что, в свою очередь, указывает на обоснованность, предсказательную силу теоретического подхода (b) и корректность найденных параметров молекулярной динамики.

Особым моментом применения двухимпульсного возбуждения является сценарий на рис. 3b, в котором ориентационный отклик и отклик внутримолекулярных колебаний оказываются подавленными, что создаёт условие более точной регистрации время-разрешённого либрационного отклика. После действия двухимпульсного возбуждения в области от 200 до 500 фс основной вклад в сигнал сверхбыстрого ОЭК вносит либрационный отклик. Таким образом, хорошее согласие экспериментальных данных с расчётом указывает на адекватность найденного спектра молекулярных либраций, представленного на рис. 4.

Вопрос о взаимном соответствии спектральных функций на рис. 4 требует детального обсуждения. РСП и спектру молекулярных либраций соответствуют разные функции молекулярных откликов. Межмолекулярный отклик $r_{RSD}^{(a)}(t)$ можно получить из редуцированной рамановской плотности $T_{RSD}(\omega)$, если исключить пик в области 170 см$^{-1}$, соответствующий внутримолекулярным

колебаниям. Это удобно сделать с помощью функции Букаро и Литовитца [34]:

$$\rho_{BL}(\omega) = \omega^{a}\exp(-\omega/\omega_{B}) \quad (24)$$

и антисимметричной функции Гаусса:

$$\rho_{AG}(\omega) = \exp\left(-\frac{(\omega-\omega_{AG})^2}{\Delta\omega^2}\right) - \exp\left(-\frac{(\omega+\omega_{AG})^2}{\Delta\omega^2}\right), \quad (25)$$

которые входят в состав спектра межмолекулярных колебаний $\rho_{RSD}^{(a)}(\omega)$:

$$\rho_{RSD}^{(a)}(\omega) = f\cdot\rho_{BL}(\omega) + g\cdot\rho_{AG}(\omega). \quad (26)$$

Рис. 4 показывает, что набор параметров $f/g = 0.078$, $a = 2.5$, $\omega_{BL} = 11.7$ см$^{-1}$, $\omega_{AG} = 69$ см$^{-1}$ и $\Delta\omega = 29$ см$^{-1}$ детально воспроизводит экспериментальные данные. Отклик $r_{RSD}^{(a)}(t)$, вычисленный на основании выражения (4):

$$r_{RSD}^{(a)}(t) \sim \mathrm{i}\,\theta(t)\int_{-\infty}^{\infty}\exp(-\mathrm{i}\,\omega t)\rho_{RSD}^{(a)}(\omega)\,\mathrm{d}\,\omega \quad (27)$$

показан на рис. 5. Либрационный отклик $r_{\mathrm{lib}}^{(b)}(t)$, характерный для распределения $\rho_{\mathrm{lib}}^{(b)}(\omega)$, которое найдено в результате моделирования сверхбыстрого ОЭК при одно- и двухимпульсном возбуждении на основании выражений (8)–(20), также показан на рис. 5. Хорошо видно, что функции откликов $r_{RSD}^{(a)}(t)$ и $r_{\mathrm{lib}}^{(b)}(t)$ практически идентичны в области от 0 до 300 фс, где они достигают своего максимума. Небольшие качественные расхождения функций откликов в области более 300 фс обусловлены, главным образом, разными способами выделения ориентационного вклада из сигнала сверхбыстрого ОЭК. Это замечание подтверждает рис. 5, на котором приведена функция $R_{\mathrm{or}}^{(a)}(t) \sim \int_{-\infty}^{\infty} I(t-x)r_{\mathrm{or}}^{(a)}(x)\,\mathrm{d}\,x$, характеризующая состояние

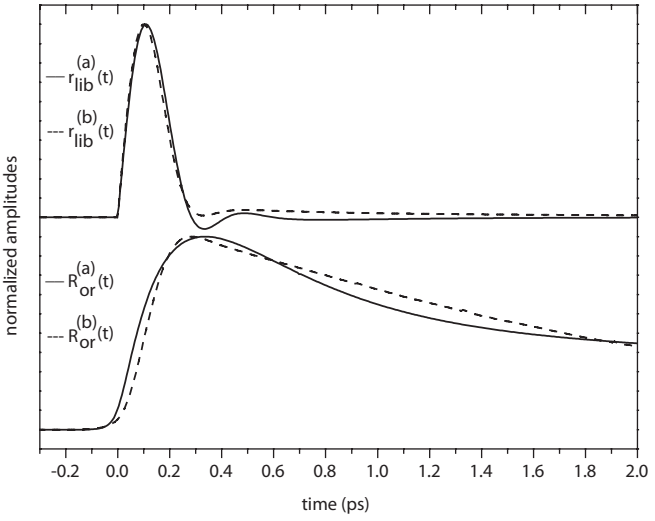


Рис. 5. Функции межмолекулярного отклика $r_{RSD}^{(a)}$, либрационного отклика $r_{\mathrm{lib}}^{(b)}$. Функции откликов, характеризующие состояние ориентационной анизотропии среды в момент зондирования $R_{\mathrm{or}}^{(a)}$ и $R_{\mathrm{or}}^{(b)}$.

наведенной ориентационной анизотропии среды. На рисунке видно её отличие от функции $R_{\mathrm{or}}^{(b)}(t)$, полученной на основании моделирования экспериментальных данных с помощью выражения (14).

Если в дальнейших рассуждениях потребовать идентичность межмолекулярного и либрационного откликa $r_{RSD}^{(a)}(t) = r_{\mathrm{lib}}^{(b)}(t)$ при моделировании экспериментальных результатов на основании подходов (a) и (b), то получим следующее выражение:

$$r_{RSD}^{(a)}(t) \sim \theta(t)\int_{-\infty}^{\infty}\rho_{\mathrm{lib}}^{(b)}(\omega)\omega^{-1}\sin(\omega t)\,\mathrm{d}\,\omega\,. \quad (28)$$

Мнимая часть Фурье-преобразования левой части выражения (28) будет пропорциональна функции $\rho_{RSD}^{(a)}(\omega)$, которая вместе со спектром частот внутримолекулярных колебаний составляет редуцированную рамановскую плотность $T_{RSD}(\omega)$. В результате Фурье-преобразования правой части получим соотношение между функциями $\rho_{RSD}^{(a)}(\omega)$ и $\rho_{\mathrm{lib}}^{(b)}(\omega)$:

$$\rho_{RSD}^{(a)}(\omega) \sim \frac{\rho_{\mathrm{lib}}^{(b)}(\omega)}{\omega}\,. \quad (29)$$

Таким образом, выражение (29) определяет соответствие между спектрами межмолекулярных движений и молекулярных либраций, полученными на основе процедуры деконволюции (a) и теоретического подхода (b). Рис. 4 показывает хорошее совпадение функций $\rho_{\mathrm{lib}}^{(b)}(\omega)/\omega$ и $\rho_{RSD}^{(a)}(\omega)$, что в свою очередь, указывает на согласованность обоих подходов.

Небольшое несоответствие в деталях этих кривых, на наш взгляд, связано с важным моментом разделения ориентационного и межмолекулярного вкладов в совокупном сигнале сверхбыстрого ОЭК. В случае использования процедуры деконволюции (a) возникает вопрос об обоснованности применения функции ориентационного отклика в виде (7). Параметры $\tau_{\mathrm{or}}^{(i)}$ соответствуют временам релаксации ориентационной упорядоченности молекул в среде, которая разрушается из-за процессов вращательной диффузии. Однако не ясно, каким взаимодействиям молекул в среде соответствует параметр γ, обуславливающий нарастание ориентационного отклика $r_{\mathrm{or}}^{(a)}(t)$ после действия возбуждающего импульса.

С точки зрения строгого анализа экспериментальных данных, предпочтение следует отдать моделированию на основании подхода (b). Функция $\rho_{\mathrm{lib}}^{(b)}(\omega)$ вместе с (11) и (12) одновременно описывает либрационную динамику и для одноимпульсного возбуждения, что соответствует регистрации оптического отклика среды третьего порядка, и для сценариев двухимпульсного возбуждения, которые требуют расчёта оптического отклика пятого порядка. Особенно отметим сценарий селективной регистрации либрационного вклада, представленного на рис.4b, когда сигнал сверхбыстрого ОЭК формируется, главным образом, молекулярными либрациями. Параметры возбуждения подобраны таким образом, что ориентационный отклик и отклик внутримолекулярных колебаний после двухимпульсного возбуждения оказываются подавленными.

Это в значительной мере снимает вопрос с разделением молекулярных вкладов при анализе экспериментальных данных, что заметно снижает ошибку в определении спектра молекулярных либраций.

Выводы

В работе применена техника регистрации сверхбыстрого ОЭК в бензонитриле для изучения межмолекулярных движений. Для анализа экспериментальных данных при одноимпульсном возбуждении мы использовали подход (a), предложенный в работах [9–11], который основан на процедуре деконволюции, позволяющей устанавливать вид функций оптических откликов третьего порядка. Нами также был использован подход (b), описанный в работах [26, 27, 30, 31], который даёт возможность моделировать оптические молекулярные отклики среды третьего и более высоких порядков.

Установлено, что применение двух разных подходов для получения спектральной информации межмолекулярных движений из анализа данных по сверхбыстрому ОЭК даёт результаты, которые с помощью соотношения (29) в значительной мере согласуются друг с другом (см. рис. 4) в предположении, что спектр межмолекулярных колебаний $\rho_{RSD}^{(a)}(\omega)$ полностью определяется молекулярными либрациями. Небольшие расхождения между спектральными функциями мы связываем с произволом выделения ориентационного вклада из совокупного сигнала сверхбыстрого ОЭК в подходе (a). Мы полагаем, это происходит из-за того, что параметр γ в выражении (7), определяющий нарастание ориентационной анизотропии, является физически не обоснованным, а его величина определяется интуитивным способом.

Нами проведены эксперименты с двухимпульсным контролем когерентных молекулярных движений, которые обеспечили селективную регистрацию либрационного отклика, что в значительной мере устранило неопределённость при разделении вкладов ориентационного и либрационного откликов. Обращаем внимание, что моделирование сценариев с двухимпульсным возбуждением подтвердило адекватность и предсказательную силу подхода (b), а также дало дополнительную обоснованность найденному при моделировании единому набору параметров молекулярной динамики. Таким образом, двухимпульсные эксперименты с регистрацией сверхбыстрого ОЭК в бензонитриле убедительно показали, что применение сценариев подавления откликов ориентационной анизотропии и внутримолекулярных колебаний является мощным спектроскопическим методом для получения обоснованной информации о межмолекулярных движениях.

Работа поддержана грантами РФФИ (№ 15-03-02544_а, 16-32-00397_мол_а, 16-32-00406_мол_а, 17-02-00701_а).

Литература

1. Nielsen O.F.: Annu. Rep. Prog. Chem., Sect. C: Phys. Chem. **93**, 57–99 (1996)
2. Kinoshita S., Kai Y., Ariyoshi T., Shimada Y.: International Journal of Modern Physics B **10**, no.11, 1229–1272 (1996)
3. Castner E.W., Wishart J.F., Shirota H.: Acc. Chem. Res. **40**, no.11, 1217–1227 (2007)
4. Shirota H., Kato T.: J. Phys. Chem. A **115**, no.32, 8797–8807 (2011)
5. Zhong Q., Fourkas J.T.: J. Phys. Chem. B **112**, no.49, 15529–15539 (2008)
6. Hunt N.T., Jaye A.A., Meech S.R.: Phys. Chem. Chem. Phys. **9**, no.18, 2167–2180 (2007)
7. Kinoshita S., Kai Y., Yamaguchi M., Yagi T.: Chem. Phys. Lett. **236**, no.3, 259–264 (1995)
8. Nakayama H., Yajima S., Yoshida T., Ishii K.: J. Raman Spectrosc. **28**, no.1, 15–22 (1997)
9. McMorrow D.: Opt. Comm. **86**, no.2, 236–244 (1991)
10. McMorrow D., Lotshaw W.T.: Chem. Phys. Lett. **174**, no.1, 85–94 (1990)
11. McMorrow D., Lotshaw W.T.: J. Phys. Chem. **95**, no.25, 10395–10406 (1991)
12. Smith N.A., Meech S.R.: Int. Rev. Phys. Chem. **21**, no.1, 75–100 (2002)
13. Smith N.A., Lin S.J., Meech S.R., Shirota H., Yoshihara K.: J. Phys. Chem. A **101**, no.50, 9578–9586 (1997)
14. Smith N.A., Meech S.R.: J. Phys. Chem. A **104**, no.18, 4223–4235 (2000)
15. Giraud G., Gordon C.M., Dunkin I.R., Wynne K.: J. Chem. Phys. **119**, no.1, 464–477 (2003)
16. Tanimura Y., Mukamel S.: J. Chem. Phys. **99**, no.12, 9496–9511 (1993)
17. Palese S., Buontempo J.T., Schlling L., Lotshaw W.T., Tamimura Y., Mukamel S., Dwayne Miller R.J.: J. Phys. Chem. **98**, no.48, 12466–12470 (1994)
18. Palese S., Mukamel S., Dwayne-Miller R.J., Lotshaw W.T.: J. Phys. Chem. **100**, no.24, 10380–10388 (1996)
19. Bartolini P., Ricci M., Torre R., Righini R., Santa I.: J. Chem. Phys. **110**, no.17, 8653–8662 (1999)
20. McMorrow D., Thantu N., Kleiman V., Melinger J.S., Lotshaw W.T.: J. Phys. Chem. A **105**, no.34, 7960–7972 (2001)
21. Cho M., Du M., Scherer N.F., Fleming G.R., Mukamel S.: J. Chem. Phys. **99**, no.4, 2410–2428 (1993)
22. Shirota H., Yoshihara K., Smith N.A., Lin S., Meech S.R.: Chem. Phys. Lett. **281**, no.1 27–34 (1997)
23. Chang Y.J., Castner Jr. E.W.: J. Chem. Phys. **99**, no.10, 7289–7299 (1993)
24. Chang Y.J., Castner Jr. E.W.: J. Phys. Chem. **98**, no.39, 9712–9722 (1994)
25. Chang Y.J., Castner Jr. E.W.: J. Phys. Chem. **100**, no.9, 3330–3343 (1996)
26. Nikiforov V.G.: Quantum Electronics **43**, no.177 (2013)
27. Nikiforov V.G., Lobkov V.S.: Quantum Electronics **36**, no.10, 984 (2006)
28. Chang Y.J., Cong P., Simon J.: J. Chem. Phys. **106**, no.21, 8639–8649 (1997)
29. Cong P., Deuel H.P., Simon J.D.: Chem. Phys. Lett. **240**, no.1, 72–78 (1995)
30. Nikiforov V.G., Shmelev A.G., Safiullin G.M., Lobkov V.S.: Appl. Phys. Lett. **100**, no.8, 081904 (2012)
31. Nikiforov V.G., Shmelev A.G., Safiullin G.M., Lobkov V.S.: Chem. Phys. Lett. **592**, 196–199 (2014)
32. Nikiforov V.G., Lobkov V.S.: Journal of Structural Chemistry **50**, no.4, 789–794 (2009)
33. Nikiforov V.G.: Quantum Electronics **43**, no.2, 177–183 (2013)
34. Bucaro J.A., Litovitz T.A.: J. Chem. Phys. **54**, no.9, 3846–3853 (1971)

Исследования датчика малых размеров для низкополевых магнитно-резонансных томографов

А. А. Баязитов, А. Р. Фахрутдинов, Я. В. Фаттахов

Отдел медицинской физики, лаборатория методов медицинской физики

В работе приводятся результаты расчётов и макетирования датчика “Висок”, работающего в квадратурном режиме, для низкополевого магнитно-резонансного томографа “ТМР-0.06-КФТИ” с индукцией магнитного поля 0.06 Тл. Оптимизированы конструкция и размер датчика для исследования в малой области.

Введение

В лаборатории ММФ КФТИ разрабатываются низкополевые томографы с индукцией магнитного поля 0.06 и 0.4 Тл. На приёмные радиочастотные датчики для магнитно-резонансных томографов (МРТ) при разработке накладываются определённые требования, обусловленные размером области исследования, рабочей частотой томографа, типом магнитной системы. При разработке датчика “Висок” был учтен опыт создания других поверхностных датчиков квадратурного типа [1].

Теория

Для приёмной системы низкополевого МРТ важно согласование максимально допустимой ширины спектра сигнала с добротностью приёмного контура. Это условие накладывает ограничение на повышение добротности приёмных контуров, а значит и на повышение чувствительности. Один из способов повышения чувствительности – применение квадратурного режима в приёмной системе.

Квадратурная приёмная система, применяемая в нашем томографе, включает в себя датчик, состоящий из двух контуров, ориентированных на детектирование двух взаимно ортогональных составляющих сигнала (так называемые X- и Y-компоненты). Преимущество этой системы состоит в том, что при её использовании происходит расширение зоны однородности принимаемого сигнала, а также наблюдается увеличение соотношения сигнал/шум в $\sqrt{2}$ раз при сложении сигналов от двух контуров с соответствующей коррекцией фазы сигнала.

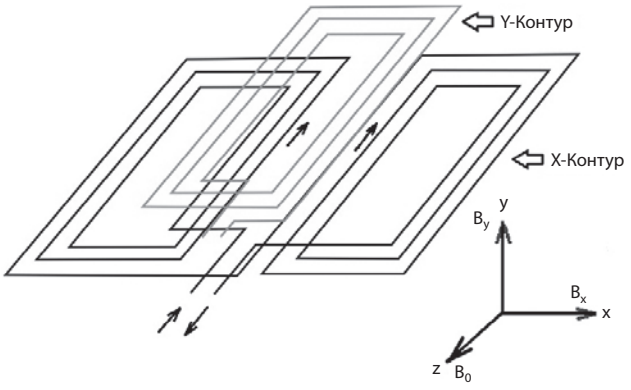


Рис 1. Квадратурная приёмная система прямоугольной формы: две приёмные катушки (X-контур конструктивно расположен снизу, Y-контур расположен сверху).

Датчик “Висок” тоже представляет собой приёмную систему, реализованную по принципу квадратурной, состоящей из двух контуров. На рис. 1 представлен вариант квадратурного датчика прямоугольной формы. Две боковые рамки (X-контур) и центральная (Y-контур) представляют собой общую систему приёма. Оба контура настраиваются на одинаковую частоту, взаимное же их влияние друг на друга минимизируется с помощью развязки, например, добиваясь строгой ортогональности контуров. Приёмные контуры имеют такую форму для того, чтобы они могли принимать ортогональные компоненты сигнала и при этом оставаться в одной плоскости, оправдывая название поверхностного датчика.

Суммарный сигнал, полученный от каждого воксела объекта, пропорционален коэффициенту заполнения η. Уменьшая размер контура, мы будем увеличивать η для малого образца, тем самым, получим необходимое нам увеличение сигнала из-за перераспределения поля в меньшем объёме. Кроме этого принципиального условия, все датчики должны отвечать следующим требованиям:

1) иметь высокую чувствительность (за счёт увеличения добротности контура Q, т.к. величина сигнал/шум $\varepsilon_1 \sim \sqrt{Q}$);

2) распределение поля внутри датчика должно быть однородным;

3) взаимное расположение контуров должно быть оптимальным. Можно считать взаимное расположение контуров оптимальным, если взаимная индуктивность контуров минимальна. Приемлемой развязкой (отношением амплитуд сигналов на контурах, при работе лишь одного) считаем соотношение 1:10. В этом случае шумы обоих контуров можно считать не коррелированными.

Инструменты и методы

Математическое моделирование однородности магнитного поля в данной работе выполнялось в среде программирования Maple. Для оценки однородности поля в области интереса в ходе анализа результатов математического моделирования использовался следующий критерий оценки: сравнивались значения среднеквадратичного отклонения от среднего значения поля, отнесенного к его среднему значению для каждого графика.

Однородность поля оценивалась по формуле:

$$\delta = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}}{\bar{X}}, \qquad (1)$$

где X_i – есть рассчитанное значение поля B_1 в конкретной точке n пространства в области интереса, $\bar{X}$ – среднее значение поля в области интереса. Наилучшая однородность поля в исследуемой области соответствует минимальному значению, рассчитанному по формуле (1).

Область, в которой проводилась оценка однородности, составляет сферу диаметром 60 мм, расчёты проводилась в определённых плоскостях, указанных в таблице 1, центр сферы области интересов расположен в следующих координатах X = 0, Y = 30 мм, Z = 0.

Где h_y – расстояние от центра датчика до плоскости измерения вдоль оси Y, z –расстояние от центра датчика до плоскости измерения вдоль оси Z, d_x – ширина области интересов, рассматриваемая вдоль оси X. Первая область максимальна, так как соответствует диаметру сферы. Вторая область соответствует области однородности вблизи края датчика при смещении вдоль оси Z. Третья и четвертая области находятся в нижней и верхней части области интересов вдоль оси Y.

На первом этапе оценка однородности поля производится в первой области в центре сферы области интересов. На втором этапе рассчитываются значения во второй области для графиков, выбранных на первом этапе при условии, что значения δ для них не превышают min(δ) + 30%. На третьем этапе рассчитываются значения с учётом второго этапа в области три и четыре. На этом этапе предпочтение отдаётся тому графику с соответствующими параметрами контура, у которого разность значений δ для областей 3 и 4 будет минимальна.

Таблица 1. Области интереса, в которых проводится расчёт δ.

Область однородности поля (номер)	h_y (мм)	z (мм)	d_x (мм)
1	30	0	60
2	30	26	30
3	4	0	30
4	56	0	30

В итоге выбирается тот график (а значит и соответствующие параметры контура), который в результате оценки однородности по трем критериям является наиболее предпочтительным.

Результаты

Реализация приёмного датчика с технической точки зрения с учётом упомянутых требований является не тривиальной задачей. Первая задача, с которой сталкиваются разработчики при создании датчика малых габаритных размеров, является обеспечение однородности сигнала в зоне интересов. Вторая задача – сохранение высокого уровня добротности приёмного контура при уменьшении габаритных размеров датчика.

На основании упомянутых требований была выработана методика, по которой был разработан датчик “Висок”, предназначенный для исследования довольно малых областей, например, таких как головной мозг в височной доле, или глаз. Были исследованы характеристики контура с различным взаимным расположением витков проводника.

Расчётное значение величины скин-слоя для медного проводника на рабочей частоте f = 2.552 МГц: S = 44.6 мкм То есть толщина проводника (например медной ленты) для изготовления датчика должна быть не менее 100 мкм. Для макетирования датчика было собрано несколько типов макетов (с прямоугольным и круглым контуром), была проведена оценка добротности таких макетов датчика.

Требования, накладываемые на габаритные размеры датчика: вдоль осей Z и X не более 150 мм. Было изучено два типа катушек – круглой и прямоугольной формы. Прямоугольный контур: внешние размеры контура 150×130 мм; внутренние размеры 80×20 мм. Круглый контур: диаметр внешнего витка 150 мм. Шаг между витками для обоих типов контуров был выбран 5 мм. Зависимость величины добротности контура от числа витков для двух типов контуров представлена на рис. 2.

При выборе числа витков следует помнить, что чем больше витков в катушке, тем больше индуктивность

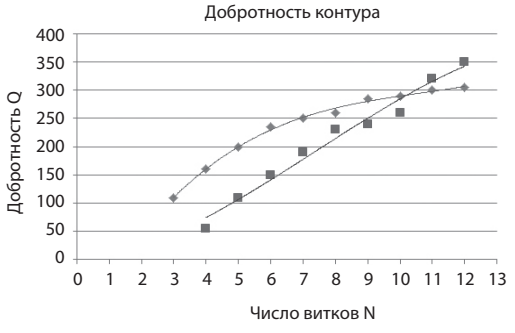


Рис. 2. Зависимость добротности от числа витков (N) для круглого (■) и прямоугольного (◆) контура, диаметр провода 2 мм.

катушки и тем меньше будет резонансная ёмкость контура. Ёмкость не должна быть слишком маленькой, иначе она будет шунтирована низкодобротной ёмкостью кабеля, и в результате добротность контура уменьшится, что нежелательно, либо даже не удастся настроиться на резонанс на рабочей частоте. Оптимальным вариантом по числу витков для данного типа контура является 8–9 витков. Если число витков меньше 10, то лучше использовать контур прямоугольной формы. Для X катушки, имеющей другую форму (см. рис. 1), предельное число витков выбрано $N = 5$.

Анализ результатов математического моделирования

В математическом моделировании значение тока задавалось равным 5 мкА. Расчёт поля проводился от проводника с током, в качестве которого была использована математическая линия.

Математическое моделирование Y катушки

На рис. 3 изображена Y катушка, для которой были выбраны следующие изменяемые параметры: C1 – расстояние между внутренними витками вдоль оси X, C2 – расстояние между внутренними витками вдоль оси Z, d – значения шага между витками вдоль оси X, p – значения шага между витками вдоль оси Z.

В процессе моделирования шаг между витками оставался постоянным, т.е. расстояние между любыми соседними витками равно либо d, либо p для соответствующих направлений.

Число витков в рассматриваемых моделях было выбрано $N = 8$ на основании макетирования контуров с целью определения максимальной добротности.

1. Анализ однородности поля вдоль X, для различных значений параметра шага d показал, что увеличение шага приводит к улучшению однородности поля до опреде-

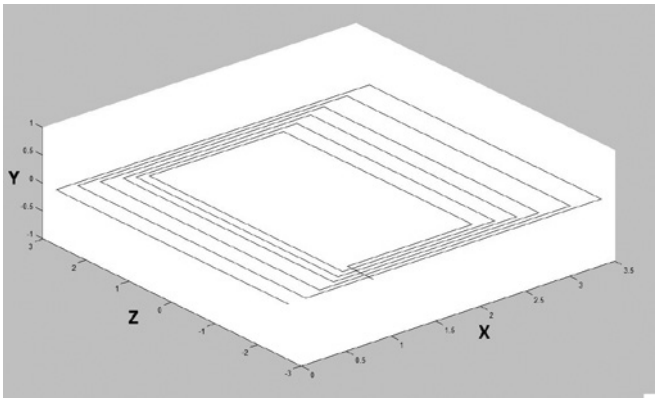


Рис. 3. Модель датчика “Висок”, принимающего Y-компоненту поля сигнала.

Таблица 2. Допустимые значения параметров катушки с учётом габаритных размеров датчика.

d (мм)	C1 (мм)	C1 (мм) (для расчёта)
7	44	40
6	58	50
5	72	70
4	86	80
3	100	100
2	114	110
1	128	120

Таблица 3. Рассчитанные значения δ на первом этапе с учётом заранее заданных параметров Y контура.

C2 (мм)	d (мм)	C1 (мм)	δ
120	7	40	4.22E-03
120	6	50	1.16E-03
120	5	70	1.32E-03
120	4	80	5.11E-03
120	3	100	6.47E-03
120	2	110	1.23E-02
120	1	120	2.10E-02
100	7	40	6.31E-02
100	6	50	6.14E-02
100	5	70	4.63E-02
100	4	80	4.29E-02
100	3	100	2.83E-02
100	2	110	2.83E-02
100	1	120	2.83E-02
80	3	100	1.41E-02
80	2	110	5.05E-03
80	1	120	2.41E-03

Таблица 4. Рассчитанные значения δ на втором этапе с учётом заранее заданных параметров Y контура.

C2 (мм)	d (мм)	C1 (мм)	δ
y = 30 мм, z = 26 мм, d_x = 30 мм			
120	7	40	2.96E-03
120	6	50	2.31E-03
120	5	70	2.31E-03
120	4	80	2.76E-02

Таблица 5. Рассчитанные значения δ на третьем этапе с учётом заранее заданных параметров Y контура.

C2 (мм)	d (мм)	C1 (мм)	δ
h_y = 56 мм, z = 0, d_x = 30 мм			
120	7	40	2.63E-04
120	6	50	6.68E-04
120	5	70	1.42E-03
120	4	80	8.88E-03
h_y = 4 мм, z = 0, d_x = 30 мм			
120	7	40	1.35E-03
120	6	50	5.27E-04
120	5	70	1.73E-04
120	4	80	6.07E-03

лённого момента за счёт увеличения области однородности. По нашим оценкам параметр d следует выбирать в районе значения d = 5 мм.

2. Увеличение параметра C1 также приводит к улучшению однородности поля до определённого момента за счёт увеличения области однородности. Следовательно следует выбирать параметр C1 максимально возможный с учётом выводов предыдущего пункта и габаритных размеров датчика.

3. При уменьшении шага p между витками вдоль оси Z можно добиться лучшей однородности поля. Поэтому шаг между витками вдоль оси Z при расчёте поля во всех последующих моделях выбран минимальным: расстояние между витками равно 1 мм.

Из 1 и 2 пункта следует, что необходимо стремиться к максимальным значениям d и C1. С учётом габаритных размеров допустимые параметры представлены в таблице 2.

Оценка однородности поля проводилась в первой области: h_y = 30 мм, Z= 0, d_x = 60 мм, результаты расчётов δ приведены в таблице 3.

Наибольший интерес для нас представляют графики с параметрами катушки C2 = 120 мм, d = 6 мм, C1= 50 мм и d = 5 мм, C1 = 70 мм.

Во второй и третьей области рассматриваем только эти конфигурации. Результаты представлены в таблицах 4 и 5.

Из анализа таблицы 5 мы отдаём предпочтение контуру со значениями параметров C2 = 120 мм, d = 6 мм, C1 = 50 мм, так как разность между значениями δ в плоскости Z = 0 на расстоянии h_y = 56 мм и h_y = 4 мм в этом случае минимальна по сравнению с контуром имеющие значения параметров C2 = 120 мм, d = 5 мм, C1 = 70 мм.

Итак, по результатам математического моделирования Y катушки с учётом результатов приведённых в таблицах 3, 4 и 5 наилучшим вариантом является катушка с параметрами: C1 = 50 мм, C2 = 120 мм, d = 6 мм, шаг вдоль оси Z p = 1 мм.

Математическое моделирование X катушки

На рис. 4 изображена X катушка, для которой были выбраны следующие параметры: C1 – расстояние между внутренними витками вдоль оси X как для левой, так и для правой части катушки, C2 – расстояние между внутренними витками вдоль оси Z, C3 – расстояние между центрами левой и правой части катушки вдоль оси X, d – значения шага между витками вдоль оси X, p – значения шага между витками вдоль оси Z.

Оценка однородности поля вдоль оси X в первой области проводилась для значений параметра C2 = 80, 100 и 120 мм. В процессе моделирования для каждого из значений C2 параметр C3 менялся от 10 до 50 мм, значения C1 изменялись от 10 до 120 мм. В данных моделях уже учтены ограничения накладываемые габаритными размерами датчика. Установлено, что шаг между витками как вдоль оси X, так и вдоль оси Z должен быть

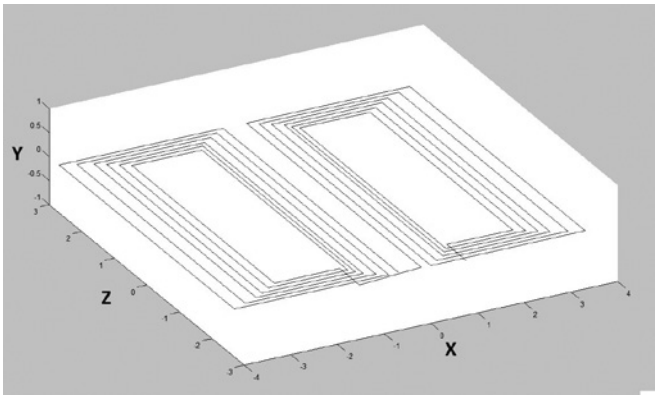


Рис. 4. Модель датчика “Висок”, принимающего X-компоненту поля сигнала.

минимальным. В дальнейших расчётах параметры d и p приняты равными 1 мм. В таблице 6 приведены данные для некоторых конфигураций, для всех моделей число витков выбрано N = 5.

Таблица 6. Рассчитанных значений δ на первом этапе с учётом заранее заданных параметров X контура

C2 (мм)	C3 (мм)	C1 (мм)	δ
h_y = 30 мм, z = 0, d_x = 60 мм			
80	10	90	7.90E-02
80	10	100	2.28E-02
80	10	110	5.15E-02
80	20	90	9.23E-01
80	20	100	3.13E-02
80	20	110	3.89E-02
80	30	100	4.67E-02
80	30	110	2.43E-01
80	40	100	7.06E-02
100	10	120	2.03E-02
100	10	110	2.62E-02
100	10	100	6.47E-02
100	10	10	6.34E-01
100	20	120	1.77E-02
100	20	110	2.93E-02
100	20	100	7.03E-02
100	20	10	6.31E-01
100	30	110	3.83E-02
100	30	100	4.12E-01
120	10	120	2.31E-02
120	10	110	5.58E-02
120	20	120	2.75E-02
120	20	110	6.05E-02

Таблица 7. Рассчитанные значения δ на втором этапе с учётом заранее заданных параметров X контура.

C2 (мм)	C3 (мм)	C1 (мм)	δ
h_y = 30 мм, z = 26 мм, d_x = 30 мм			
80	10	100	2.28E-02
100	10	120	1.18E-02
100	20	120	1.29E-02
120	10	120	1.51E-02

Таблица 8. Рассчитанные значения δ на третьем этапе с учётом заранее заданных параметров X контура.

C2 (мм)	C3 (мм)	C1 (мм)	Δ
h_y = 56 мм, z = 0, d_x = 30 мм			
100	10	120	1.59E-02
100	20	120	1.35E-02
h_y = 4 мм, z = 0, d_x = 30 мм, d = 1 мм			
100	10	120	1.35E-02
100	20	120	1.18E-02

С учётом результатов представленных в таблице 6 были намечены несколько вариантов катушки с определёнными параметрами, которые рассмотрены на втором этапе в области h_y = 30 мм, z = 26 мм, d_x = 30 мм и представлены в таблице 7.

С учётом результатов 1 и 2 этапов на третьем этапе рассматривались два лучших варианта конфигураций, результаты представленных в таблице 8.

Анализируя таблицу 8, мы отдаём предпочтение катушке со значениями параметров контура C2 = 100 мм, C3 = 20 мм, C1 = 120 мм, так как разность между значениями δ в плоскости Z = 0 на расстоянии h_y = 56 мм и h_y = 4 мм в этом случае минимальна по сравнению с другим контуром.

По результатам математического моделирования X катушки с учётом результатов приведённых в таблицах 6, 7 и 8 наилучшим вариантом является катушка с параметрами: C1 = 120 мм, C2 = 100 мм, C3 = 20 мм, d = 1 мм, p = 1 мм.

Заключение

В ходе данного исследования были разработаны оптимальные конфигурации датчика с однородностью поля, удовлетворяющей установленным требованиям.

Для Y контура наилучшим вариантом является катушка с параметрами: C1 = 50 мм, C2 = 120 мм, d = 6 мм, шаг вдоль оси Z 1 мм.

Для X контура наилучшим вариантом является катушка с параметрами: C1 = 120 мм, C2 = 100 мм, C3 = 20 мм, d = 1 мм, шаг вдоль оси Z 1 мм.

С учётом исследования РЧ параметров, габаритных размеров, и однородности поля: число витков для Y катушки N = 8, для X катушки N = 5.

Если число витков меньше 10, то лучше использовать контур прямоугольной формы, в противном случае – круглой формы.

Литература

1. Баязитов А.А., Фаттахов Я.В., Анашкин В.Н., Панкратов А.С.: Разработка датчика “Почки” квадратурного типа для низкополевых магнитно-резонансных томографов. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2014, Ежегодник. С. 98–102. Казань: КФТИ КазНЦ РАН 2015.

Термометрия твёрдых тел методом оптической интерферометрии на примере полиметилметакрилата и кремния

Б. Ф. Фаррахов, Я. В. Фаттахов, М. Ф. Галяутдинов, В. И. Нуждин, В. Ф, Валеев, А. Л. Степанов

Отдел медицинской физики, лаборатория методов медицинской физики; отдел химической физики, лаборатория квантовой оптики и информатики; отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной физики; группа нанооптики и наноплазмоники

Описывается методика измерения температуры твёрдых тел на основе регистрации сигнала оптической интерференции. Интерференционная картина получается на основе слияния двух дифрагированных лучей от периодических микроструктурированных элементов на поверхности полиметилметакрилата и кремния.

Введение

На сегодняшний день существуют множество способов измерения температуры твёрдых тел, основанных на различных физических принципах регистрации. Например: термопары, термисторы, пирометры, основанные на термоэлектрическом эффекте, изменения ЭДС, сопротивления и излучательной способности от температуры.

Предлагаемая в настоящей работе методика измерения температуры, основана на оптической регистрации изменения периода интерференционной картины (ИК) [1]. Устойчивая ИК создаётся наложением двух дифрагированных пучков от периодической структуры, сформированной на поверхности твёрдого тела, и являющейся, таким образом дифракционной решёткой (ДР) [1–3]. С этой целью поверхность с ДР зондируется двумя пробными лучами He-Ne лазера на длине волны 0.6328 мкм под углами, соответствующими определённому порядку дифракции для данной ДР. В результате два пучка от дифракционной картины совпадают с направлением нулевого максимума и формируют ИК. В процессе нагрева или охлаждения твёрдого тела происходит тепловое расширение или сжатие, что вызывает изменение периода ДР. Это приводит к изменению угла между совмещёнными интерферирующими пучками, что, в свою очередь, вызывает изменение периода ИК.

В качестве материалов для эксперимента были выбраны полиметилметакрилат (ПММА) и кремний. Выбор ПММА был обусловлен широким использованием данного материала в создании различных типов оптических волноводов и управляющих светом фотонных элементов, таких как призмы, линзы, делители пучков света и др. Кремний является базовым материалом современной электроники.

Отметим, что создание термометрических устройств на основе полимерного и полупроводникового материалов с дифракционной решёткой на поверхности, сформированной с привлечением метода ионной имплантации, предложено и реализовано впервые.

Эксперимент

В качестве тестируемых образцов были выбраны пластины ПММА толщиной 1.7 мм и кремния толщиной 400 мкм.

Формирование ДР на поверхности ПММА производилось путём нанесения жидкого ПММА на поверхность твёрдой пластины и последующего снятия реплики с шаблона ДР с периодом 4 мкм. Далее производилось облучение поверхности ионами металла (ионами серебра Ag^+ с энергией 30 кэВ и дозой $5 \cdot 10^{14}$ ион/см^2) на ионном ускорителе [3, 4] с целью увеличения дифракционной эффективности тестируемой решётки. На поверхности пластины кремния дифракционная решётка с периодом 4 мкм формировалась при помощи ионной имплантации через маску SiO_2 с последующим травлением окисла в HF.

ДР представляет собой чередующиеся через каждые 2 мкм периодические ячейки шириной 2 мкм и глуби-

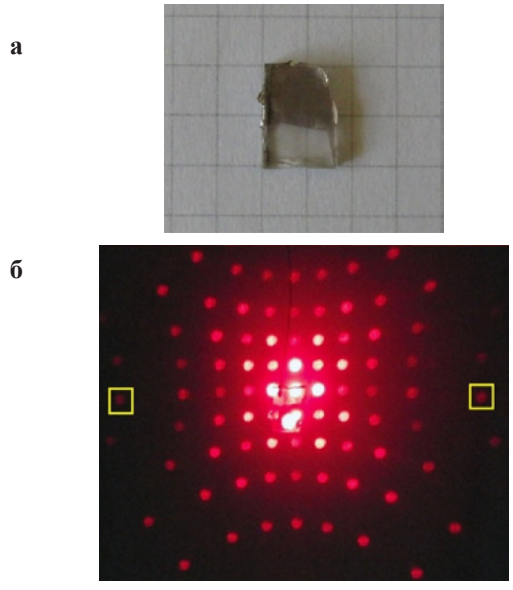


Рис. 1. Фотография подложки ПММА с дифракционной решёткой на его поверхности (**а**) и дифракционная картина, получаемая при зондировании данной решётки лучом He-Ne лазера на длине волны 0.6328 мкм (**б**). Квадратами обозначены дифракционные максимумы 5-го порядка.

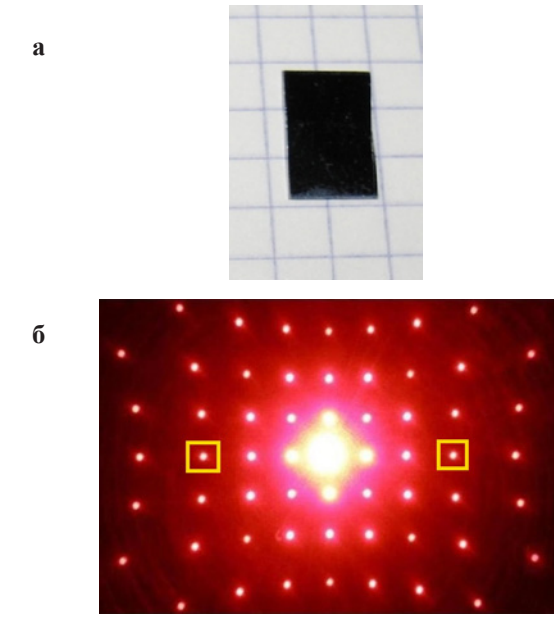


Рис. 2. Фотография подложки кремния с дифракционной решёткой на его поверхности (**а**) и дифракционная картина, получаемая при зондировании данной решётки лучом He-Ne лазера на длине волны 0.6328 мкм (**б**). Квадратами обозначены дифракционные максимумы 3-го порядка.

ной 200 нм. При зондировании таких ДР лучом He-Ne лазера на длине волны 0.6328 мкм получаются чёткие дифракционные картины. Сигнал в случае ПММА регистрировался на пропускание, а для кремния по схеме дифракции на отражение.

На рис. 1. и 2 представлены фотографии подложки ПММА и кремния, соответственно с дифракционными решётками на поверхности (а) и дифракционные картины, получаемые при зондировании данных решёток лучом He-Ne лазера на длине волны 0.6328 мкм (б). Квадратами обозначены дифракционные максимумы 5-го и 3-го порядков, соответственно.

На рис. 3 показана блок-схема экспериментальной установки, для регистрации температуры пластины

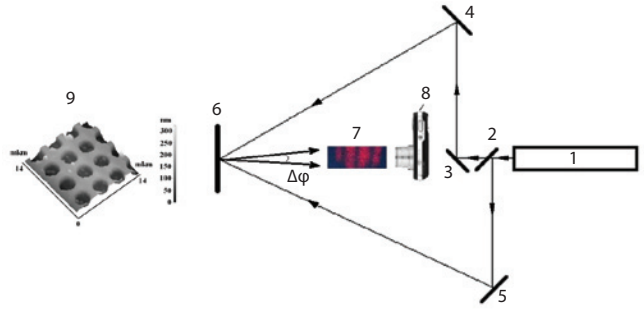


Рис. 3. Схема экспериментальной установки. 1 – He-Ne лазер, 2 – полупрозрачное зеркало, 3, 4, 5 – зеркала, 6 – образец, 7 – интерференционная картина, 8 – цифровая камера, 9 – топография фазовой дифракционной решётки на поверхности ПММА и кремния.

ПММА и кремния методом оптической интерференции в стационарном режиме нагрева.

Луч от лазера (1) с помощью полупрозрачного зеркала (2) разделяется на два луча. Затем эти лучи посредством зеркал (3), (4) и (5) совмещаются на поверхности образца (6). Лучи от зеркал (4) и (5) падают на образец таким образом, что составляют угол по отношению к нормали поверхности образца равный углу пятого дифракционного максимума для ПММА и углу третьего дифракционного максимума для кремния. Таким образом, регистрируемый порядок дифракции этих лучей будет направлен по нормали к поверхности образца. Далее лучи проецируются на экран, где формируется интерференционная картина.

Зависимость периода b интерференционных полос от температуры описывается уравнением [2]:

$$b = \frac{\sqrt{d^2 - (k\lambda)^2}}{2\alpha\Delta T k}, \qquad (1)$$

где d – период дифракционной решётки, k – порядок дифракционного максимума, λ – длина волны, α – коэффициент линейного расширения исследуемого материала, ΔT – изменение температуры. При расчётах величины b от характеристик образцов и температуры мы также учитывали температурную зависимость коэффициента линейного расширения: для ПММА $\alpha_{ПММА} = 5.2 \cdot 10^{-5} + 5.6 \cdot 10^{-7} \cdot T$ °C^{-1} [5], для кремния $\alpha_{Si} = 3.725\{1 - \exp[-5.88 \cdot 10^{-3}(T - 124)]\} + 5.548 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot 10^{-6}$ K^{-1} [6].

Образцы ПММА нагревались на медной подложке нихромовой спиралью до температуры 30 °C, и регистрировались сигналы на пропускание.

Нагрев образцов кремния проводился галогенной лампой до температуры 135 °C и регистрировались сигналы на отражение. Температура образцов в обоих экспериментах также контролировалась термопарой. Изменение интерференционной картины в динамике во время нагрева образцов регистрировалось на цифровую камеру Casio Exilim Ex-F1.

Результаты

На рис. 4а представлены кадры интерференционных картин, регистрируемых при различных температурах для образца ПММА, и на рис. 4б – график зависимости температуры от периода интерференционных полос для образца ПММА, полученный из анализа данных кадров и выражения (1) при T_0 = 20 °C.

На рис. 5а представлены кадры интерференционных картин, наблюдаемых при различных температурах для образца кремния, и на рис. 5б – график зависимости температуры от периода интерференционных полос для образца кремния, полученный из анализа данных кадров и выражения (1) при T_0 = 20 °C.

Согласно рис. 4а и рис. 5а по мере нагрева образцов период интерференционных полос уменьшается, что согласуется и с выражением 1 и рис. 3, показанным в виде графика.

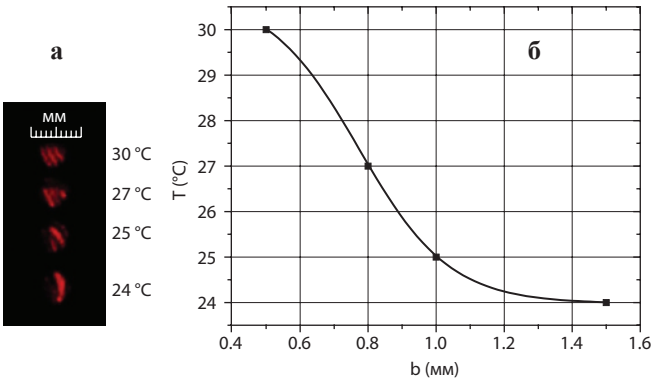


Рис. 4. Кадры интерференционных картин, наблюдаемых при различных температурах для образца ПММА (**а**), график зависимости температуры от периода интерференционных полос для образца ПММА, полученный из данных кадров и выражения (1) при T_0 = 20 °C (**б**).

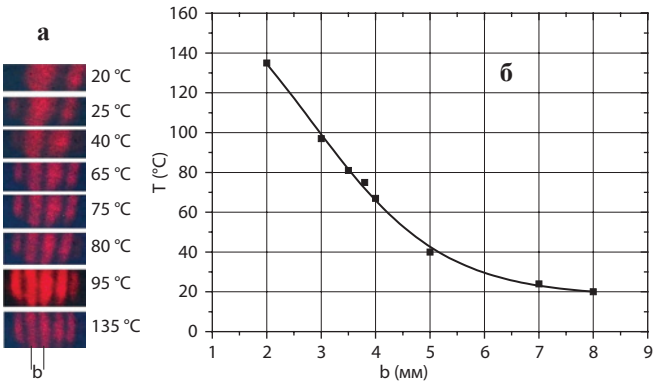


Рис. 5. Кадры интерференционных картин наблюдаемых при различных температурах для образца кремния (**а**), график зависимости температуры от периода интерференционных полос для образца кремния, полученный из данных кадров и выражения (1) при T_0 = 20 °C (**б**).

Заключение

Данные проведённых экспериментов позволяют говорить о достижении точности измерения температуры в 2 градуса, при стационарном нагреве и регистрации пятых дифракционных максимумов. Однако данный метод позволяет увеличить точность измерения при регистрации более высоких порядков дифракционных максимумов и повышении периода зондируемой решётки. Определённые требования также накладываются на параметры зондирующего луча (интенсивность, когерентность, расходимость луча и др.).

Работа поддержана Грантом РФФИ № 15-48-02525.

Литература

1. Магунов А.Н.: Лазерная термометрия твёрдых тел. М.: Физматлит 2001. 224 с.
2. Фаттахов Я.В., Фаррахов Б.Ф., Галяутдинов М.Ф.: Известия РАН. Серия физическая **80**(2), 154–157 (2016)
3. Степанов А.Л.: Фотонные среды с наночастицами, синтезированными ионной имплантацией. Саарбрюккен: Lambert Acad. Publ. 2014. 353 с.
4. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Галяутдинов М.Ф., Осин Ю.Н.: Дифракционная решётка на полимерной основе. Патент РФ № 148395. 2014. 3 с.
5. Goods S.H., Watson R.M.: Thermal Expansion and Hydration Behavior of PMMA Molding Materials for LIGA Applications. California: Sandia National Laboratories. 2003. 57 p.
6. Okada Y., Tokumaru Y.: J. Appl. Phys. **56**(2), 314–317 (1984)

Анализ поверхности кремния, имплантированного ионами серебра, методами спектральной эллипсометрии и дифракции отражённых электронов

В. В. Базаров, В. В. Воробьев, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Ю. Н. Осин, А. Л. Степанов

Отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной физики; группа нанооптики и наноплазмоники

Методами спектральной эллипсометрии (СЭ) и дифракции отражённых электронов (ДОЭ) исследованы слои аморфного кремния (α-Si), сформированного на поверхности монокристаллических подложек (c-Si) низкоэнергетической низкодозовой имплантацией ионов серебра. Имплантация проводилась ионами с энергией 30 кэВ и при постоянном значение плотности тока в ионном пучке 2 мкА/см в интервале доз $6.24 \cdot 10^{12}$–$1.25 \cdot 10^{16}$ ион/см^2 при комнатной температуре облучаемых подложек. Для двух доз имплантации, $6.24 \cdot 10^{13}$ и $1.87 \cdot 10^{14}$ ион/см^2, были проведены облучения с различными плотностями ионного тока от 0.1 до 5 мкА/см^2. Показано, что спектральная эллипсометрия является точным и надёжным методом контроля технологического процесса низкодозовой ионной имплантации.

Введение

Как известно, пористый кремний обладает уникальными физическими и химическими свойствами, которые определяются сетью наноразмерных пор и их развитой внутренней поверхностью. Одним из перспективных способов формирования пористого кремния с включениями металлических наночастиц является метод низкоэнергетической высокодозовой имплантации ионами металлов [1, 2]. При этом очевидно, что зарождение и рост пор в кремнии при его имплантации сопровождаются процессом аморфизации облучаемой матрицы, который начинается непосредственно с момента начала имплантации. Как было показано ранее на примере имплантации кремния ионами H^+, Si^+, Ge^+, Co^+, B^+, P^+, As^+, Ar^+, Xe^+ и N^{2+} [3–7], одним из наиболее информативных методов для исследования частично разупорядоченных (аморфизованных) кристаллических поверхностных слоёв кремния является метод спектральной эллипсометрии (СЭ). Это обусловлено существенным отличием оптических констант аморфного кремния от кристаллического.

В настоящей работе приводятся результаты эллипсометрического анализа поверхности кремния, имплантированного тяжёлыми ионами $^{108}Ag^+$ при малых дозах и проведено сравнение полученных данных с прямыми наблюдениями изменения кристаллической структуры кремния методом дифракции отражённых электронов (ДОЭ - electron backscattered diffraction - EBSD) [8, 9].

Методики эксперимента

Объектами исследования служили монокристаллические пластины кремния (100), имплантированные ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ в интервале доз $6.24 \cdot 10^{12}$–$1.25 \cdot 10^{16}$ ион/см^2 при комнатной температуре облучаемых подложек на ионном ускорителе ИЛУ-3. Плотность тока в ионном пучке составляла 2 мкА/см^2.

Оптический анализ имплантированных слоёв кремния проводился на спектральном эллипсометре ES-2 (разработка и изготовление ИРЭ РАН) с бинарной модуляцией состояния поляризации в диапазоне длин волн 380–820 нм, спектральное разрешение 6 нм, шаг 10 нм, угол падения светового луча $\varphi = 70°$.

Измерения на эллипсометре проводятся в следующем порядке. В расчётную модель многослойного образца вводятся известные данные дисперсионных зависимостей $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ слоёв, предполагаемые толщины слоёв, которые используются для моделирования эллипсометрических углов $\psi th(\lambda)$ и $\Delta th(\lambda)$. При наличии в исследуемых слоях 2-х различных веществ, отличающихся оптическими константами (например, аморфный и кристаллический кремний), показатели преломления и поглощения композиционной среды для конкретного слоя вычисляются в зависимости от долевого содержания составляющих компонентов в соответствии с приближением эффективной среды. Затем проводится сравнение расчётных значений с экспериментально-установленными значениями $\psi exp(\lambda)$ и $\Delta exp(\lambda)$. В случае согласования экспериментальных и расчётных зависимостей эллипсометрических углов делается вывод о достоверности выбранной модели.

Для исследования кремния, имплантированного ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ, была выбрана оптическая модель изотропной гетерогенной плёнки из смеси кристаллического и аморфного кремния на подложке из кристаллического кремния (рис. 1).

Переменными параметрами в рамках данной модели были толщина имплантированного слоя, фактор заполнения аморфного кремния в нём и толщина естественного слоя окисла кремния на поверхности образца. Оптические параметры n и k слоя, подвергнутого бомбардировке ионам серебра, вычислялись в зависимости от содержания аморфной фазы в соответствии с приближением эффективной среды Бруггемана [10].

На рис. 2 представлены дисперсионные зависимости $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ кристаллического и аморфного кремния (за-

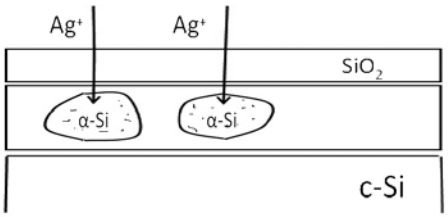


Рис. 1. Модель облучаемого образца кремния.

висимости взяты из библиотеки оптических параметров, поставляемой вместе с эллипсометром ES-2), из которых видны их существенные различия в исследуемом спектральном диапазоне от 380 до 820 нм, что позволило обеспечить в настоящей работе достаточную точность определения содержания в образцах аморфной фазы.

Структурные кристаллографические данные, полученные методом ДОЭ были выполнены на сканирующем электронном микроскопе Merlin (Carl Zeiss), оснащенном детектором ДОЭ NordLys HKL (Oxford Instruments), в Междисциплинарном центре "Аналитическая микроскопия" КФУ. При проведении ДОЭ-измерений были использованы следующие режимы работы электронного микроскопа: ускоряющее напряжение падающих на образец электронов 20 кэВ, зондовый ток 600 пА, рабочее расстояние между объективной линзой и поверхностью образца 9.6 мм. Для достижения оптимальных условий эксперимента и сбора максимума отражённых электронов на детекторе ДОЭ образец устанавливался под углом 70° относительно нормали падающего потока зондирующих электронов. Анализ ДОЭ-изображений проводился с помощью компьютерной программы Aztec 2.1.

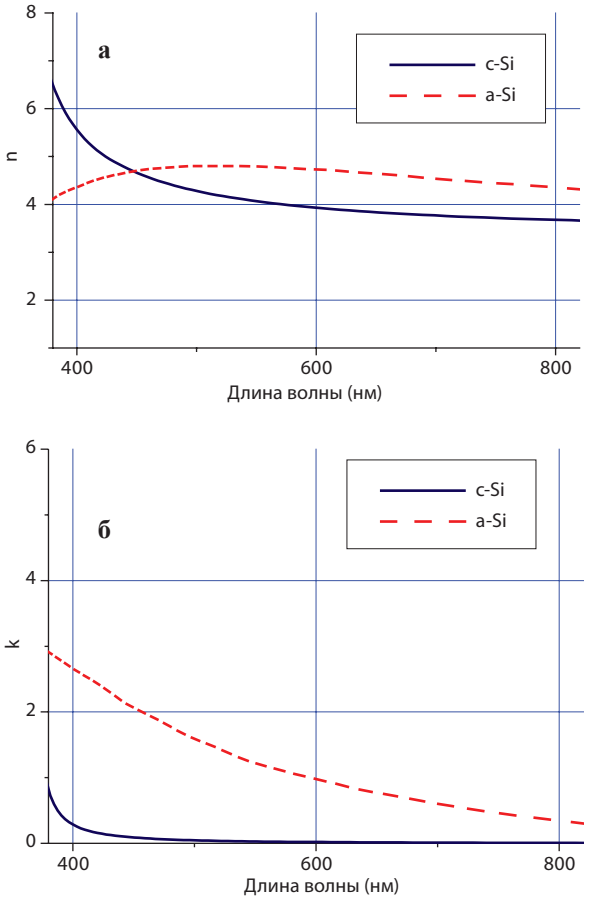


Рис. 2. Дисперсионные зависимости $n(\lambda)$ (**а**) и $k(\lambda)$ (**б**) кристаллического и аморфного кремния.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В силу особенностей метода ионной имплантации распределение имплантированных ионов в облучаемом материале неоднородно по глубине. С помощью компьютерной программы SRIM-2011 [11, 12] было установлено, что в начальный период облучения в приповерхностной области кремния происходит накопление атомов серебра с максимумом статистического распределения концентрации по гауссовой кривой на глубине $R_p \sim 23.4$ нм, а разброс пробега ионов от R_p составляет $\Delta R_p \sim 7.1$ нм.

Масса падающего иона $^{108}Ag^+$ заметно превышает массу атома кремния ^{28}Si. В этом случае процесс образования аморфного слоя идет по гетерогенному механизму, согласно которому аморфный слой формируется в результате перекрытия локальных разупорядоченных областей, образованных в результате падения отдельных ионов Ag^+. При этом количество смещённых из равновесных положений в кристаллической решётке атомов кремния на один падающий ион Ag^+ с энергией 30 кэВ, рассчитанное по формуле Кинчина-Пиза [13], достигает ~1000.

Совокупные результаты измерений и расчётов для имплантированных кремниевых пластин по данным СЭ в виде зависимости толщины аморфизированного слоя

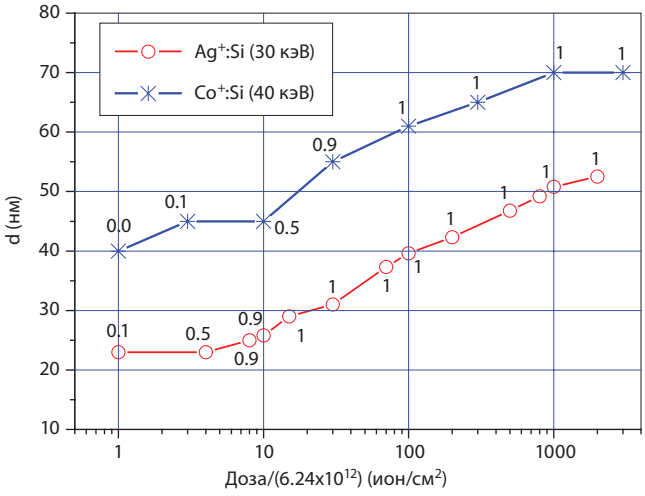


Рис. 3. Зависимость толщины (d) аморфизованного слоя кремния от дозы имплантации ионов $^{108}Ag^+$ (30 кэВ), $^{59}Co^+$ (40 кэВ). Плотность ионного тока 2 мкА. Над символами d указаны факторы заполнения аморфной фазы кремния в имплантированном слое, определяемые по результатам СЭ.

кремния от дозы имплантации ионов Ag^+ представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что в интервале доз имплантации от $6.24 \cdot 10^{12}$ до $6.24 \cdot 10^{13}$ ион/см^2 происходит постепенное увеличение процентного содержания аморфного кремния в приповерхностном слое толщиной ~23–25 нм до состояния его полной аморфизации. При дальнейшем увеличении дозы имплантации толщина слоя, подвергнутого полной аморфизации, увеличивается до ~55 нм при дозе имплантации $6.24 \cdot 10^{15}$ ион/см^2, что достаточно хорошо согласуется с расчётной толщиной имплантированного слоя $R_p + 2\Delta R_p = 37.6$ нм, оцениваемой по программе SRIM-2011. Поскольку каждый имплантированный ион Ag^+ в кремнии является независимым центром локального зарождения разрастающейся разупорядоченной области, то очевидно, что толщина аморфизированного слоя несколько превышает расчётную толщину, определяемую профилем ионов Ag^+.

Синим цветом (символы “звезда”) для сравнения приведена аналогичная зависимость для образцов, имплантированных ионами кобальта с энергией 40 кэВ, взятая из результатов предыдущего этапа работы. Наблюдается постепенное увеличение как толщины подвергнутого имплантации слоя, так и степени аморфизации.

На рис. 4 представлены результаты СЭ для кремниевых пластин, имплантированных с различной плотностью ионного тока при двух фиксированных дозах имплантации ионов Ag^+: $6.24 \cdot 10^{13}$ и $1.87 \cdot 10^{14}$ ион/см^2. Из полученных результатов следует, что увеличение плотности ионного тока ведёт к тому, что аморфизация кремния наступает при меньшей дозе имплантации.

В литературе обсуждаются две причины существования этого эффекта – появления в области генерации каскадов атомных смещений нелинейных тепловых пиков, когда средняя энергия, передаваемая каждому атому в области термического пика, превосходит энергию, необходимую для плавления материала мишени. Вторая возможная причина – повышения эффективности связывания первичных точечных дефектов в устойчивые образования при увеличении плотности смещений из-за нелинейности процессов образования устойчивых нарушений и динамического отжига после термализации каскада.

На рис. 5 представлены ДОЭ-картины как необлучённого кремния, так и образцов, имплантированных в интервале малых доз от $6.24 \cdot 10^{12}$ до $6.24 \cdot 10^{13}$ ион/см^2, анализируемых эллипсометрией. Как видно из рисунков, ДОЭ-картины содержат линии Кикучи, отражающие кристаллическую структуру (100) кремния. С ростом дозы имплантации происходит постепенное размытие и исчезновение картины с линиями Кикучи, сопровождающееся появлением диффузных колец, относящихся к

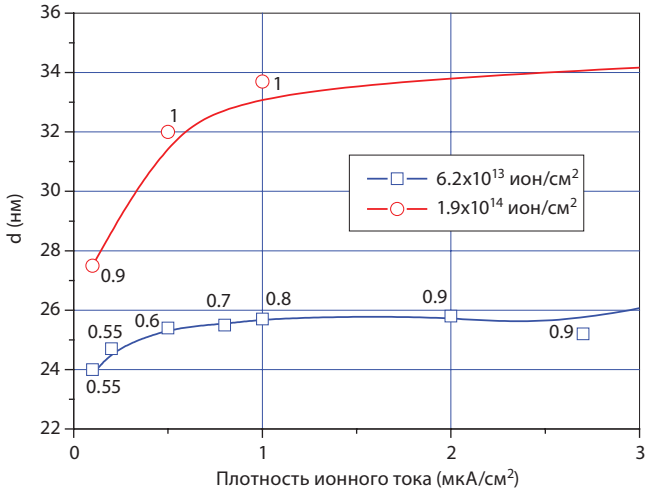


Рис. 4. Зависимость толщины (d) аморфизованного слоя кремния от плотности ионного тока для двух доз имплантации ионов $^{108}Ag^+$. Рядом с символами указаны факторы заполнения аморфной фазы кремния. Наблюдается эффект увеличения эффективности создания структурных нарушений с увеличением плотности каскадов атомных столкновений.

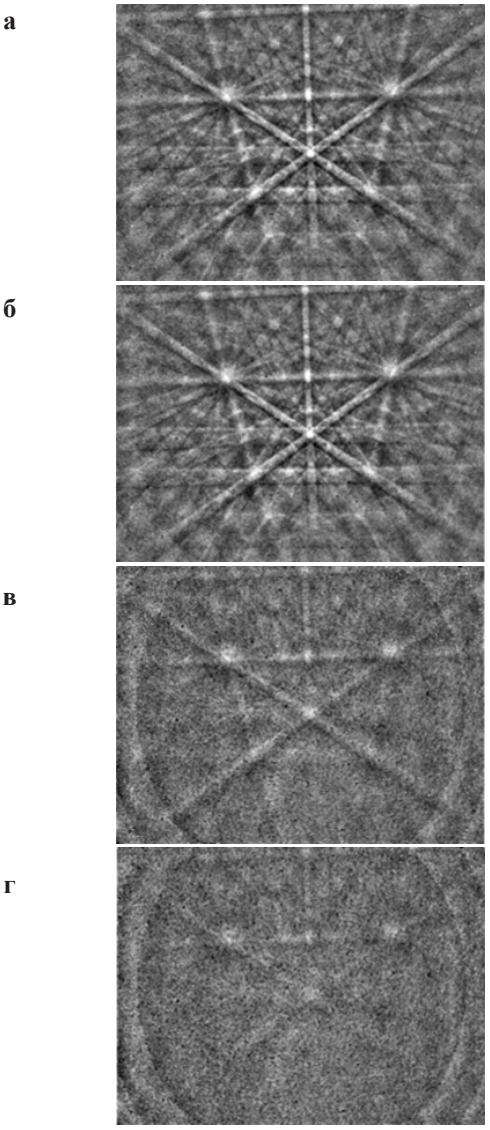


Рис. 5. ДОЭ-картины как необлучённого кремния, так и образцов, имплантированных ионами Ag^+ в интервале доз от $6.24 \cdot 10^{12}$ до $6.24 \cdot 10^{13}$ ион/см^2. Неимплантированный кремний (**а**), $6.24 \cdot 10^{12}$ ион/см^2 (**б**), $5 \cdot 10^{13}$ ион/см^2 (**в**), $6.24 \cdot 10^{13}$ ион/см^2 (**г**).

аморфной фазе. Очевидно, что наблюдаемое размытие и исчезновение линий Кикучи с ростом дозы имплантации ионами Ag^+ отражает факт последовательного разрушения кристаллической структуры поверхностного слоя кремния вплоть до полной его аморфизации. При дозе $6.3 \cdot 10^{13}$ ион/см^2, соответствующей практически полной аморфизации кремния по данным эллипсометрии (фактор заполнения аморфной фазы 0.9), на ДОЭ-картине линии Кикучи почти не видны (рис. 5г). Просматриваются лишь остаточные фрагменты линий Кикучи, являющихся сигналом от подложки кремния, поскольку глубина зондирования электронами при ДОЭ-измерении превышает толщину имплантированного слоя.

Выводы

В данной работе методами СЭ и ДОЭ осуществлён сравнительный структурный анализ поверхностных слоёв кремния, имплантированных малыми дозами ионов Ag^+. Показано, что при дозе имплантации $6.24 \cdot 10^{13}$ ион/см^2 на поверхности кремния образуется аморфный слой толщиной ~25 нм. При дальнейшем повышении дозы облучения до $6.24 \cdot 10^{15}$ ион/см^2 происходит монотонное увеличение толщины аморфного слоя до ~55 нм. Наблюдаемое изменение толщины имплантированного слоя сопровождается по данным ДОЭ разупорядочением кристаллической решётки и его аморфизацией. Приведённые примеры демонстрируют эффективность совместного использования методик СЭ и ДОЭ для характеризации имплантированных образцов.

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-29-06237_офи_м и программой УМНИК (В. В. Воробьев.

Литература

1. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Осин Ю.Н.: Способ изготовления пористого кремния. Патент РФ № 2547515 2015.
2. Stepanov A.L., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Vorobev V.V., Kavetskyy T.S., Osin Y.N.: Rev. Adv. Mater. Sci. **40**, 155–164 (2015)
3. Petrik P., Polga O., Fried M., Lohner T., Khanh N.Q., Gyulai J.: J. App. Phys. **93**, 1987–1990 (2003)
4. Shamiryan D., Likhachev D.V.: Ion Implantation, p. 89 (Mark Goorsky, ed.). InTech 2012.
5. Bazarov V.V., Valeev V.F., Nuzhdin V.I., Osin Y.N., Gumarov G.G., Stepanov A.L.: Solid State Phenomena **233**, 526–529 (2015)
6. Szekeres A., Alexandrova S., Petrik P., Fodor B., Bakalova S.: Applied Surface Science **281**, 105–108 (2013)
7. Shibata S., Nambu Y., Etoh R., Fuse G.: Proceedings of 1998 International Conference on Ion Implantation Technology, Kyoto, Japan, June 22-26, 1998, 1, 465–467 (1999)
8. Шварц А., Кумар М., Адамс Б.: Метод дифракции отражённых электронов в материаловедении. М.: Техносфера 2014.
9. Воробьев В.В., Осин Ю.Н., Ермаков М.А., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Степанов А.Л.: Нанотехнологии: наука и производство **1**, 42–52 (2015)
10. Bruggeman D.A.G.: Ann. Phys. (Leipzig) **24**, 636–679 (1935)
11. Ziegler J.F., Biersack J.P., Ziegler M.D.: SRIM. The Stopping and Range of Ions in Matter. SRIM Company 2008.
12. www.srim.org
13. Риссел Х., Руге. И.: Ионная имплантация, с. 24. М.: Наука 1983.

Устройства для разрезания твёрдотельных материалов

В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев

Отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной физики

Представлены два оригинальных устройства, разработанных и изготовленных в КФТИ КазНЦ РАН, для разрезания твёрдотельных материалов.

В данной работе представлены два устройства, которые могут быть полезными в лабораториях, где ведутся работы с твёрдотельными образцами и есть необходимость в их разрезании. Предлагаемые устройства не выпускаются отечественной промышленностью, а стоимость зарубежных аналогов очень высока. Не смотря на внешнее конструктивное сходство с предлагаемыми ранее устройствами [1] они существенно отличаются скоростью вращения дискового режущего элемента.

Для подготовки малогабаритных образцов для их исследования, например, в ЭПР-спектрометре, были разработаны и изготовлены устройства для прецизионного разрезания твёрдотельных образцов.

Рассмотрим первое устройство. На рис. 1 приведены фотография и конструкция устройства предназначенного для разрезания полимеров.

В качестве режущего элемента (1) используется дисковая фреза (40x0.2x10) показанная на рис. 2. Вращение режущего элемента (1) (рис. 1) осуществляется электродвигателем (2) в качестве которого используется коллекторный мотор-редуктор Atas K7A9 24B, 0,5A (скорость вращения на валу 140 1/мин). При использовании модификации K7A3 (скорость вращения на валу 45 1/мин) в редукторе, для получения скорости вращения на валу 140 1/мин, необходимо сократить передаточное число (убрать одно звено шестерён) редуктора. Образец (3) крепится на откидном столике (4) с помощью прижимной планки (5). Продольное (вдоль линии реза) перемещение каретки резака (6) осуществляется вручную с помощью вращения ручки (7). Поперечное перемещение образца (3), закреплённого на столике (4) осуществляется винтом (8) (резьба M5 шаг 0.5). Люфт резьбы выбирается контргайкой (9).

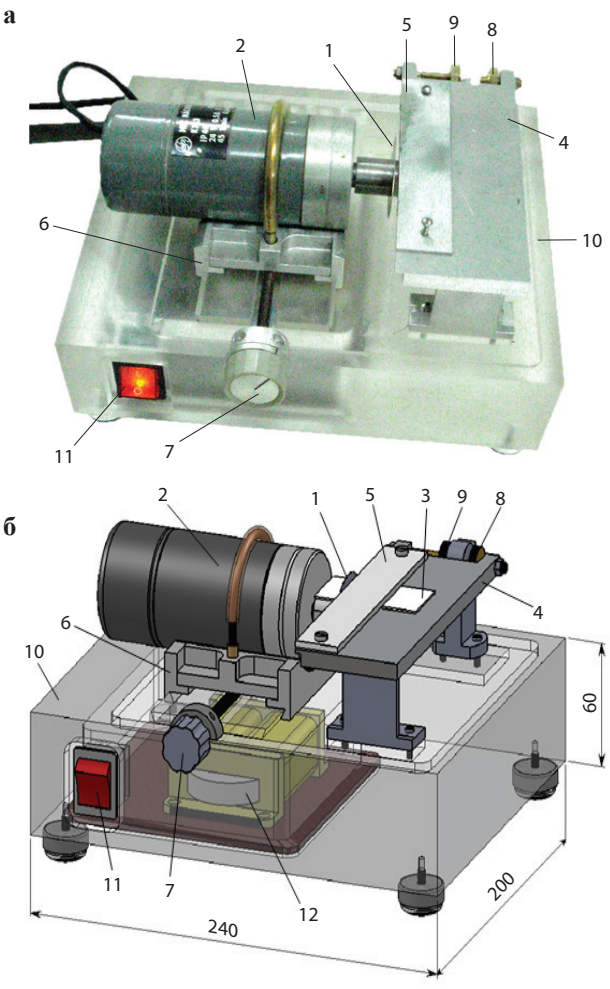


Рис. 1. Фотография (**а**) и конструкция (**б**) устройства предназначенного для разрезания полимеров: 1 – режущий элемент, 2 – электродвигатель, 3 – образец, 4 – откидной столик, 5 – прижимная планка, 6 – каретка резака, 7 – ручка, 8 – винт, 9 – контргайка, 10 – корпус, 11 – включатель, 12 – трансформатор.



Рис. 2. Фотография дисковой фрезы.

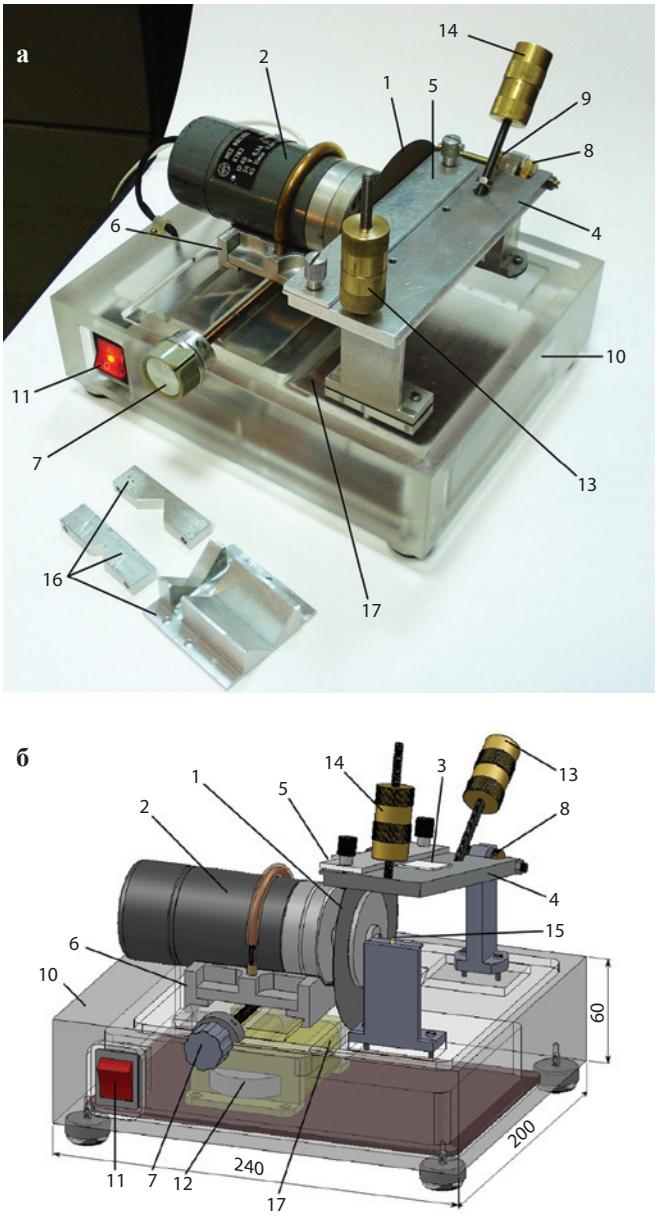


Рис. 3. Фотография (**а**) и конструкция (**б**) устройства для разрезания твёрдотельных материалов: 1 – режущий элемент, 2 – электродвигатель, 3 – образец, 4 – откидной столик, 5 – прижимная планка, 6 – каретки резака, 7 – ручка, 8 – винт, 9 – контргайка, 10 – корпус, 11 – включатель, 12 – трансформатор, 13 – груз, 14 – противовес, 15 – микровыключатель, 16 – дополнительный крепеж, 17 – углубление в корпусе (10).

На рис. 3 приведены фотография и конструкция второго устройства для разрезания твёрдотельных материалов.

В качестве режущего элемента (1) используется диск из спечённой алмазной крошки (100x0.35x12.5). Вращение режущего элемента (1) осуществляется электродвигателем (2) в качестве которого используется коллекторный мотор-редуктор Atas K7A9 24B, 0,5A со скоростью вращения на валу 140 1/мин, как и в первом устройстве. Процесс распиливания образца (3) прикреплённого к откидному столику (4) прижимной планкой (5) происходит под действием силы тяжести на режущий элемент (1). Во избежание резонансных биений на режущий элемент (1) давление на него регулируется с помощью грузов (13) и противовесов (14). Продольное (вдоль линии реза) перемещение каретки резака (6) осуществляется вручную, после поднятия откидного столика (4), с помощью вращения ручки (7). Процесс распиловки, например, стеклянной пластины, при такой скорости вращения режущего элемента может длиться несколько часов и отключение вращение электродвигателя (2) происходит автоматически при опускании откидного столика (4) на микровыключатель (15). Для распиливания твёрдотельных трубок или стержней устройство комплектуется дополнительным крепежом (16). Во избежание перегрева разрезаемого образца (3) подверженного трению и образования пыли в корпусе (10) устройства предусмотрено специальное углубление (17) для охлаждающей жидкости, например, глицерина (не показано).

Авторы выражают благодарность работникам экспериментальной мастерской КФТИ КазНЦ РАН Н. В. Гайнутдинову, М. А. Файзуллину и В. П. Григорьеву за помощь в изготовлении устройств.

Литература

1. Нуждин В.И., Валеев В.Ф.: Устройства для резки и обработки твёрдотельных материалов. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2011. Ежегодник, с. 102–103. Казань: КФТИ 2012.

Усовершенствованное устройство для подачи жидкого азота в систему охлаждения низкотемпературного приёмника ионного ускорителя ИЛУ-3

В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Д. А. Коновалов

Отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной физики; группа информационной безопасности, телекоммуникационных и сетевых технологий

Во многих исследовательских центрах, НИИ и лабораториях до сих пор эксплуатируется устаревшее оборудование, представляющее технологическую ценность. К разряду такого оборудования относится уникальный по своим техническим характеристикам ионный ускоритель ИЛУ-3 (год выпуска 1968). За долгие годы эксплуатации его отдельные узлы были модернизированы [1–5]. В данной публикации описано модернизированное устройство для подачи жидкого азота в систему охлаждения низкотемпературного приёмника ионов. Устройство для подачи жидкого азота представляет собой законченную конструкцию с элементами автоматизации и может быть использовано в любых установках, в которых требуется регулируемая подача хладагента. Модернизация устройства проводилась с целью улучшения его эксплуатационных и технических характеристик. В ходе работы был изменён способ создания рабочего давления в сосуде Дьюара, добавлены функции ускоренного выхода на рабочий режим, управления скоростью подачи хладагента, сигнализации и автоматического отключения устройства при окончании жидкого азота.

Технические характеристики

– Сосуд Дьюара – АСД-15 (объём 15 л)
– Способ создания рабочего давления – электрический нагреватель
– Мощность электрического нагревателя – 100 Вт
– Максимальное рабочее давление – 1.5 атм

На рис. 1 показана в разрезе сборка устройства для подачи жидкого азота из сосуда Дьюара АСД-15.

Устройство для подачи жидкого азота содержит воронку 10 выполненную как одно целое с фланцем 8. Герметизирующая пробка 7 выполнена с вертикальным сквозным отверстием. Верхняя цилиндрическая часть воронки 10 выполнена с внутренней резьбой и герметично соединена с нижней резьбовой частью тонкостенной теплоразвязывающей трубки 11, верхняя часть которой снабжена фасонным фланцем 12. Нижняя внутренняя резьбовая часть фасонного фланца 12 герметично соединена с верхней резьбовой частью питателя 6 выполненного в виде трубки. Верхняя резь-

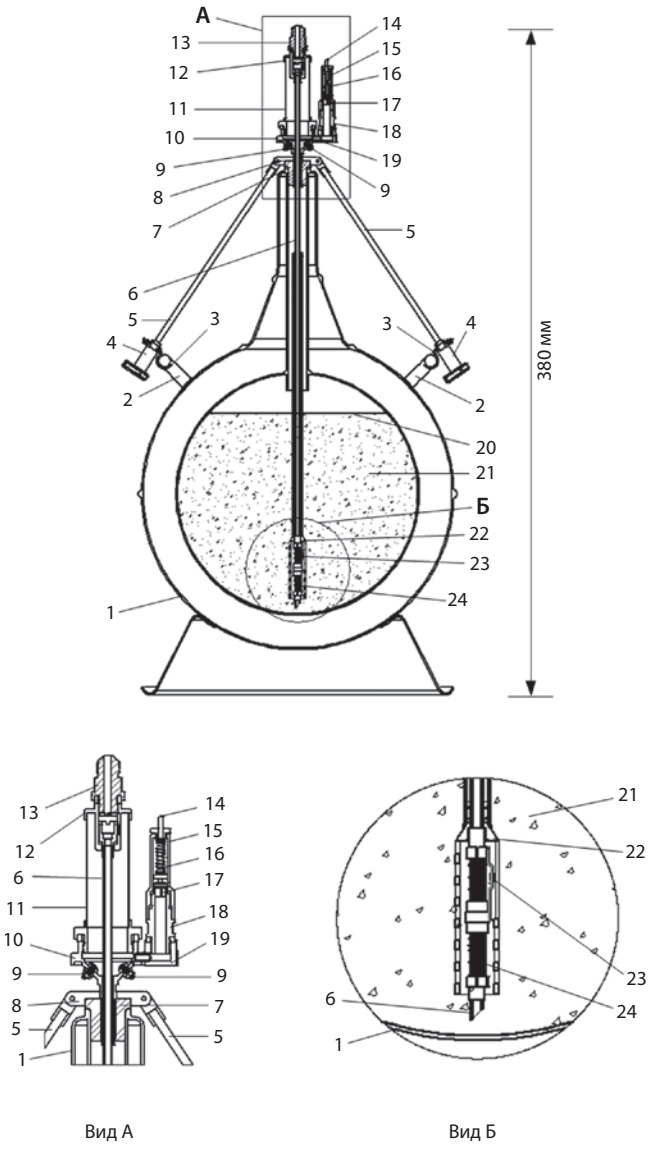


Рис. 1. Устройство для подачи жидкого азота из сосуда Дьюара АСД-15. 1 – сосуд Дьюара; 2 – ручка сосуда Дьюара; 3 – зацеп; 4 – барашек; 5 – тяга; 6 – питатель; 7 – герметизирующая пробка; 8 – фланец; 9 – токоввод; 10 – воронка; 11 – теплоразвязывающая трубка; 12 – фасонный фланец; 13 – выходной штуцер; 14 – шток; 15 – корпус клапана; 16 – пружина; 17 – клапан; 18 – седло; 19 – отвод; 20 – поверхность жидкого азота; 21 – жидкий азот; 22 – кожух; 23 – датчик; 24 – нагреватель.

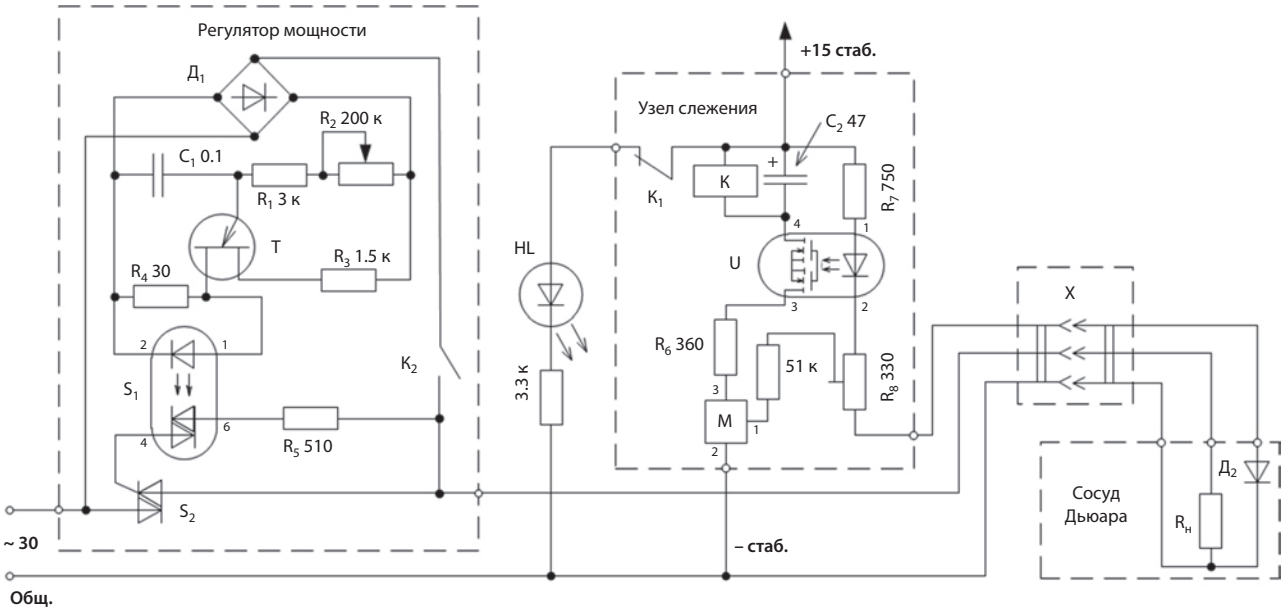


Рис. 2. Принципиальная схема блока управления устройства подачи жидкого азота. $Д_1$ – 1W10, Т – КТ117Б, S_1 – MOC3022M, S_2 – BTA12-60, К – РЭС60, Оп – CPC1017N, М – TL431.

бовая часть фасонного фланца 12 герметично соединена с нижней резьбовой частью выходного штуцера 13, предназначенного для соединения с накидной гайкой трубопровода низкотемпературного приёмника ионного ускорителя ИЛУ-3. В качестве нагревателя 24 используется спираль из нихромового провода. Нагреватель 24 закреплён на нижнем конце питателя 6 в защитном кожухе 22. В верхней части нагревателя 24 закреплён датчик 23 отсутствия азота. Прижим герметизирующей резиновой пробки 7 устройства для подачи жидкого азота к горловине сосуда Дьюара 1 осуществляется при помощи двух тяг 5 и зацепов 3, расположенных на ручках 2 сосуда Дьюара 1. Зацепы 3 снабжены барашками 4 соединёнными резьбовым соединением с тягами 5. При вращении барашков 4 регулируется усилие прижима герметизирующей пробки 7 к горловине сосуда Дьюара 1. Для ограничения максимального давления создаваемого в сосуде Дьюара 1 устройство для подачи жидкого азота снабжено предохранительным клапаном 17. Максимальное давление, при котором происходит срабатывание клапана 17, определяется жёсткостью пружины 16. Электрические соединения устройства осуществляются через токовводы 9.

Работает устройство для подачи жидкого азота следующим образом. При пропускании электрического тока через нагреватель 24 (рис. 1) происходит испарение жидкого азота 21, и в сосуде Дьюара 1 создаётся давление на поверхность жидкого азота 20. Под действием этого давления жидкий азот 21 поднимается по трубке питателя 6 и через штуцер 13 попадает в трубопровод низкотемпературного приёмника (не показано). По достижению критического давления, предохранительный клапан 17 срабатывает, и излишек давления сбрасывается через отверстие в корпусе клапана 15 (не показано) автоматически. При необходимости сброс давления можно произвести, вручную оттянув шток 14 вверх.

Работа устройства контролируется с помощью блока управления (рис. 2). В состав блока управления входят фазовый регулятор мощности и узел слежения за уровнем жидкого азота. В качестве датчика наличия жидкого азота $Д_2$ применён кремниевый диод КД521А в стеклянном корпусе. Этот датчик показал высокую надёжность и обеспечивает уверенное срабатывание узла слежения. При наличии достаточного уровня жидкого азота узел слежения разрешает работу фазового регулятора мощности. На этапе выхода на рабочий режим на нагреватель подаётся максимальная мощность. При достижении рабочего давления в сосуде Дьюара мощность, подаваемую на нагреватель, уменьшают до величины, обеспечивающей необходимую скорость подачи жидкого азота. В результате расхода хладагента наступает момент, когда датчик наличия жидкого азота оказывается в газообразной среде. Узел слежения срабатывает, запрещает работу фазового регулятора мощности и включает световой индикатор HL, сигнализирующий об окончании жидкого азота. При обрыве цепи датчика наличия жидкого азота работа фазового регулятора мощности запрещена, а свечение светового индикатора, при заправленном сосуде Дьюара, будет сигнализировать о неисправности.

Благодаря наличию фазового регулятора мощности процесс стабилизации температуры может быть автоматизирован [6].

Безопасность работы с устройством обеспечивается пониженным напряжением электропитания ~30 В и наличием предохранительного клапана.

На устройство, для подачи хладагента и блок управления получены два патента РФ на изобретение [7, 8].

Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (№ 13-02-12012_офи, № 15-48-02525р-поволжье).

Литература

1. Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А., Петухов В.Ю.: ПТЭ № 5, 136–139 (2011)
2. Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А., Гумаров Г.Г.: ПТЭ № 6, 112–116 (2014) DOI: 10.7868/S0032816214050218
3. Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А.: Измерительный комплекс для контроля параметров имплантации ионного ускорителя ИЛУ-3. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2014. Ежегодник, с. 70–73. Казань: КФТИ 2015.
4. Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А.: Усовершенствованный стабилизатор тока электромагнита анализатора ионного ускорителя ИЛУ-3. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2014. Ежегодник, с. 74–75. Казань: КФТИ 2015.
5. Гумаров Г.Г., Нуждин В.И., Петухов В.Ю., Валеев В.Ф., Файзрахманов И.А.: ПТЭ № 5, 135–138 (2014) DOI: 10.7868/S003281621404017X
6. Нуждин В.И., Нуждин Е.В.: Патент РФ на изобретение №2298217, Бюл. № 12 (2007)
7. Нуждин В.И., Валеев В.Ф.: Патент РФ на изобретение №2605671, Бюл. № 36 (2016)
8. Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А.: Патент РФ на изобретение №2599822, Бюл. № 29 (2016)

Формирование и модификация сплава GeSi с наночастицами Ag путём ионной имплантации и лазерного отжига

Р. И. Баталов, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Д. А. Бизяев, А. А. Бухараев, В. В. Воробьев, Ю. Н. Осин, А. Л. Степанов

Отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория интенсивных радиационных воздействий, лаборатория радиационной физики; отдел химической физики, лаборатория физики и химии поверхности; группа нанооптики и наноплазмоники

В работе впервые рассмотрено влияние импульсного лазерного отжига (ИЛО) излучением рубинового лазера (λ = 0.694 мкм) на слои монокристаллического Si, имплантированного ионами Ge^+ и Ag^+, с целью создания кристаллического композитного плазмонного материала Ag:GeSi. В результате ионной имплантации было получено три серии образцов с аморфизированными слоями Ge:Si, Ag:Si и Ag:GeSi (последних два содержащие наночастицы Ag), которые далее подвергались ИЛО с плотностью энергии W = 1.2 и 1.5 Дж/см^2. Были изучены состав, рельеф поверхности, кристалличность и оптические характеристики сформированных слоёв в зависимости от режимов отжига. Установлено, что ИЛО Ge:Si слоя при W = 1.2 Дж/см^2 приводит к образованию ячеистой структуры, которая при большей W трансформируется в однородный монокристаллический GeSi сплав. Кристаллизация Ge:Si слоя сопровождается появлением в спектре оптического отражения характерных полос с максимумами для c-Si (276 нм) и GeSi сплава (~400 нм). Воздействие ИЛО на слой Ag:Si приводило к снижению первоначальной шероховатости поверхности, к частичной кристаллизации Si матрицы, содержащей однородный массив наночастиц Ag размером ~10 нм. При повышенном W наблюдается перераспределение размеров Ag частиц на две фракции: более крупные (40–60 нм) и мелкие (5–15 нм). В спектрах отражения слоя Ag:Si происходит восстановление полос c-Si с максимумами при 276 и 366 нм при одновременном сильном ослаблении плазмонной полосы наночастиц Ag при 835 нм. Воздействие ИЛО на слой Ag:GeSi приводит к подобному результату, наблюдаемому для слоя Ag:Si.

1. Введение

В последние годы интерес к сплавам Ge с Si ($Ge_{1-x}Si_x$) заметно вырос благодаря таким свойствам как переменная ширина запрещённой зоны (E_g = 0.67–1.1 эВ), зависящая от состава x, высокий коэффициент поглощения в видимой и ближней ИК-областях и повышенная подвижность носителей заряда по сравнению с Si [1]. Эти факторы способствуют активному внедрению сплавов GeSi в технологию изготовления приборов микро- и оптоэлектроники таких, как быстродействующие полевые транзисторы, фотоприёмники, излучатели света и др.

Отдельный интерес для практического использования, например, в солнечных элементах и сенсорах, представляют полупроводниковые материалы с наночастицами благородных металлов (Au, Ag, Pt) благодаря проявлению в них эффекта плазмонного резонанса под действием света, и как следствие, генерации локальных электромагнитных полей [2]. Можно полагать, что комбинирование сплавов GeSi с плазмонными наночастицами откроет новые возможности в плане создания приборов с повышенной функциональностью.

Ранее нами была продемонстрирована возможность создания композитных аморфных сплавов Ag:GeSi с наночастицами Ag путём высокодозной ($D \geq 10^{17}$ ион/см^2) имплантации монокристаллического c-Si последовательно ионами Ge^+ и Ag^+ [3]. При этом были детально изучены состав, морфология поверхности и оптическое отражение слоёв Ag:GeSi. Однако для ряда практических приложений востребованы сплавы с кристаллической структурой матрицы, содержащей металлические наночастицы. Известным способом устранения дефектов имплантации в Si и его кристаллизация из аморфного состояния является термический отжиг в печи. В работе [4] плазмонный кристаллический материал Au:GeSi с наночастицами Au был получен геттерированием атомов Au из вакуумно-осаждённой плёнки в поры, созданные в слое GeSi на глубине 0.5 мкм имплантацией ионами He^+ с последующим отжигом при T = 700–850 °C. Ранее нами также проводились эксперименты по термическому отжигу (600 °C / 30 мин) слоёв Ag:Si, сформированных имплантацией ионами Ag^+, при котором наблюдалась структурная модификация пористого Si слоя, сопровождающаяся испарением из него некоторого количества Ag, но с сохранением наночастиц Ag [5].

В настоящей работе с целью кристаллизации слоёв Ge:Si, Ag:Si и Ag:GeSi предлагается альтернативно термическому отжигу использовать ИЛО излучением рубинового лазера, генерирующего мощные наносекундные импульсы. Как известно, такая быстрая термическая обработка сопровождается интенсивным нагревом поверхности аморфного Si до фазы расплава с последующей быстрой кристаллизацией [6]. Таким образом, в настоящей работе приводятся результаты исследований впервые проведённого ИЛО для слоёв Si и Ge:Si с ионно-синтезированными наночастицами Ag.

2. Эксперимент

В качестве подложек в работе использовались двусторонне полированные пластины c-Si *p*-типа проводимости с ориентацией (111) и удельным сопротивлением 20 Ом · см, толщиной 400 мкм. Имплантация ионами Ge^+ и Ag^+ проводилась при вакууме 10^{-5} торр на ионном ускорителе ИЛУ-3 при комнатной температуре облучаемых образцов. Для получения образца первого типа подложка c-Si была имплантирована ионами Ge^+ с энергией ионов $E = 40$ кэВ и дозой $D = 1 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 при плотности тока в ионном пучке $J = 5$ мкА/см^2. Далее часть поверхности образца со слоем Ge:Si была прикрыта аналогичной исходной подложкой c-Si, и затем проводилась имплантация ионами Ag^+ с $E = 30$ кэВ, $D = 1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 и $J = 8$ мкА/см^2. Таким образом, для сравнительных исследований были сформированы три образца, отличающиеся химическим составом поверхностных слоёв: Ge:Si, Ag:Si и Ag:GeSi. Как было установлено ранее [3], структура имплантированных слоёв (два последних содержат наночастицы Ag) является аморфной, а их толщина, согласно расчётам, составила ~60 нм.

С целью кристаллизации аморфизованных слоёв, применялся ИЛО однократным импульсом длительностью τ_p = 80 нс излучением рубинового лазера ($\lambda = 0.694$ мкм) на воздухе. Плотность энергии в лазерном импульсе была выбрана равной $W = 1.2$ и 1.5 Дж/см^2. Диаметр пятна на образце составлял 4 мм, а однородность распределения энергии по площади пятна ±5%. В процессе ИЛО проводилось зондирование облучаемой области поверхности образцов квазинепрерывным излучением лазера на стекле с неодимом на длине волны $\lambda = 1.064$ мкм с регистрацией оптического отражения $R(t)$ на временном интервале (t) от момента воздействия лазерного импульса. Детали процесса оптического зондирования и регистрации сигнала $R(t)$ на осциллографе приведены в работе [7]. Проводимое зондирование позволяет следить за структурно-фазовыми превращениями (аморфное состояние – расплав – кристалл), происходящими на поверхности образцов в процессе действия на них лазерного импульса.

Изучение морфологии поверхности имплантированных образцов после ИЛО проводилось на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Solver P47 (NT-MDT) и сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Merlin (Carl Zeiss). Для исследования их элементного состава был проведён рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) на спектрометре Aztec X-Max (Oxford Instruments) при нормальном падении пучка электронов на образец с энергией 20 кэВ. Кристаллическая структура лазерно-отожжённых слоёв оценивалась методом дифракции отражённых электронов (ДОЭ), используя ДОЭ-детектор NordLys HKL (Oxford Instruments), установленный на СЭМ. Детали методики ДОЭ приведены в работе [5].

Кристалличность образцов после ИЛО анализировалась методом комбинационного рассеяния света (КРС) на установке LabRam HR800 (Horiba Scientific) в геометрии обратного рассеяния. Длина волны аргонового лазера составляла $\lambda = 488$ нм, мощность на образце 3 мВт. Луч лазера фокусировался на образец в область диаметром $d \sim 10$ мкм. Спектры оптического отражения $R(\lambda)$ имплантированных и отожжённых образцов были измерены на волноводном спектрометре AvaSpec-2048 (Avantes) при комнатной температуре в диапазоне длин волн 220–1000 нм при нормальном угле падения зондирующего и регистрируемого зеркально-отражённого луча света от поверхности образца. В данном интервале длин волн все излучение света поглощается в подложке c-Si, отражение от задней поверхности отсутствует.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Воздействие ИЛО на слои Ge:Si

В настоящем разделе рассмотрено влияние лазерной обработки на слои Si, сформированные имплантацией ионами Ge^+. Проведённые измерения $R(t)$ в процессе действия лазерного импульса показали, что в Ge:Si слое происходят структурные изменения, наблюдаемые по изменению интенсивности отражения, регистрируемого по временной шкале перед началом, в процессе действия, и после окончания лазерного импульса. На рис. 1 показаны осциллограммы $R(t)$ для обоих значений плотности энергии лазерного импульса ($W = 1.2$ и 1.5 Дж/см^2), а также временная развёртка (форма) самого лазерного импульса. Начальный участок кривой $R(t)$, длящийся первые 60 нс, характеризуется интенсивностью отражения $R \sim 45\%$ [3] и соответствует исходному аморфному слою Ge:Si. Далее,

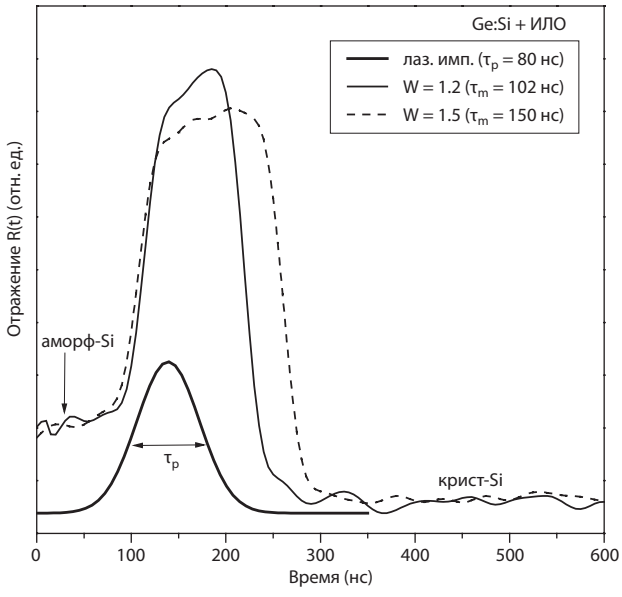


Рис. 1. Осциллограммы отражения $R(t)$ на длине волны $\lambda = 1.064$ мкм слоя Si, имплантированного ионами Ge^+ (40 кэВ/$1 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$), в процессе ИЛО с указанной плотностью энергии (W). В скобках приведены длительность импульса (τ_p) и продолжительность фазы расплава (τ_m). Также приведена форма лазерного импульса.

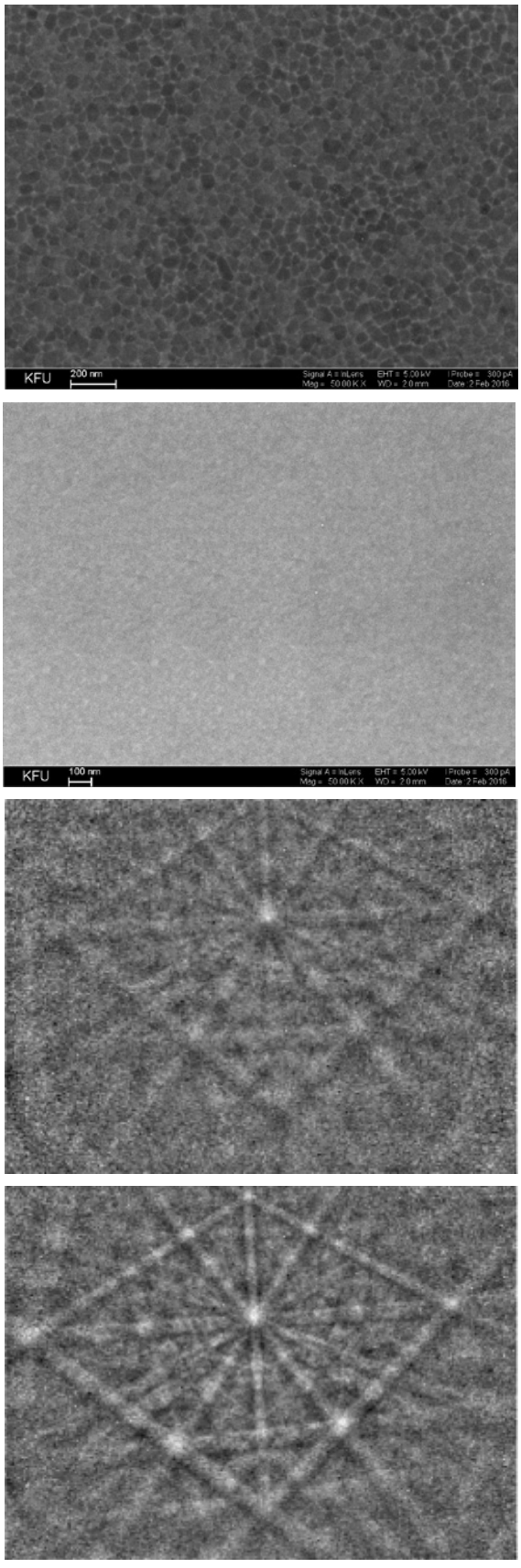


Рис. 2. СЭМ изображение поверхности слоя Si, имплантированного ионами Ge^+ (40 кэВ/$1 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$), и подвергнутого ИЛО с $W = 1.2$ Дж/$см^2$ (**а**) и с $W = 1.5$ Дж/$см^2$ (**б**), и их соответствующие картины ДОЭ (**в**, **г**).

на временном участке от 60 до 120 нс, наблюдается резкое возрастание интенсивности отражения до значений $R \geq 70\%$, характерных для расплава при подобном ИЛО нелегированного Si [8]. Временной интервал от 120 до 200–250 нс соответствует существованию расплава Ge:Si слоя на поверхности Si. Его продолжительность (τ_m), определяемая на полувысоте кривой, составляет 100–150 нс. Дальнейший спад интенсивности $R(t)$ на временном интервале 200–300 нс до уровня ниже первоначального ($R \sim 35\%$, рис. 3) связан с отвердеванием расплава и предполагает формирование сплава GeSi в имплантированном слое.

Исследование на СЭМ морфологии поверхности слоя Ge:Si после ИЛО показало её изменение для различных значений W. При $W = 1.2$ Дж/$см^2$ морфология Ge:Si слоя представляет собой ячеистую структуру с размерами ячеек 50–100 нм (рис. 2а). Подобные структуры также наблюдались ранее при лазерной обработке Ge:Si слоёв, сформированных высокодозовой имплантацией ионами Ge^+ [9, 10] или на вакуумно-осаждённых слоях SiGe/Si [11]. Изучение поперечных срезов образцов, проведённые на просвечивающем электронном микроскопе, показали, что ячейки образованы столбовидными структурами из Si, выросшими от межфазной границы слой/подложка до поверхности, в стенках которых сосредоточены атомы Ge [11]. В настоящей работе анализ элементного состава слоя Ge:Si, проведённый после ИЛО ($W = 1.2$ Дж/$см^2$) методом РСМА, указывает на концентрацию Ge в нём ~0.9 ат.% при зондировании образца на глубину ~1 мкм, что идентично содержанию Ge в слое Ge:Si, сформированном при имплантации. ДОЭ имплантированного слоя Ge:Si показала размытую дифракционную картину, характерную для аморфного слоя. После ИЛО с $W = 1.2$ Дж/$см^2$ наблюдается суперпозиция линий Кикучи и диффузных колец (рис. 2в), что отражает частичную кристаллизацию слоя Ge:Si с присутствием в слое остаточной аморфной фазы.

При повышении W до 1.5 Дж/$см^2$ поверхностная структура Ge:Si слоя, как видно на СЭМ, становится однородной (рис. 2б). Ячеистая структура отсутствуют и можно предполагать более равномерное распределение атомов Ge по объёму слоя, без образования отдельных скоплений атомов Ge. По данным ДОЭ наблюдается формирование кристаллического GeSi сплава, характеризуемого чёткими линиями Кикучи (рис. 2г). При этом состав поверхностного слоя относительного имплантированного образца не меняется, содержание Ge остается на прежнем уровне (~0.9 ат.%).

Влияние ИЛО на оптические свойства слоя Ge:Si представлено на рис. 3 в виде спектров $R(\lambda)$. Для сравнения на этом же рисунке приведён спектр отражения подложки c-Si, в котором доминируют две известные полосы в УФ-области с максимумами при 276 и 366 нм. В спектре имплантированного слоя Ge:Si (до ИЛО, $W = 0$) присутствует только коротковолновая полоса (~280 нм), её интенсивность ослаблена, что связано с аморфизацией поверхностного слоя [3]. ИЛО при $W = 1.5$ Дж/$см^2$ приводит к двукратному повышению интенсивности этой полосы от

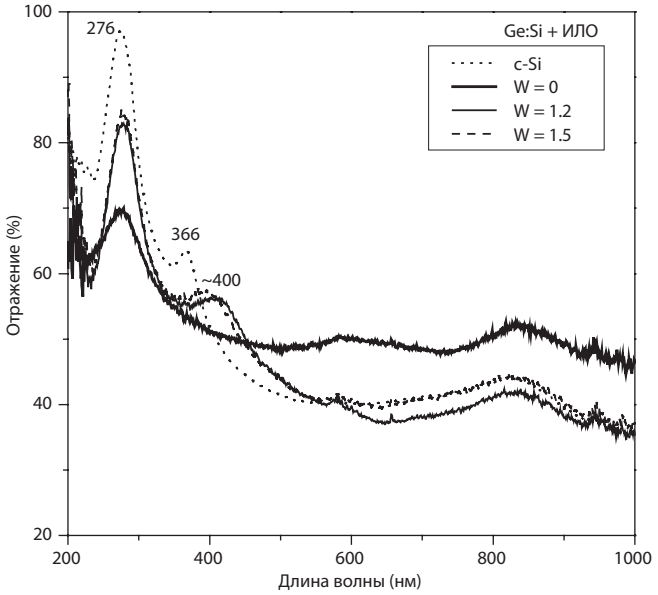


Рис. 3. Спектры отражения $R(\lambda)$ слоя Si, имплантированного ионами Ge^+ и подвергнутого ИЛО с указанной плотностью энергии (W). Также приведён спектр отражения для монокристалла c-Si.

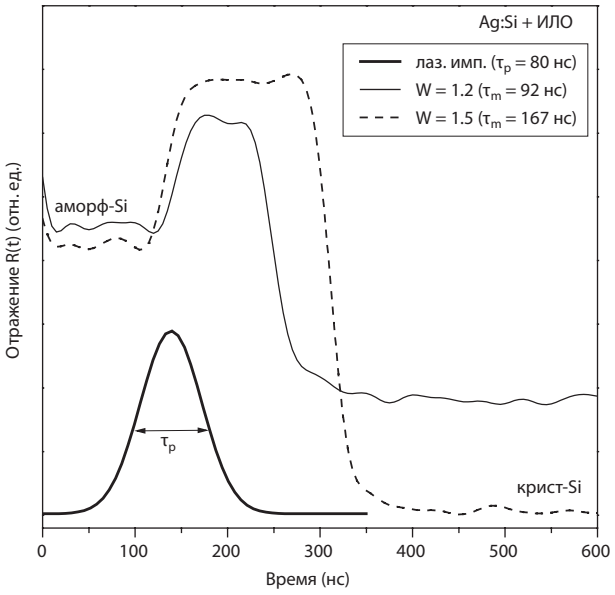


Рис. 4. Осциллограммы отражения $R(t)$ на длине волны $\lambda = 1.064$ мкм слоя Si, имплантированного ионами Ag^+ (30 кэВ/$1.5 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$), в процессе ИЛО с указанной плотностью энергии (W). В скобках приведены длительность импульса (τ_p) и продолжительность фазы расплава (τ_m). Также приведена форма лазерного импульса.

значения, соответствующего имплантированному образцу, до значения приближенного к интенсивности полосы для c-Si, что указывает на восстановление кристаллической структуры слоя Ge:Si. В то же время после ИЛО в зависимости от W наблюдается появление полосы отражения с максимумами при 396 и 412 нм, которая расположена на больших длинах волн по сравнению с полосой c-Si (366 нм). Схожая полоса отражения для сплава $Ge_{0.2}Si_{0.8}$ наблюдалась ранее в работе [12].

3.2. Воздействие ИЛО на слои Ag:Si

В данном разделе статьи обсуждаются результаты ИЛО композитного слоя Ag:Si, сформированного при высокодозной имплантации ионов Ag^+ в подложку c-Si. На рис. 4 приведены осциллограммы отражения $R(t)$ для слоя Ag:Si, облучённого с различными значениями W (1.2 и 1.5 Дж/см^2). В сравнении с предыдущим образцом со слоем Ge:Si видно, что для указанных значений W также возникает расплав имплантированного слоя Ag:Si, длительность существования которого (τ_m) растёт от 92 до 167 нс с повышением W. Также заметна повышенная (относительно слоя Ge:Si) интенсивность отражения имплантированного аморфного слоя Ag:Si, содержащего кристаллические наночастицы Ag, которая по данным [3] и приведённого далее рис. 8 (кривая $W = 0$), составляет $R \sim 65\%$. По аналогии с ИЛО c-Si [8], в данном случае возникновение расплава на поверхности слоя Ag:Si приводит к росту отражения до $R \sim 70$–75% с последующим его спадом в результате затвердевания расплава до значений $R \sim 50\%$ и ~35% (рис. 8) для $W = 1.2$ и 1.5 Дж/см^2, соответственно.

С целью определения структуры и уровня шероховатости Ag:Si слоёв, подвергнутых ИЛО, были проведены исследования на АСМ. На рис. 5 показаны АСМ-изображения имплантированных и отожжённых лазером слоёв. Исходный слой Ag:Si имеет характерную пористую (ямочную) структуру поверхности, которая состоит из углублений с латеральными размерами 150–200 нм, разделённых стенками толщиной 40–60 нм (рис. 5а), в которых сосредоточены наночастицы Ag с размерами 10–20 нм [3]. При этом значение среднеквадратичной шероховатости поверхности $\sigma = 9.2$ нм. Проведённый ИЛО с $W = 1.2$ Дж/см^2 модифицирует структуру слоя незначительно. Стенки пор становятся несколько шире (до 100 нм), а латеральные размеры углублений слегка уменьшаются до 100–150 нм (рис. 5б). Одновременно с этим уровень шероховатости поверхности заметно уменьшается до $\sigma = 3.3$ нм.

По аналогии с лазерным отжигом натриево-силикатного стекла с ионно-синтезированными наночастицами Ag [13], в результате ИЛО Ag:Si слоя, можно ожидать, что одновременно с плавлением аморфного Si также происходит и плавление наночастиц Ag, обладающих более низкой температурой плавления (<500 °C) [13], чем у объёмного серебра (960 °C). На стадии плавления a-Si и наночастиц Ag происходит продольное (к поверхности) и поперечное (в стороны) диффузионное перераспределение Ag, в результате которого на стадии затвердевания начинается зарождение и рост новых наночастиц Ag. Одновременно с этим происходит некоторое сглаживание морфологии поверхности образца. Эффект сегрегации или вытеснения примеси к поверхности при жидкофазном ИЛО характерен для малорастворимых в Si примесей, таких как

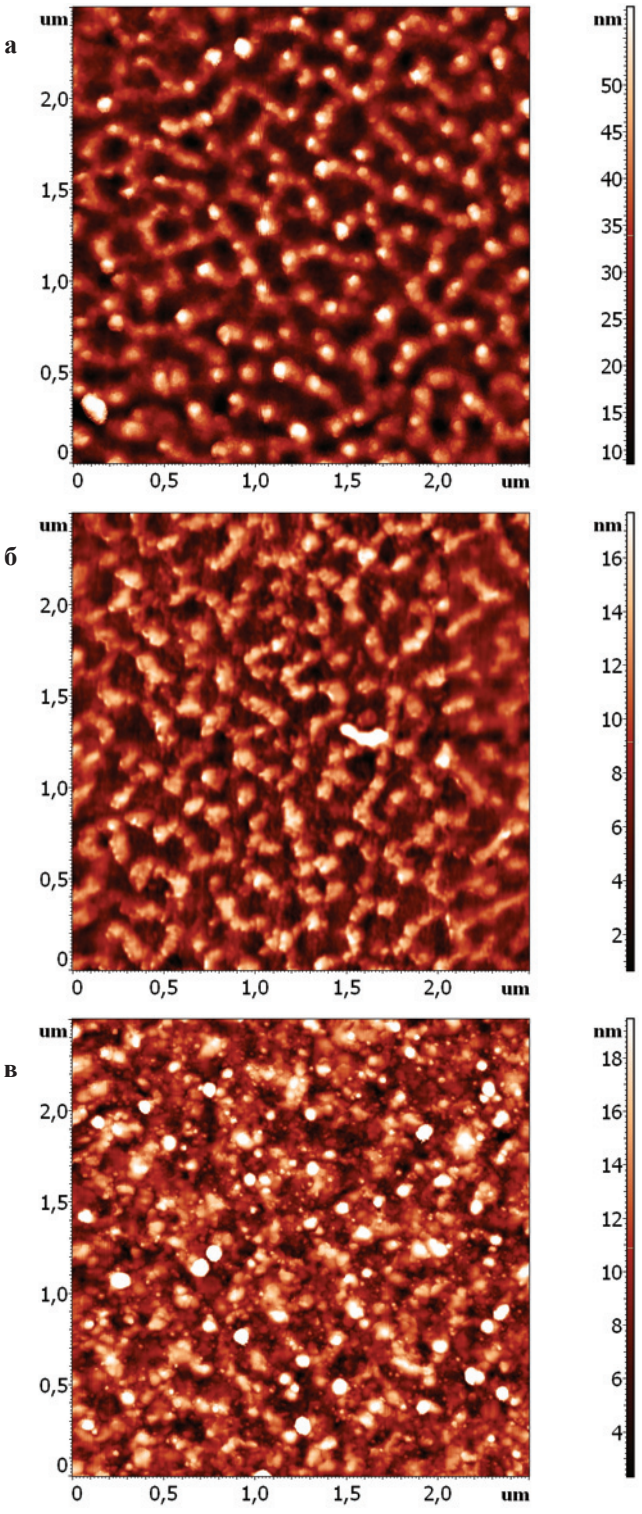


Рис. 5. АСМ изображения поверхности слоя Si, имплантированного ионами Ag^+ (30 кэВ/$1.5 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$): **а** после имплантации (σ = 9.2 нм), **б** после ИЛО с W = 1.2 Дж/$см^2$ (σ = 3.3 нм), **в** W = 1.5 Дж/$см^2$ (σ = 3.9 нм).

металлы, в частности Ag, растворимость которого низка и составляет ~10^{16} $см^{-3}$ [14].

По данным АСМ повышение W до 1.5 Дж/$см^2$ сопровождается образованием более плотного (по сравнению с W = 1.2 Дж/$см^2$) массива наночастиц Ag на поверхности

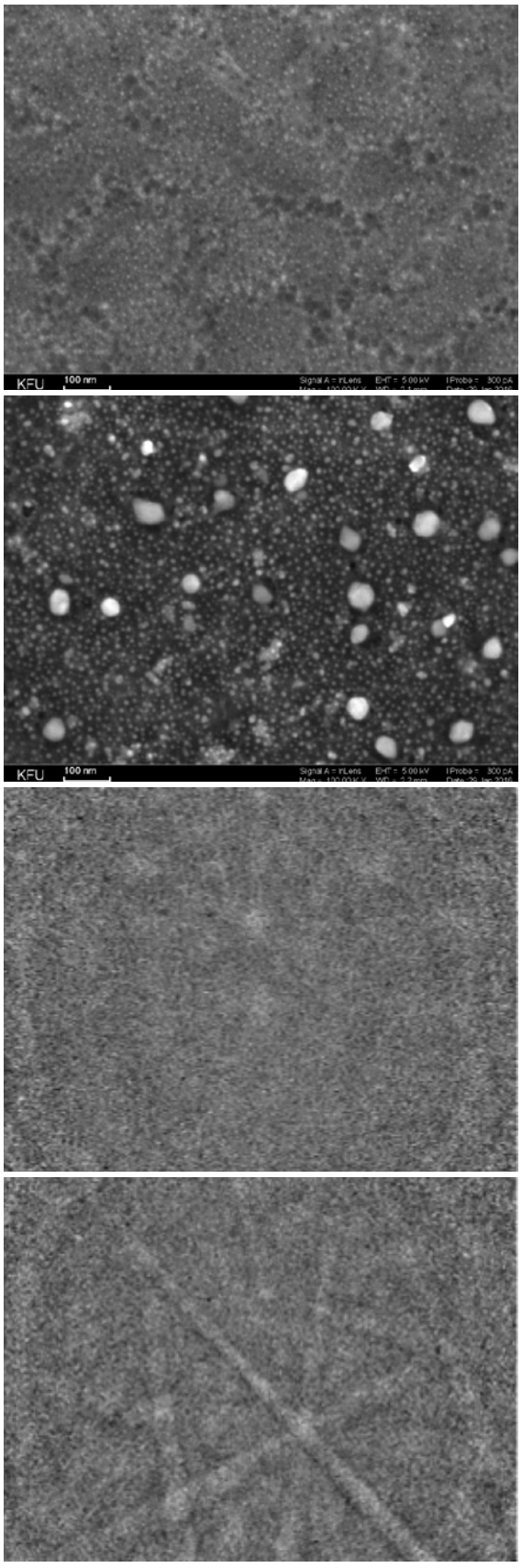


Рис. 6. СЭМ изображение поверхности слоя Si, имплантированного ионами Ag^+ (30 кэВ/$1.5 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$), и подвергнутого ИЛО с W = 1.2 Дж/$см^2$ (**а**) и W = 1.5 Дж/$см^2$ (**б**). Картины ДОЭ от слоя Ag:Si после ИЛО с W = 1.2 Дж/$см^2$ (**в**) и W = 1.5 Дж/$см^2$ (**г**).

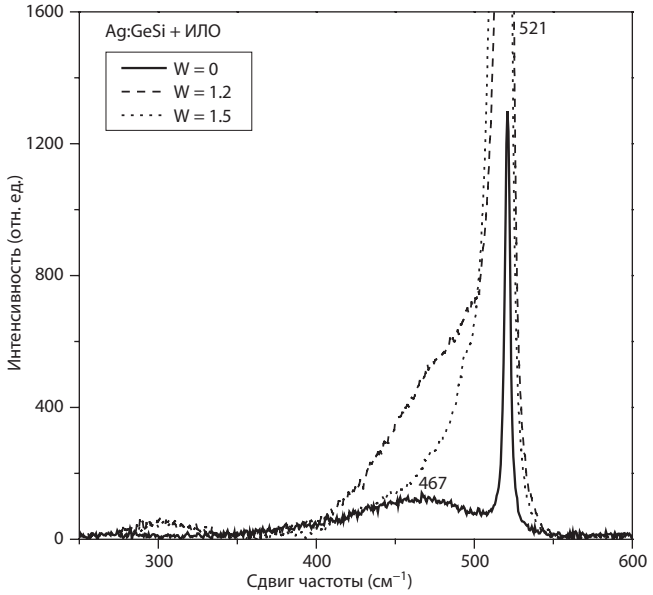


Рис. 7. Спектры КРС слоя Ag:Si до (W = 0) и после ИЛО с W = 1.2 и 1.5 Дж/см^2.

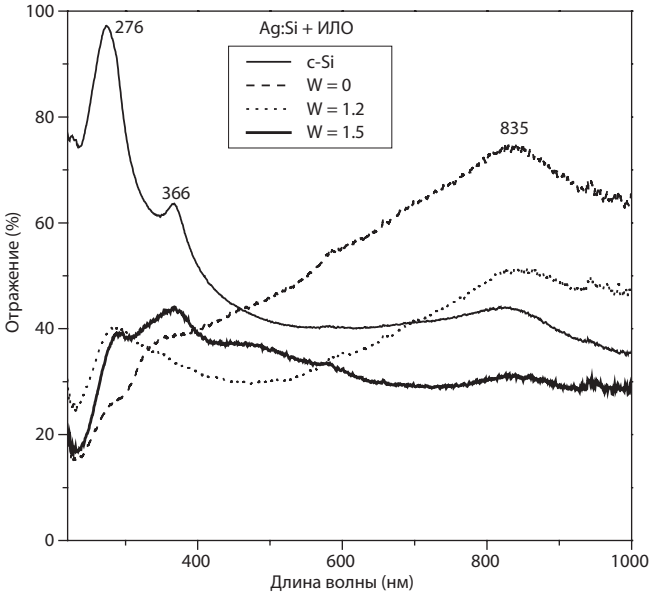


Рис. 8. Спектры отражения $R(\lambda)$ слоя Si, имплантированного ионами Ag^+ и подвергнутого ИЛО с указанной плотностью энергии (W). Также приведён спектр отражения для монокристалла c-Si.

Ag:Si слоя, при этом ямочная структура практически сглаживается (рис. 5в). Видно, что наночастицы Ag распределены по поверхности образца более однородно, их размеры распределены между 10–100 нм, а уровень шероховатости несколько вырастает до σ = 3.9 нм.

Исследование микроструктуры слоя Ag:Si после ИЛО с помощью СЭМ позволило наблюдать мелкие объекты на поверхности образцов с размерами ≤10 нм (рис. 6). Видно, что при ИЛО с W = 1.2 Дж/см^2 границы пор, образовавшихся в результате ионной имплантации, сохраняются, по-видимому, вследствие неполного плавления слоя. Также видно наличие множества мелких наночастиц Ag с размерами 5–10 нм, образовавшихся на стадии имплантации, прошедших фазу расплава и сформировавшихся вновь на стадии затвердевания (рис. 6а). При повышении W до 1.5 Дж/см^2 происходит исчезновение границ пор, а образовавшиеся наночастицы Ag по своим размерам можно разделить на две фракции: мелкие (5–15 нм) и более крупные (40–60 нм) (рис. 6б).

Изучение элементного состава слоя Ag:Si после ИЛО при обоих W методом РСМА не показало существенного изменения концентрации Ag (по сравнению с имплантированным слоем), которая варьировалась в диапазоне 0.65–0.7 ат.%. Таким образом, быстрая лазерная обработка (по сравнению с термическим отжигом в печи) не приводит к испарению Ag из образца.

Метод ДОЭ (рис. 6в) показал размытую картину дифракции, без Кикучи-линий, в случае отжига слоя при W = 1.2 Дж/см^2, что говорит о сохранении аморфной фазы Si (a-Si) в поверхностном слое образца. При повышенном значении W = 1.5 Дж/см^2 наблюдается ДОЭ-картина с размытыми Кикучи-линиями (рис. 6г), указывающая на частичную кристаллизацию Si. Меньшая эффективность кристаллизации слоя Ag:Si при W = 1.5 Дж/см^2 по сравнению со слоем Ge:Si может объяснятся различием в стартовых условиях при ИЛО. А именно в более высоком оптическом отражении имплантированного слоя Ag:Si на длине волны рубинового лазера (λ = 0.694 мкм), где R ~ 65% (рис. 8) против 50% (рис. 3). Повышенное отражение слоя Ag:Si ведёт к повышенным потерям падающей мощности лазерного излучения на отражение и, следовательно, к меньшему поглощению его энергии в образце.

Метод КРС также использовался для оценки кристаллличности Ag:Si слоёв. По наличию широкой полосы с максимумом при ~467 см$^{-1}$, соответствующей фазе a-Si, наблюдаемой одновременно с пиком кристаллической подложки c-Si при 521 см$^{-1}$ (рис. 7) можно сделать заключение об аморфности содержащей наночастицы Ag матрицы a-Si в слое Ag:Si после ионной имплантации (W = 0). При этом глубина зондирования (на λ = 488 нм) составляет всего около 50 нм [6], что соизмеримо с толщиной имплантированного слоя Ag:Si. Как следует из сдвига максимума полосы a-Si к 486 см$^{-1}$, воздействие ИЛО при W = 1.2 Дж/см^2 приводит к перестройке структуры слоя, стремясь к его кристаллизации. При большем значении W низкочастотный пик a-Si значительно ослабляется, указывая на процессы кристаллизации Si в Ag:Si слое, что согласуется с ДОЭ данными (рис. 6г).

На рис. 8 для сравнения приведены спектры отражения для подложки c-Si, а также имплантированного слоя Ag:Si до и после ИЛО. Спектр имплантированного слоя (W = 0) характеризуется слабыми полосами в УФ-области от a-Si и интенсивной плазмонной полосой при λ = 835 нм [3]. Воздействие ИЛО с W = 1.2 Дж/см^2 приводит к некоторому усилению интенсивности пика c-Si при 276 нм, что говорит о некоторой кристаллографической упо-

рядоченности атомов Si. При этом наблюдается снижение интенсивности отражения плазмонного пика с 75% до 50%, что связано с модификацией микроструктуры слоя и перераспределением размеров наночастиц Ag в нём. ИЛО с W = 1.5 Дж/см^2 приводит к появлению второго пика c-Si при 376 нм, что указывает на восстановление кристаллической структуры Si. Кроме того, по сравнению с ИЛО при W = 1.2 Дж/см^2, наблюдается более низкая интенсивность отражения плазмонного пика R ~ 30% в области 835 нм.

3.3. Воздействие ИЛО на слои Ag:GeSi

Рассмотрим влияние ИЛО на поверхностные слои, сформированные последовательной имплантацией ионами Ge^+ и Ag^+ в c-Si. Осциллограммы отражения $R(t)$ для обоих значений W слоёв Ag:GeSi (рис. 9) в целом схожи с таковыми для слоёв Ag:Si (рис. 4), как по динамике модификации слоя, так и по времени возникновения и жизни расплава (τ_m), что подразумевает схожесть облучаемых структур.

Результаты исследования морфологии поверхности слоёв Ag:GeSi методом АСМ после имплантации и ИЛО приведены на рис. 10. Для данного образца также имеет место уменьшение шероховатости поверхности относительно имплантированного образца после ИЛО с 5 до 3 нм. СЭМ измерения также показали границы образовавшихся при имплантации пор и формирование по всей поверхности мелких наночастиц Ag с размерами ~10 нм при отжиге с W = 1.2 Дж/см^2 (рис. 11а). Отжиг с большей плотностью энергии приводит к появлению и более крупных наночастиц (30–60 нм) за счёт слияния более мелких (рис. 11б). Исследования кристалличности слоя Ag:GeSi методом ДОЭ показало присутствие аморфной фракции при ИЛО с меньшей W (отсутствие Кикучи-линий) и более высокое качество структуры слоя при отжиге с W = 1.5 Дж/см^2 (рис. 11в, г). Схожесть полученных данных с данными по структуре слоёв Ag:Si связана с низким содержанием в слое Ag:GeSi атомов Ge. Элементный РСМА анализ показал, что в исходном образце Ag:GeSi (до ИЛО) содержание Ag и Ge составляет 0.65 и 0.1 ат.%, соответственно, и оно оставалось тем же после ИЛО. Как отмечалось ранее в [3], имплантация слоя Ge:Si ионами Ag^+ приводила к распылению значительной части внедрённого Ge. Дополнительным подтверждением частичной кристаллизации слоя Ag:GeSi при ИЛО является спектр КРС (рис. 12), из которого видно существенное возрастание кристаллической фазы в слое по росту интенсивности фононных пиков при 303 и 521 см$^{-1}$. Однако даже отжиг при W = 1.5 Дж/см^2 не полностью устраняет аморфную компоненту в слое.

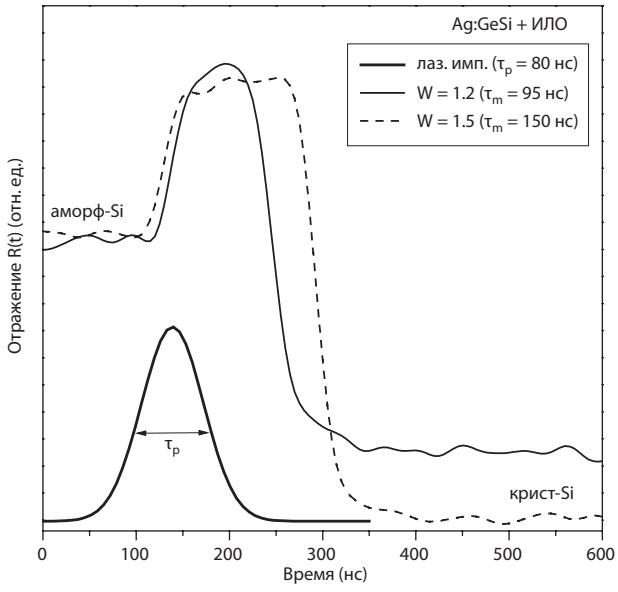


Рис. 9. Осциллограммы отражения $R(t)$ на длине волны λ = 1.064 мкм слоя Si, имплантированного ионами Ge^+ (40 кэВ/1 · 10^{17} см$^{-2}$) и затем Ag^+ (30 кэВ/1.5 · 10^{17} см$^{-2}$), в процессе ИЛО с указанной плотностью энергии (W). В скобках приведены длительность импульса (τ_p) и продолжительность фазы расплава (τ_m). Также приведена форма лазерного импульса.

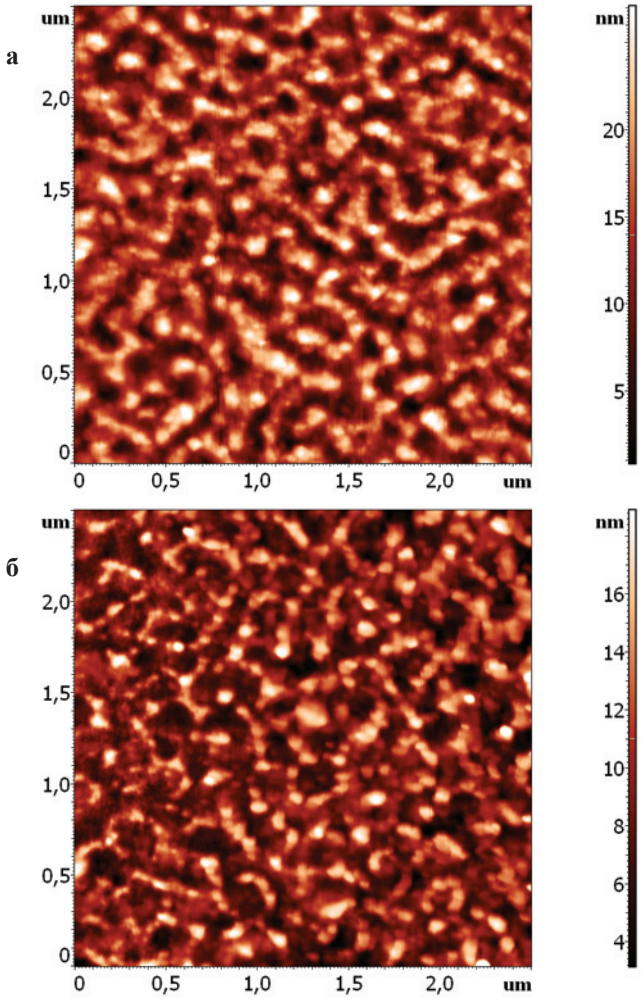


Рис. 10. АСМ изображения поверхности слоя Si, имплантированного ионами Ge^+ и затем ионами Ag^+ (σ = 5.1 нм) (**а**) и подвергнутого далее ИЛО с W = 1.5 Дж/см^2 (σ = 3.2 нм) (**б**).

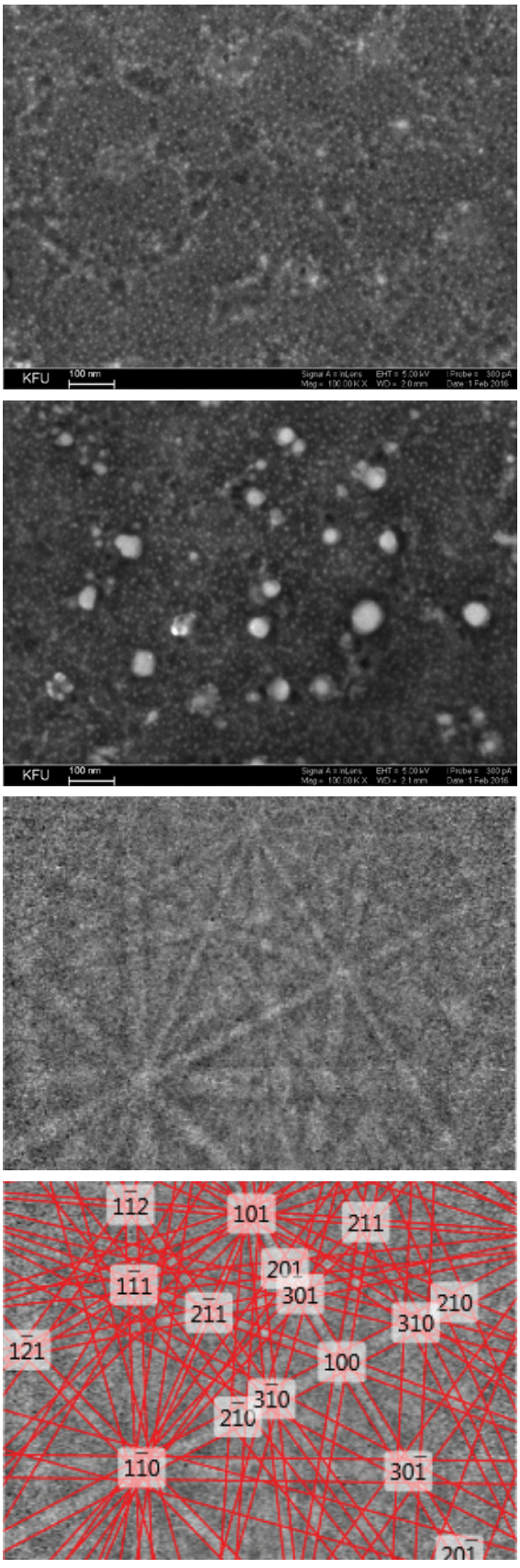


Рис. 11. СЭМ изображение поверхности слоя Si, имплантированного ионами Ge^+ и затем Ag^+ и подвергнутого ИЛО с W = 1.2 Дж/см^2 (**а**) и W = 1.5 Дж/см^2 (**б**). Картина ДОЭ с Кикучи-линиями от слоя Ag:GeSi после ИЛО с W = 1.5 Дж/см^2 (**в**) и её индексирование (**г**).

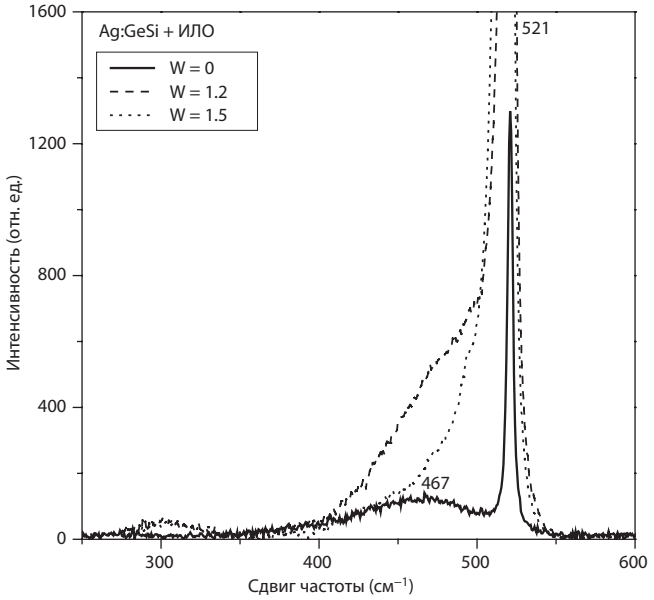


Рис. 12. Спектры КРС слоя Ag:GeSi до и после ИЛО с W = 1.2 и 1.5 Дж/см^2.

Вероятной причиной этого (как и для слоя Ag:Si) является меньшее поглощение лазерного излучения образцом вследствие его повышенного отражения.

Исследование оптического отражения слоёв Ag:GeSi до и после ИЛО (рис. 13) также показало схожесть со слоем Ag:Si, т.е с ростом W улучшается кристаллизация слоя, исходя из интенсивности пиков c-Si в УФ-области, при одновременном падении отражения плазмонного пика при 835 нм, означающего рост поглощения в данной области спектра. При этом абсолютные значения отражения слоя

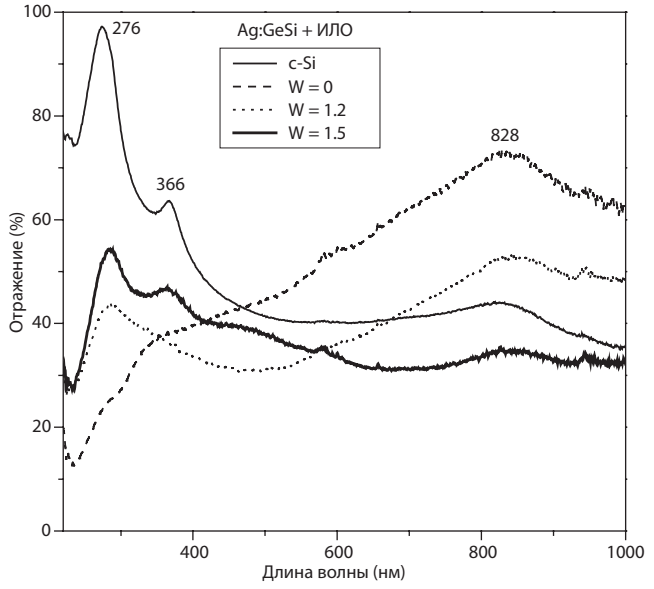


Рис. 13. Спектры отражения $R(\lambda)$ слоя Si, имплантированного ионами Ge^+ и затем Ag^+ и подвергнутого ИЛО с указанной плотностью энергии (W). Также приведён спектр отражения для монокристалла c-Si.

Ag:GeSi для пика 835 нм несколько превышают значения для слоя Ag:Si (на 3–5%), что может быть связано со вкладом компоненты Ge. Таким образом, ключевой задачей для будущей работы является оптимизация процесса имплантации ионов Ge^+ и Ag^+ с целью снижения эффекта распыления Ge, а также подбор оптимальной длины волны ИЛО.

4. Заключение

Изучено воздействие импульсного лазерного отжига (λ = 0.694 мкм) на состав, рельеф поверхности, кристалличность и оптическое отражение слоёв Ge:Si, Ag:Si и Ag:GeSi, полученных последовательной ионной имплантацией подложки c-Si. Определены режимы отжига (W = 1.5 Дж/см^2), приводящие к формированию однородного по структуре монокристаллического GeSi сплава, а также слоёв Ag:Si и Ag:GeSi, содержащих минимальное количество аморфной компоненты и однородного по площади образца массива наночастиц Ag с размерами 10–60 нм. Предполагается, что неполная кристаллизация слоёв с наночастицами Ag при ИЛО связана с пониженным поглощением лазерного излучения образцом вследствие повышенного отражения аморфных слоёв на длине волны рубинового лазера. Обнаружено сильное падение отражения в области плазмонного пика наночастиц Ag (λ = 835 нм).

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-29-06137_офи_м совместно с сотрудником Института автоматики и процессов управления ДВО РАН (Владивосток) Галкиным К. Н. и сотрудником Белорусского государственного университета (Минск) Ивлевым Г. Д. Результаты по электронной микроскопии были получены на оборудовании Междисциплинарного центра “Аналитическая микроскопия” Казанского (Приволжского) федерального университета.

Литература

1. Paul D.J.: Semicond. Sci. Technol. **19**, R75–R108 (2004)
2. Kreibig U., Vollmer M.: Optical properties of metal clusters, Berlin: Springer 1995. 432 p.
3. Баталов Р.И., Воробьев В.В., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Баязитов Р.М., Лядов Н.М., Осин Ю.Н., Степанов А.Л.: ЖТФ **86**, 104–110 (2016)
4. Gaiduk P.I., Larsen A.N.: Phys. Status Solidi A **211**, 2455–2460 (2014)
5. Воробьев В.В., Осин Ю.Н., Ермаков М.А., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Степанов А.Л.: Нанотехнологии: Наука и производство, №1, 42–52 (2015)
6. Двуреченский А.В., Качурин Г.А., Нидаев Е.В., Смирнов Л.С.: Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. М.: Наука 1982. 208 с.
7. Новиков Г.А., Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Файзрахманов И.А., Ивлев Г.Д., Прокопьев С.Л.: ЖТФ **85**, 89–95 (2015)
8. Ивлев Г.Д., Гацкевич Е.И.: ЖТФ **82**, 69–72 (2012)
9. Aydinli A., Berti M., Drigo A.V., Lotti R., Merli P.G.: J. Appl. Phys. **64**, 3301–3303 (1988)
10. Mathe E.L., Naudon A., Repplinger F., Fogarassy E.: Appl. Surf. Sci. **86**, 338–345 (1995)
11. Ивлев Г.Д., Казючиц Н.М., Прокопьев С.Л, Русецкий М.С., Гайдук П.И.: ПЖТФ **40**, 9–15 (2014)
12. Schmidt E.: Phys. Status Solidi **27**, 57–67 (1968)
13. Stepanov A.L., Hole D.E., Townsend P.D.: Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **149**, 89 (1999).
14. Глазов В.М., Земсков В.С.: Физико-химические основы легирования полупроводников. М.: Наука 1967. 372 с.

Формирование сильно легированных поли- и монокристаллических слоёв n-Ge:Sb на подложках p-Ge и p-GaAs под действием мощных ионных и лазерных пучков

Р. М. Баязитов, Р. И. Баталов, Г. А. Новиков, И. А. Файзрахманов, Н. М. Лядов, В. А. Шустов, В. В. Воробьев

Отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория интенсивных радиационных воздействий, лаборатория радиационной физики; отдел химической физики, лаборатория физики углеродных наноструктур и композитных систем; группа нанооптики и наноплазмоники

Напряжённые и сильно-легированные слои Ge перспективны в микро- и оптоэлектронике для изготовления быстродействующих полевых транзисторов, а также светодиодов и фотодетекторов в ИК-области. В данной работе проведено формирование растянуто-напряжённых (~0.17%) и сильно легированных (до 10^{20} $см^{-3}$) донорной примесью (сурьма) поли- и монокристаллических слоёв n-Ge:Sb на идентичных (p-Ge) или структурно-близких (p-GaAs) подложках путём ионно-лучевого распыления в вакууме композитной мишени Sb/Ge с последующей импульсной обработкой аморфных слоёв мощными ионными или лазерными пучками. Установлена зависимость времени существования расплава от режимов импульсных воздействий, теплопроводности подложек и уровня их легирования. Определены оптимальные режимы импульсных обработок, приводящие к созданию эпитаксиальных слоёв Ge:Sb/Ge и Ge:Sb/GaAs. Определены электрические параметры (слоевое сопротивление, концентрация электронов и их подвижность) сформированных слоёв, получены их вольт-амперные характеристики и спектры фотопроводимости при 300 К.

Введение

Как известно, развитие микроэлектроники хорошо подчиняется эмпирическому закону Г. Мура, согласно которому каждые 1.5–2 года количество транзисторов на чипе удваивается. К настоящему времени количество транзисторов на чипе превысило миллиард, а технологические нормы их изготовления снизились до 10 нм. В ближайшей перспективе (2017–2018 гг.) ожидается достижение рубежа в 20 млрд. транзисторов и переход к 7-нм технологии [1]. Однако при этом традиционный материал микроэлектроники – кремний - предполагается частично заменить сплавами кремния с германием (SiGe) или германием (Ge) вследствие более высокой (до 2–3 раз) подвижности носителей в них, что позволяет достичь большего быстродействия приборов [2]. Наряду с микроэлектроникой Ge интересен также и для оптоэлектроники при изготовлении фотоприёмников и излучателей ближнего ИК-диапазона благодаря более узкой запрещённой зоне (E_g = 0.67 эВ), более высокому коэффициенту поглощения (в сравнении с Si) и возможности реализовать прямозонную люминесценцию в области длин волн λ = 1.5–1.7 мкм. Последнее обстоятельство обусловлено модификацией зонной структуры Ge при введении в кристалл деформации растяжения (ε = 0.2–0.3 %) и/или высокой концентрации донорной примеси ($N > 10^{18}$ $см^{-3}$). При этом Ge становится квазипрямозонным, поскольку уменьшается разница в энергиях между прямой и непрямой долинами ($\Delta E \rightarrow 0$) [3]. Наряду с усилением фото- и электролюминесценции объёмных кристаллов Ge и тонкоплёночных гетероструктур Ge/Si при $T > 250$ К [3–5], также сообщалось о расширении области фоточувствительности в сторону длинных волн (до 1.83 мкм) в фотодетекторе, изготовленном на основе гомоперехода n^+-Ge/p-Ge, вследствие сужения запрещённой зоны слоя n^+-Ge под действием растяжения (0.2–0.76%) и легирования (~10^{19} $см^{-3}$) [6].

Ранее нами была разработана методика получения напряжённых (до 1%) нелегированных (i-Ge) [7] и сильно легированных (до $5.5 \cdot 10^{20}$ $см^{-3}$) донорной примесью плёнок n^+-Ge:Sb [8] с поликристаллической структурой на различных подложках (Si, SiO_2, Al_2O_3). Методика включает распыление мишени Ge (или Sb/Ge) и импульсную лазерную обработку осаждённых аморфных плёнок. В настоящей работе проводились эксперименты по осаждению плёнок n^+-Ge:Sb с пониженной концентрацией Sb ($N \leq 10^{20}$ $см^{-3}$) на идентичные (p-Ge) или структурно-близкие (p-GaAs) монокристаллические подложки с целью получения более качественных (эпитаксиальных) плёнок. В последнем случае различие в параметрах решёток Ge (a = 5.657 Å) и GaAs (a = 5.653 Å) чрезвычайно мало (0.08%).

Эксперимент

В качестве подложек использовались односторонне-полированные слабо легированные ($N \leq 10^{15}$ $см^{-3}$) монокристаллы p-Ge(111) и p-GaAs(111), а также сильно легированные ($N \sim 10^{19}$ $см^{-3}$) пластины p-GaAs(111). Осаждение сильно легированных плёнок n^+-Ge:Sb проводилось при вакууме $p = 2 \cdot 10^{-4}$ Торр на экспериментальной установке с ионным источником типа Кауфмана. Распыляемая мишень представляла собой пластину Ge диаметром 60 мм и толщиной 3 мм с нанесёнными кусочками Sb, площадь которых была уменьшена по сравнению с предыдущими экспериментами. Указанная мишень облучалась под углом 25° низкоэнергетичным

(E = 1.3 кэВ) пучком ионов Xe^+ при плотности тока j = 150 мкА/см^2. В процессе осаждения держатель подложки вращался со скоростью v = 2.4 мин$^{-1}$ для улучшения однородности плёнки по толщине. Перед началом осаждения проводилась ионная чистка мишени и подложки. Толщина плёнок Ge:Sb составляла около 270 нм. Осаждение проводилось без подогрева подложек и, поэтому, структура плёнок была аморфной. Для кристаллизации плёнок Ge:Sb применялся либо импульсный лазерный отжиг (ИЛО) излучением рубинового лазера (λ = 0.69 мкм, τ = 80 нс, W = 0.2–1.4 Дж/см^2, диаметр пятна d = 4 мм) на воздухе либо импульсная ионная обработка (ИИО) мощными ионными пучками (C^+ – 80%, H^+ – 20%, E = 300 кэВ, τ = 100 нс, W = 0.5–1.0 Дж/см^2, диаметр пятна d = 2 см) в вакуумной камере сильноточного ионного ускорителя ТЕМП. При этом доза вводимых ионов за импульс не превышает 10^{13} см$^{-2}$, а сама обработка характеризуется интенсивным нагревом вещества на глубину пробега ионов (d ~ 0.6 мкм для ионов C^+).

В процессе ИЛО проводилась регистрация отражения плёнки $R(t)$ быстродействующими ФЭУ на длинах волн 1.06 и 0.53 мкм с целью изучения протекающих фазовых переходов. Исследования морфологии поверхности плёнок, их элементного состава и кристаллической структуры проводились методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопах EVO50 и Merlin (Carl Zeiss) с использованием приставок для элементного анализа и дифракции отражённых электронов (ДОЭ), и рентгеновской дифракции в скользящих лучах (РДСЛ) на дифрактометре ДРОН-7. Электрофизические свойства плёнок Ge:Sb исследовались путём измерения слоевого сопротивления (ρ_s) и слоевой концентрации носителей (N_s) методом Ван-дер-Пау при 300 К. Из этих данных проводился расчёт объёмной концентрации носителей (N_e) и их подвижности (μ_e). На отдельных образцах изготавливались меза-диоды диаметром 1 мм путём химического травления для последующих измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ).

Оптические свойства плёнок изучались путём измерения фотолюминесценции (ФЛ) в ближней ИК-области (λ = 1–2 мкм) при 300 К с использованием фотодиода на основе GaSb. В качестве источников возбуждения применялись твёрдотельный зелёный (λ = 532 нм) или красный (λ = 660 нм) лазеры с мощностью до 250 мВт. Измерения фотопроводимости (ФП) проводились на диодной меза-структуре в области длин волн λ = 0.6–2 мкм при 300 К с подачей на p-n переход обратного смещения V = 10 В (фотодиодный режим). Исследуемый образец располагался у выходной щели монохроматора МДР-206 и освещался светом галогенной лампы мощностью 100 Вт, находящейся перед входной щелью монохроматора. Свет лампы прерывался модулятором с частотой 500 Гц, а фототок регистрировался в режиме синхронного детектирования.

Результаты и обсуждение

В процессе ИЛО проводилась регистрация отражения плёнок Ge:Sb на подложках Ge и GaAs и её результаты приведены на рис. 1. Видно, что с началом действия лазерного импульса длительностью τ_p = 80 нс резко возрастает отражение плёнки от первоначального уровня, соответствующего аморфному состоянию (R ~ 40% на λ = 1.06 мкм), до повышенных значений (R ~ 60–75%), соответствующих расплавленному Ge. Длительность фазы расплава (τ_m), определяемая на полувысоте каждой кривой, приведена на рисунке. Спад отражения до

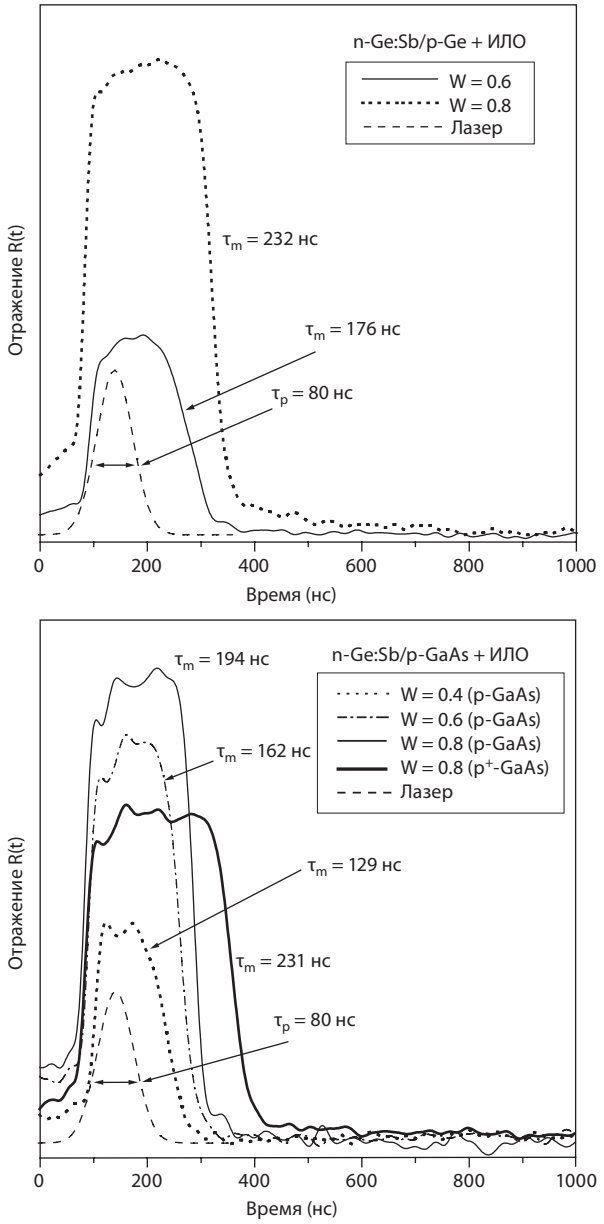


Рис. 1. Осциллограммы отражения $R(t)$ на длине волны λ = 1.06 мкм для образцов n-Ge:Sb/p-Ge (**а**) и n-Ge:Sb/p-GaAs (**б**) в процессе ИЛО с указанной плотностью энергии (W). Приведены значения длительности расплава на полувысоте для каждой кривой и временная форма лазерного импульса.

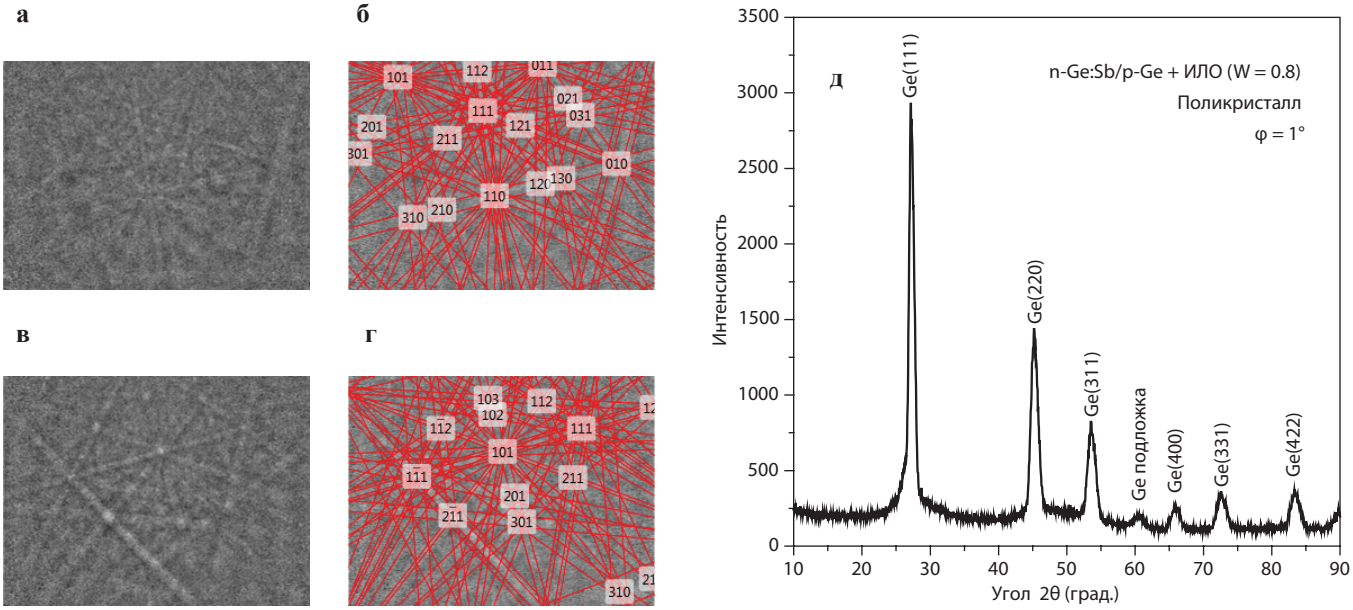


Рис. 2. Картины Кикучи-линий, полученные методом ДОЭ (**а**, **в**) и их автоматическое индексирование (**б**, **г**) для двух участков образца n-Ge:Sb/p-Ge после ИЛО (W = 0.8 Дж/см^2). Спектр РДСЛ этого же образца, снятый при угле падения φ = 1° с шагом 0.05° (**д**).

первоначальных значений обусловлен кристаллизацией плёнки. С ростом плотности энергии импульсов растёт как величина отражения на фазе расплава, так и время жизни самого расплава, что связано с ростом его толщины вглубь плёнки.

Интересно отметить, что величина τ_m плёнки Ge:Sb на подложке p-Ge (рис. 1а) при указанных плотностях энергии превышает таковую для плёнки на подложке p-GaAs (рис. 1б), что может быть связано с более низкой теплопроводностью кристаллического Ge (k = 0.6 Вт/см град при 300 К) в сравнении с кристаллом GaAs (k = 1.54 Вт/см град) [9], а также тепловым сопротивлением на границе плёнка/подложка, например ввиду присутствия окисной плёнки на p-Ge. Кроме того, из сравнения данных τ_m для слабо- и сильно легированных подложек p-GaAs (рис. 1б) видно возрастание величины τ_m на подложке p^+-GaAs для ИЛО с W = 0.8 Дж/см^2, что свидетельствует о более низкой теплопроводности сильно легированной подложки [10].

После проведённой ИЛО с помощью СЭМ были изучены элементный состав и морфология поверхности плёнки. Анализ состава исходной плёнки не обнаружил следов сурьмы (Sb), что говорит о её содержании ниже предела чувствительности метода (~0.5 ат.%). Морфология плёнки после осаждения была гладкой и однородной, без каких-либо структурных особенностей. После ИЛО с W = 0.8 Дж/см^2 морфология плёнки Ge:Sb на подложке p-Ge приобретает мелкозернистую структуру (размеры зёрен 0.15–0.3 мкм), с отдельными местами испарения плёнки до подложки. В то же время ИИО сопровождается образованием более крупных зёрен (0.5–1.5 мкм). Различия в морфологии плёнок, вероятно, связаны с различным характером выделения энергии лазерных и ионных пучков в веществе. При ИЛО интенсивность поглощаемой энергии лазерного излучения спадает вглубь плёнки по экспоненциальному закону Бугера-Ламберта с максимальным выделением вблизи поверхности. Это способствует перегреву и частичному испарению плёнки.

В случае ИИО максимум поглощения энергии ионов приходится на глубинные области плёнки и подложки, соответствующие длине торможения ионов C^+ и H^+. Оценка длины пробега этих ионов в Ge с энергией E = 300 кэВ по программе SRIM-2006 даёт значения R_p ~ 0.5 и 2.3 мкм, соответственно. Таким образом, градиент температуры при ИИО значительно меньше, а распределение температуры по глубине более однородное, что препятствует перегреву и испарению плёнки.

С помощью методов ДОЭ и РДСЛ была изучена кристалличность плёнок Ge:Sb после импульсных воздействий. Измерения на отожжённых образцах проводились в двух соседних точках для сравнения получаемых картин. На рис. 2 приведены результаты воздействия ИЛО на образец n-Ge:Sb/p-Ge в виде картин Кикучи-линий (а, в), их автоматического индексирования (б, г), а также рентгенограммы, снятой при угле падения φ = 1° (д). Видно, что картины Кикучи-линий и их индексы различаются. Их наличие говорит о кристаллизации плёнки в целом, а их отличие свидетельствует о различной ориентации зёрен в разных точках образца, т.е. о поликристаллической природе плёнок. Дополнительным подтверждением поликристаллической структуры плёнки Ge:Sb после ИЛО являются её спектр РДСЛ (рис. 2д). Он характеризуется серией интенсивных дифракционных пиков, соотношение интенсивностей которых совпадает с порошковыми образцами. На их фоне виден слабый

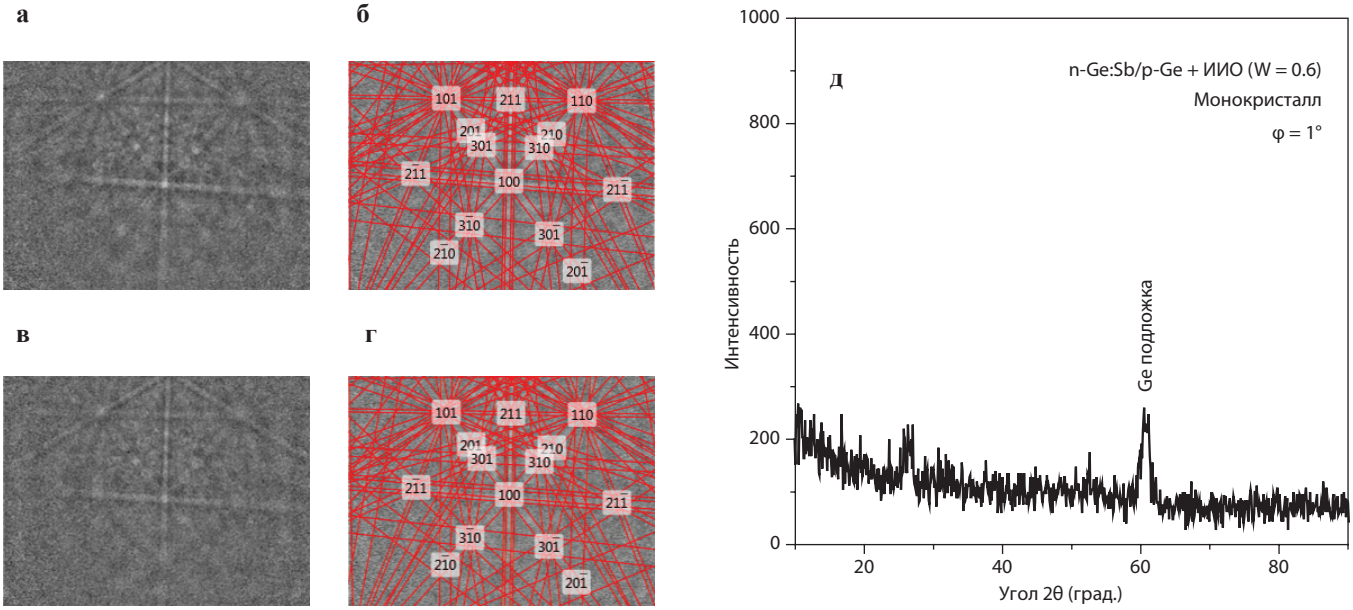


Рис. 3. Картины Кикучи-линий, полученные методом ДОЭ (**а**, **в**) и их автоматическое индексирование (**б**, **г**) для двух участков образца n-Ge:Sb/p-Ge после ИИО (W = 0.6 Дж/см^2). Спектр РДСЛ этого же образца, снятый при угле падения φ = 1° с шагом 0.05° (**д**).

вклад от Ge-подложки при 2θ ~ 61°. Оценка деформации растяжения в плёнке по дальним пикам Ge(331) и Ge(422) даёт величину ε = 0.17%. Вероятной причиной образования поликристаллической плёнки при ИЛО (для толщины плёнки d ~ 270 нм) является неполное плавление плёнки и отсутствие плавления нижележащей Ge-подложки, которое могло бы быть затравкой для эпитаксиального роста плёнки. Оценка глубины проникновения света в аморфный Ge на длине волны лазера $l = \alpha^{-1} = 1/7 \cdot 10^4$ см$^{-1}$ = 140 нм, а также оценка глубины расплава при данной энергии импульса h ~ 200 нм подтверждают этот факт. Дальнейший рост энергии импульса приводит к повреждению поверхности плёнки и её частичному испарению.

Наряду с ИЛО изучалась кристаллизация плёнки Ge:Sb при ИИО. На рис. 3 приведены результаты измерений кристалличности плёнок методами ДОЭ и РДСЛ в двух участках образца. Видно, что обе картины Кикучи-линий

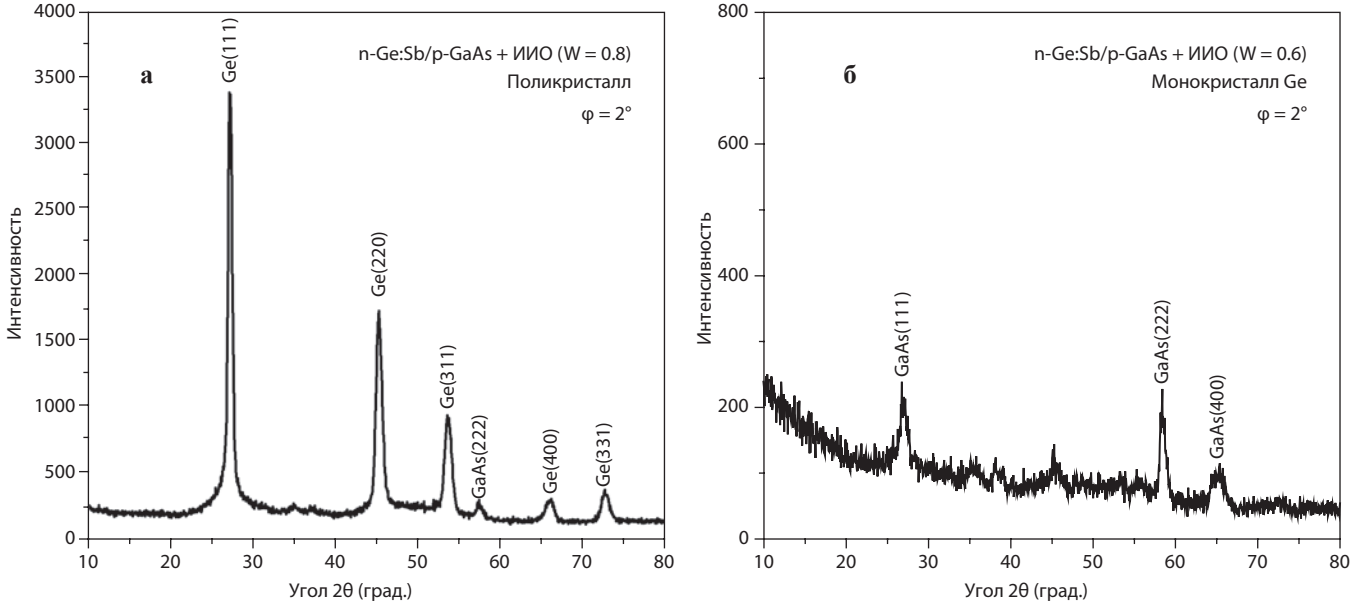


Рис. 4. Спектры РДСЛ, снятые при угле падения φ = 2° с шагом 0.05° от плёнки Ge:Sb на подложке p-GaAs после ИЛО с W = 0.8 Дж/см^2 (**а**), после ИИО с W = 0.6 Дж/см^2 (**б**).

Таблица 1. Электрические параметры образцов n-Ge:Sb/p-Ge и n-Ge:Sb/p-GaAs после ИИО с W = 0.8 Дж/см^2. В скобках для сравнения указаны значения ρ_s после ИЛО с W = 0.8 Дж/см^2.

	n^+-Ge:Sb/p-Ge	n^+-Ge:Sb/p-GaAs
Слоевое сопротивление, ρ_s (Ом/кв.)	9.2(240)	98(610)
Слоевая концентрация электронов, N_s (см$^{-2}$)	$2.8 \cdot 10^{15}$	$1.5 \cdot 10^{15}$
Объёмная концентрация электронов, N_e (см$^{-3}$) для толщины слоя d = 270 нм	$1 \cdot 10^{20}$	$5.6 \cdot 10^{19}$
Подвижность электронов, μ_e (см^2/В$\cdot$с)	251	42

и их индексирование идентичны друг другу, что говорит об упорядоченности плёнки в разных её участках после такого отжига. В спектре РДСЛ отсутствуют дифракционные пики от плёнки Ge:Sb, видны лишь слабые пики от Ge-подложки. При этом плёнка не испарилась, поскольку электрические измерения фиксируют её наличие. Отсутствие характерных пиков от плёнки свидетельствует о её монокристаллической структуре, которая не фиксируется в режиме скользящего падения при углах φ = 1–3°, оптимального для порошковых (поликристаллических) образцов.

В случае осаждения плёнки Ge:Sb на структурно-близкую подложку p-GaAs(111) с последующей ИЛО также имеет место образование поликристаллической плёнки (рис. 4а). При этом величина растяжения, оценённая по сдвигу пика Ge(331), составляет ε = 0.16%. При ИИО также образуется монокристаллическая плёнка Ge:Sb, о чём свидетельствует отсутствие интенсивных дифракционных пиков Ge и наличие слабых пиков от подложки (рис. 4б).

Исследования фотолюминесценции сформированных монокристаллических слоёв Ge:Sb на подложках Ge и GaAs не показали ощутимого сигнала в области 1.5–1.8 мкм. Отсутствие сигнала может быть связано с повышенной (неоптимальной) концентрацией примеси Sb ($N \sim 10^{20}$ см$^{-3}$) и остаточной точечной дефектностью плёнок, приводящих к повышенной безызлучательной рекомбинации носителей. Требуется дальнейшая работа по оптимизации уровня легирования и уменьшения точечных дефектов в плёнках, например с помощью дополнительного термического отжига.

Далее перейдем к изучению электрических свойств плёнок n^+-Ge:Sb на подложках p-Ge и p-GaAs. Измерения слоевого сопротивления (ρ_s) и слоевой концентрации электронов проводимости (N_s) проводились при 300 К в конфигурации Ван-дер-Пау, т.е. металлические зонды располагались по краям облучённых зон. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Как и ожидалось, наименьшие значения сопротивления и наибольшие значения концентрации и подвижности носителей (для одинаковой введенной концентрации донорной примеси $N_{Sb} \sim 10^{20}$ см$^{-3}$) получены для монокристаллических слоёв n^+-Ge:Sb на подложке p-Ge после ИИО. Это связано с высокой концентрацией примесных атомов Sb в положении замещения (до 100%) и меньшим рассеянием носителей на границах зёрен. По сравнению

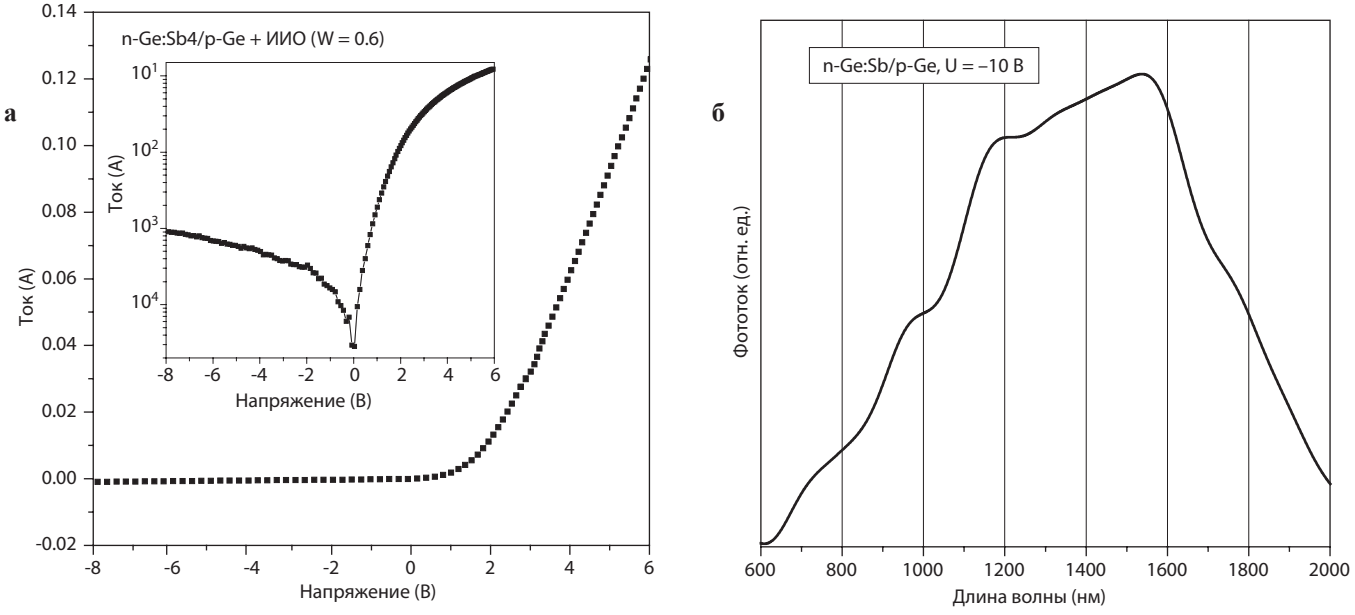


Рис. 5. а Вольт-амперная характеристика меза-диодной структуры n^+-Ge:Sb/p-Ge в линейном и полулогарифмическом (вставка) масштабах. **б** Спектр фототока меза-диодной структуры n^+-Ge:Sb/p-Ge при подаче обратного смещения 10 В.

с подложкой p-Ge, плёнки на подложке p-GaAs после ИИО имеют худшие показатели, что вероятно связано с влиянием акцепторной примеси Ga, которая может проникать в плёнку Ge:Sb в процессе жидкофазной диффузии и ухудшать её параметры. Эффект ИЛО на электрические параметры слоёв дан значениями ρ_s, приведёнными в скобках. Повышенные значения ρ_s связаны с поликристаллической структурой слоёв, где высоко рассеяние носителей на многочисленных границах зёрен.

На основе полученных в результате воздействия ИИО монокристаллических слоёв n^+-Ge:Sb/p-Ge были изготовлены меза-диодные структуры с площадью 1 мм^2 путём химического травления, на которых затем были получены вольт-амперные характеристики (ВАХ) (рис. 5а). В прямой ветви ВАХ виден резкий рост тока (до 120 мА при +6 В) и малый ток в её обратной ветви (до 1 мА при –8 В). Оценка фактора идеальности диода (n), полученная путём подгонки ВАХ на участке V от 0 до +0.5 В уравнением Шокли вида:

$$I = I_0\left(\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right)-1\right),$$

где, I – ток диода, I_0 – обратный ток насыщения, e – заряд электрона, V – напряжение, k – постоянная Больцмана, T – температура (300 К), даёт значения n = 4.1.

На заключительном этапе работы были измерены спектры фотопроводимости (ФП) на базе полученной диодной меза-структуры n^+-Ge:Sb/p-Ge (N_{Sb} ~ 10^{20} см$^{-3}$, ε = 0.16%) путём подачи на неё обратного смещения V = 10 В. На рис. 5б показан спектр ФП, полученный при освещении образца светом галогенной лампы (100 Вт). Видно, что рост фототока наблюдается в области λ = 600–1550 нм с последующим спадом до фоновых значений при 2000 нм. В целом данный спектр ФП согласуется с известными кривыми фоточувствительности Ge. Максимум фототока при 1.55 мкм согласуется с шириной энергетической щели в прямой Γ-долине (~ 0.8 эВ), а спад фототока обусловлен понижением коэффициента поглощения в области 1.6–2.0 мкм. Интересно, что в отличие от литературных значений для напряжённого (до 0.76%) и сильно легированного (до 10^{19} см$^{-3}$) Ge (λ_e ~ 1.83 мкм) [6], край фоточувствительности нашей слабо растянутой (до 0.16%), но значительно более сильно легированной (до 10^{20} см$^{-3}$) плёнки Ge:Sb приходится на более длинноволновые значения (λ_e ~ 2 мкм) вследствие сужения запрещённой зоны с уровнем легирования [11]. Таким образом, сильное легирование Ge (до 10^{20} см$^{-3}$) позволяет расширить диапазон его фоточувствительности.

Заключение

С использованием ионно-лучевого распыления в вакууме композитной мишени Sb/Ge с последующей импульсной обработкой аморфных слоёв мощными ионными или лазерными пучками получены растянуто-напряжённые (~0.17%) и сильно легированные (до 10^{20} см$^{-3}$) поли- и монокристаллические слои n-Ge:Sb на идентичных (p-Ge) или структурно-близких (p-GaAs) подложках. Установлена зависимость времени существования расплава от режимов импульсных воздействий, теплопроводности подложек и уровня их легирования. Определены оптимальные режимы обработок, приводящие к созданию эпитаксиальных слоёв Ge:Sb/Ge и Ge:Sb/GaAs. Изучена зависимость электрических параметров сформированных слоёв от режимов импульсных воздействий. Получена вольт-амперная характеристика меза-диодной структуры n^+-Ge:Sb/p-Ge и спектр её фотопроводимости. Установлено расширение области фоточувствительности до 2 мкм.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №16-52-00021 совместно с сотрудником Белорусского государственного университета (Минск) Ивлевым Г.Д. Измерения на микроскопе Merlin (Carl Zeiss) проводились в междисциплинарном центре “Аналитическая микроскопия” при КФУ.

Литература

1. http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/47301.wss
2. Claeys C. and Simoen E.: Germanium-based technologies. From Materials to Devices. Elsevier: Amsterdam 2007. 476 p.
3. Liu J., Kimerling L.C., Michel J.: Semicond. Sci. Technol. **27**, 094006(1-13) (2012)
4. Sun X., Liu J.F., Kimerling L.C., Michel J.: Opt. Lett. **34**, 1198–1200 (2009)
5. Schmid M., Oehme M., Gollhofer M., Korner R., Kaschel M., Kasper E., Schulze J.: Thin Solid Films **557**, 351–354 (2014)
6. Nam D., Sukhdeo D., Roy A., Balram K., Cheng S.-L., Huang K.C.-Y., Yuan Z., Brongersma M., Nishi Y., Miller D., Saraswat K.: Opt. Express. **19**, 25866–25872 (2011)
7. Новиков Г.А., Баталов Р.И., Баязитов Р.М. и др.: ФТП. **49**, 746–752 (2015)
8. Batalov R.I., Bayazitov R.M., Faizrakhmanov I.A., Lyadov N.M., Shustov V.A., Ivlev G.D.: J. Phys. D: Appl. Phys. **49**, 395102(1-7) (2016)
9. Коллектив авторов. Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник. Наука: Москва 1978. 340 с.
10. Blakemore J.S.: J. Appl. Phys. **53**, R123–R181 (1982)
11. Camacho-Aguilera R., Han Z., Cai Y., Kimerling L.C., Michel J.: Appl. Phys. Lett. **102**, 152106(1-3) (2013)

Исследование методом ЭПР особенностей обмена железа у профессиональных спортсменов

М. И. Ибрагимова, А. И. Чушников, В. Ю. Петухов

Отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной химии и радиобиологии

Методом ЭПР-спектроскопии с учётом данных биохимического анализа был изучен процесс обмена железа в сыворотке крови профессиональных спортсменов из континентальной хоккейной лиги. В результате исследования более чем 100 образцов сыворотки крови было показано, что метод ЭПР-спектроскопии даёт возможность выявлять механизмы нарушений в обмене железа при его избыточном накоплении в организме при интенсивных физических нагрузках. Результаты таких исследований могут найти эффективное применение в спорте высоких достижений, поскольку позволят сделать правильный выбор в назначении препаратов, корректирующих уровень железа в организме.

Введение

Хорошо известно, что железо играет чрезвычайно важную физиологическую роль в жизнеобеспечении организма, поэтому нарушения в его обмене, в частности у спортсменов, могут приводить к существенным негативным последствиям как для нормального функционирования организма, в целом, так и для достижения высоких профессиональных результатов в спорте высоких достижений.

Плазма крови человека содержит около 2.5 мг негемового железа, которое, при нормальном функционировании организма, в трёхвалентном состоянии обратимо связано с транспортным белком – трансферрином (Fe^{3+}-ТФ). Этот комплекс обеспечивает транспорт железа по всему организму, а также предупреждает накопление токсичных ионов в сыворотке крови. Молекула апо-ТФ состоит из одной полипептидной цепочки, у которой имеются два неэквивалентных центра для связывания парамагнитных ионов Fe^{3+}. Считается, что в состоянии нормы молекулы ТФ насыщены железом примерно на 30–40% от их максимальной возможности. При перенасыщении ТФ ионами Fe^{3+} выше 50% в плазме крови может содержаться железо, не связанное с трансферрином (см., например, [1, 2]). Согласно литературным данным, такое нарушение обмена железа характерно, в основном, только для больных со специфической патологией.

В клинической медицинской практике контроль обмена железа обычно включает биохимическое исследование таких показателей крови, как концентрация сывороточного железа (КСЖ), общая железосвязывающая способность сыворотки крови (ОЖСС), концентрация ТФ и ферритина. Однако биохимические показатели не дают количественную информацию о концентрации ионов железа, переносимых ТФ в сыворотке крови, в то время как метод ЭПР позволяет оценить количество парамагнитных ионов Fe^{3+} в составе молекулы ТФ. Поэтому сопоставление результатов ЭПР-спектроскопии с данными рутинного биохимического анализа представляет значительный интерес как с фундаментальной, так и с практической точек зрения, что позволит эффективно использовать метод ЭПР-спектроскопии в спортивной медицине для контроля обмена железа у профессиональных спортсменов.

Методика эксперимента

Объектом исследования являлись образцы сыворотки крови, полученные по стандартной методике центрифугированием венозной крови при комнатной температуре на центрифуге ЦЛК-1 в течение 10 мин со скоростью 1500 оборотов/мин.

Группа профессиональных спортсменов из четырёх команд континентальной хоккейной лиги состояла из 115 человек в возрасте 25 ± 8 лет. Произвольно выбранная контрольная группа (15 чел.) включала как больных находящихся на лечении в ГАУЗ РКБ №2 МЗ РТ (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.

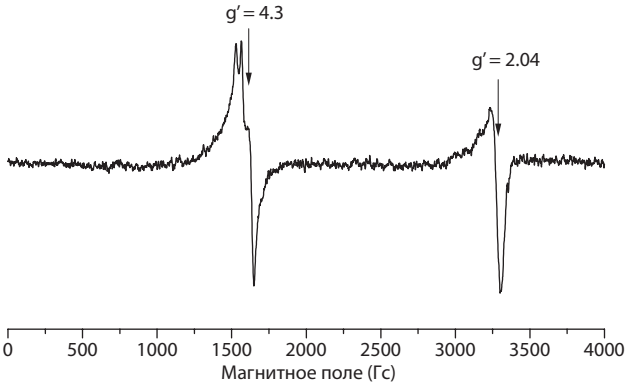


Рис. 1. Типичный спектр ЭПР сыворотки крови при 77 K на частоте ~9.3 ГГц.

Спектры ЭПР записывали от одинакового объёма сыворотки крови на спектрометре Varian E-12 (ν = 9.38 ГГц, W = 50 мВт, T = 77 К). На рис. 1 приведён типичный для X-диапазона спектр ЭПР сыворотки крови при температуре жидкого азота, в котором при нормальном функционировании организма регистрируются линии поглощения от ионов Fe^{3+} в составе ТФ и Cu^{2+}, входящих в состав другого белка – церулоплазмина (Cu^{2+}-ЦП).

Как видно из рисунка, линия поглощения с $g' = 4.3$ от Fe^{3+} в составе ТФ имеет сложную форму с достаточно широкими крыльями. Такая линия, согласно работам (см., например, [3–5]), хорошо описывается спиновым гамильтонианом:

$$\boldsymbol{H} = g\beta\mathbf{B}\times\hat{\mathrm{S}} + \mathrm{D}[\hat{\mathrm{S}}_z^2 - \mathrm{S}(\mathrm{S}+1)/3] + \mathrm{E}(\hat{\mathrm{S}}_x^2 - \hat{\mathrm{S}}_y^2),$$

где $S = 5/2$, $g = 2$ – g-фактор электрона, β – магнетон Бора, D и E – константы аксиального и ромбического расщепления в нулевом поле, соответственно, **B** – величина приложенного магнитного поля, $\hat{\mathrm{S}}_i$ ($i = x, y, z$) – операторы спинового углового момента. Проведённые расчёты показали, что особенности спектра при $g' = 4.3$ для высокоспинового состояния с $S = 5/2$ обусловлены, главным образом, переходами в пределах среднего крамерсовского дублета (3 → 4). При этом, когда величина E/D = 1/3, т.е. при наличии полной ромбической симметрии, регистрируется одиночная линия с $g' = 4.3$, тогда как даже при небольших отклонениях от ромбичности (E/D ≤ 1/3) в спектре наблюдается проявление тонкой структуры. Таким образом, характерная для Fe^{3+} в составе ТФ форма линии является свидетельством наличия небольшой доли аксиальности в лигандном поле иона.

Линию поглощения с $g' = 2.04$, регистрируемую в плазме крови в высокополевой части спектра ЭПР, обычно идентифицируют как сигнал от ионов Cu^{2+} в составе медьсодержащего гликопротеида ЦП [6–8]. При этом считается, что в состав активного центра молекулы ЦП входят 7 ионов меди, только три из которых обладают парамагнитными свойствами. Как было ранее установлено в работе [8], существует линейная зависимость между концентрацией парамагнитных ионов меди, полученной из спектров ЭПР, и общей концентрацией ЦП, определённой биохимическим методом. Следует отметить, что среди прочих свойств этот белок обладает ферроксидазной активностью и способствует окислению ионов железа от Fe^{2+} до Fe^{3+}, который и встраивается в апо-ТФ. Это свойство ЦП является необходим условием для поддержания нормального уровня окисленного железа в плазме крови [9].

В рамках данной работы, для проведения количественной обработки спектров, полученных на спектрометре Varian E-12, одновременно регистрировали сигнал поглощения от эталонного образца (антрацита) с известными g-фактором и количеством парамагнитных центров. Поскольку ширина и форма линий в спектрах ЭПР не изменялись, количественный анализ спектров проводили по результатам измерения интенсивности производной от линии поглощения, нормированной относительно сигнала от эталона.

Биохимические показатели, такие как КСЖ и ОЖСС, определяли на анализаторе Cobas integra 400 plus.

Определение КСЖ заключается в измерении оптической плотности окрашенных комплексов, образовавшихся в результате высвобождения Fe^{3+} из железосвязывающих белков сыворотки в кислой среде с последующим химическим восстановлением ионов Fe^{3+} до Fe^{2+} и дальнейшей реакцией ионов двухвалентного железа с хромогенами. Величина КСЖ измерялась методом абсорбционной фотометрии с использованием феррозина в качестве химического реагента по протоколу производителя.

Величина ОЖСС показывает способность ТФ связывать свободное железо. Биохимическое определение ОЖСС заключается в том, что в исследуемую сыворотку добавляют избыточное количество железа. Считается, что часть железа связывается с трансферрином, в то время как железо, которое не связалось с белками, удаляют и определяют его количество. По полученным результатам делают вывод о величине ОЖСС.

Результаты исследований

На рис. 2 представлены результаты проведённых исследований, иллюстрирующие соотношение между КСЖ, измеренной методом абсорбционной фотометрии, и концентрацией Fe^{3+} в ТФ, определённой из спектров ЭПР, в сыворотке крови спортсменов (из 4-х различных команд) и волонтеров из группы контроля. Как видно из рисунка, для группы контроля данные, полученные обоими методами, хорошо коррелируют между собой (коэффициент корреляции по Пирсону очень высокий и

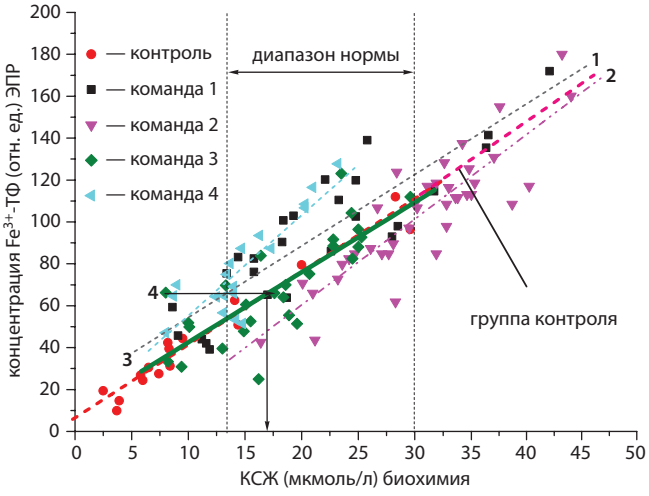


Рис. 2. Соотношение между КСЖ и концентрацией Fe^{3+} в ТФ в сыворотке крови спортсменов из 4-х различных команд и волонтёров из группы контроля. В качестве примера стрелками показаны данные, иллюстрирующие тот факт, что биохимические показатели у спортсменов могут быть более чем в 2 раза занижены относительно истинной концентрации ионов железа, связанных с ТФ.

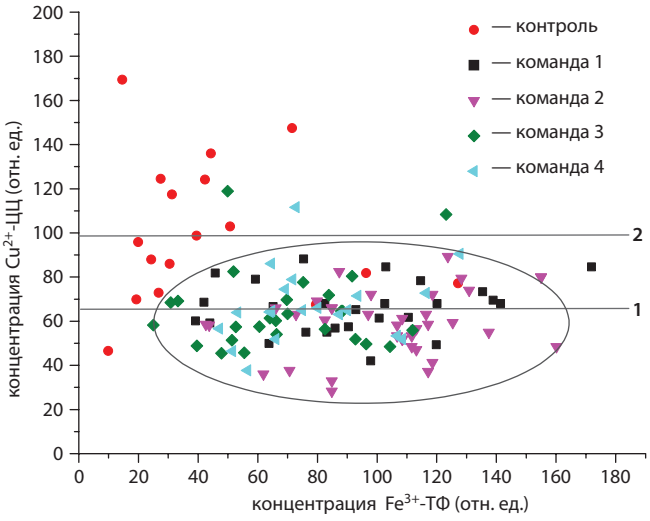


Рис. 3. Соотношение между концентрациями Fe^{3+}-ТФ и Cu^{2+}-ЦП в сыворотке крови спортсменов и волонтёров из группы контроля. Линия 1 и 2 – средние значения уровня Cu^{2+}-ЦП, равные соответственно, 63 ± 15 отн.ед. и 100 ± 32 отн.ед.

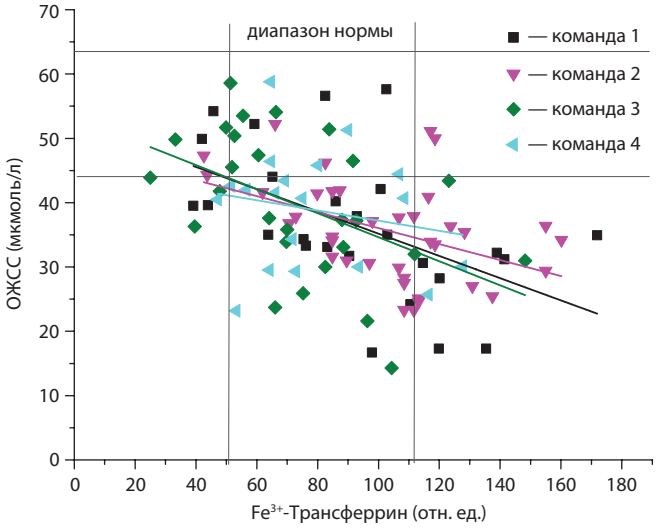


Рис. 4. Соотношение между ОЖСС и концентрацией Fe^{3+}-ТФ в сыворотке крови спортсменов (из 4-х различных команд). Сплошные линии – результат линейной аппроксимации.

равен $r = 0.97$) и аппроксимируются прямой линией ($y = 3.49x + 3.4$). Полученные результаты свидетельствуют о том, что в группе, в которую были включены как больные с различным диагнозом, так и условно здоровые люди без учёта их возраста и пола, все железо сыворотки крови входит в состав ТФ.

В то же время для спортсменов корреляция между данными ЭПР-спектроскопии и биохимического анализа значительно ниже ($r_{cp} \cong 0.81$) даже с учётом точности измерений обоими методами (± 5%). При этом, как видно из рисунка, существует явная зависимость положения аппроксимирующих прямых (1–4) от принадлежности спортсменов к той или иной команде: прямые либо проходят выше (1, 4), либо ниже (2), либо совпадают (3) с аппроксимирующей прямой для группы контроля. Существующие различия свидетельствуют, по всей видимости, о наличии общих факторов, характерных для команды спортсменов, в целом.

Следует отметить, что для ~20% спортсменов величина КСЖ, определённая биохимическим способом, находится выше верхней границы нормы для мужчин, что согласуется и с данными ЭПР-спектроскопии. Этот факт является явным показателем избыточного содержания железа в крови спортсменов.

Соотношение между концентрациями Fe^{3+} в ТФ и Cu^{2+} в ЦП в сыворотке крови спортсменов и волонтёров из группы сравнения показано на рис. 3. Если у спортсменов среднее значение концентрации Cu^{2+}-ЦП и его стандартное отклонение составляют 63 ± 15 отн. ед., то у волонтёров из группы контроля эти значения существенно выше (100 ± 32 отн.ед.). Полученные данные свидетельствуют, во-первых, о том, что для спортсменов, в большинстве случаев, отсутствуют повреждения тканей и наличие инфекций, поскольку ЦП является белком острой фазы, тогда как для больных из группы контроля характерно наличие воспалительного процесса в организме (высокие значения ЦП). Во-вторых, для спортсменов не выявлено зависимости концентрации Cu^{2+}-ЦП от уровня Fe^{3+} в ТФ, что является показателем того, что уровень ферроксидазной активности ЦП находится в пределах нормы.

На рис. 4 приведено соотношение между ОЖСС и концентрацией Fe^{3+}-ТФ в сыворотке крови спортсменов. Сплошные линии на рисунке – это результат линейной аппроксимации для спортсменов из 4-х различных команд. Положения аппроксимирующих прямых в данном случае практически не зависят от принадлежности спортсменов к той или иной команде. Как видно из рисунка, приблизительно у 75% спортсменов, уровень ОЖСС, не достигает нижней границы нормы. Это является признаком избыточного накопления железа в организме. Известно, что к снижению ОЖСС приводит, в частности, приём тестостерона, а также препаратов, содержащих ионы железа.

Обсуждение результатов

Заниженные значения КСЖ у спортсменов по сравнению с данными ЭПР мы связываем с тем, что в результате биохимической реакции не всегда происходит полное высвобождение ионов Fe^{3+} из ТФ. Можно было бы предположить, что при высоком уровне насыщения ТФ ионами Fe^{3+} происходят изменения в ближайшем окружении этих парамагнитных ионов, однако метод ЭПР не выявил изменений формы линии для Fe^{3+}-ТФ.

Занижение величины КСЖ, полученной биохимическим методом, относительно истинной концентрации ионов Fe^{3+}-ТФ в профессиональном спорте может приводить к существенным негативным последствиям, и прежде всего,

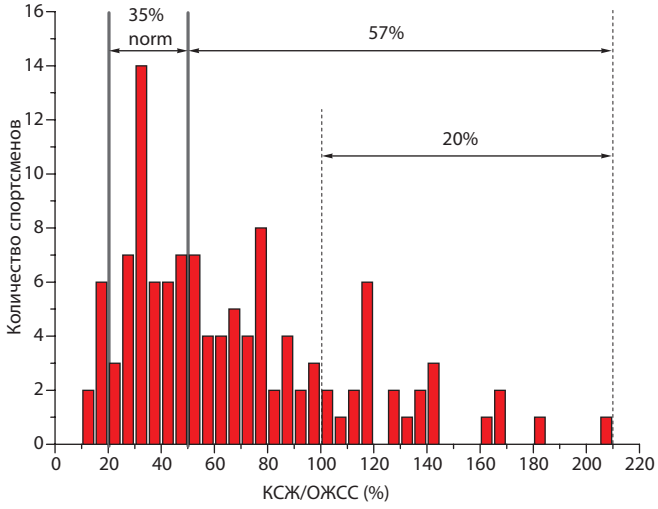


Рис. 5. Гистограмма, иллюстрирующая процент насыщения ТФ у спортсменов (по данным биохимического анализа).

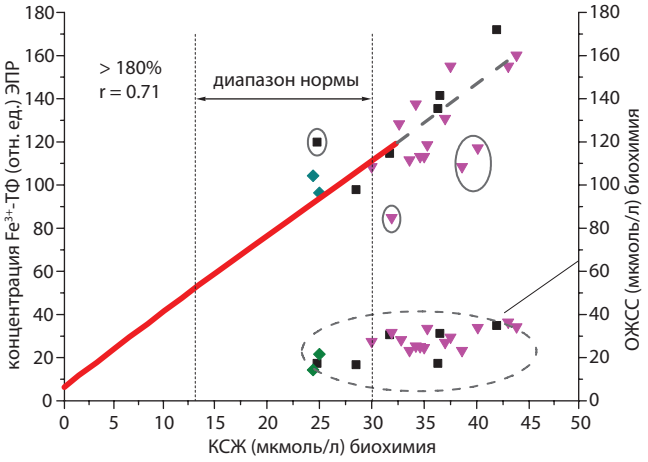


Рис. 6. Соотношение между КСЖ (ОЖСС) и концентрацией Fe^{3+}-ТФ в сыворотке крови спортсменов при величине отношения КСЖ/ОЖСС*100%, превышающей 100%. Величина ОЖСС у всех спортсменов ниже нормы.

для спортсменов, у которых согласно данным биохимического анализа, значения КСЖ не достигают нижней границы установленной нормы. В качестве примера, на рис. 1 стрелками показаны данные, иллюстрирующие тот факт, что у спортсменов концентрация сывороточного железа, определённая биохимическим методом, может быть более чем в 2 раза занижена относительно истинной концентрации ионов железа, связанного с ТФ. В таких случаях назначение препаратов повышающих уровень железа, основанных только на данных биохимического анализа, является не только нецелесообразным, но и может привести к серьёзным негативным последствиям.

Причиной завышенных значений КСЖ может быть наличие в сыворотке крови ионов железа, не связанного с ТФ.

Для оценки процента насыщения трансферрина железом в биологической химии используют стандартизованную величину процентного отношения КСЖ к ОЖСС. Считается, что в состоянии нормы молекула ТФ насыщена железом примерно на 30–40% его максимальной возможности, а при его величине более 50% в сыворотке крови будет присутствовать железо, не связанное с ТФ. На рис. 5 приведена гистограмма, иллюстрирующая процент насыщения трансферрина железом у спортсменов.

Как видно из гистограммы, максимум насыщения ТФ железом составляет 30%, в то же время для 57% спортсменов ТФ перенасыщен железом. При этом представленная гистограмма наглядно показывает, что для 20% величина КСЖ/ОЖСС превышает 100%, причём именно в тех случаях, когда у спортсменов зарегистрировано высокое значение КСЖ. Понятно, что коэффициент насыщения трансферрина железом не может превышать 100%. Поэтому для анализа данных результатов на рис. 6 приведено соотношение между КСЖ (ОЖСС) и концентрацией Fe^{3+}-ТФ в сыворотке крови спортсменов, для которых величина КСЖ/ОЖСС*100% > 100%.

Из рисунка видно, что корреляция между данными ЭПР-спектроскопии и биохимического анализа удовлетворительная, и коэффициент корреляции $r = 0.71$. Если не принимать в расчёт данные, выделенные на рисунке сплошной линией, то величина r возрастает до 0.88. Полученные данные свидетельствуют о том, что, в целом, основная часть железа сыворотки крови входит в состав ТФ, хотя в ряде случаев величина КСЖ либо завышена, либо занижена относительно данных ЭПР-спектроскопии. Вместе с тем, в любом случае, при высоких значениях КСЖ у спортсменов в сыворотке крови должен быть избыток железа, часть которого не связана с ТФ. Мы предполагаем, что эти ионы, по всей видимости, образуют комплексы с низкомолекулярными соединениями, введенными в сыворотку крови в результате приёма биологически активных препаратов. Этот вывод может объяснить все экспериментальные результаты исследований, приведённые на рис. 2: и в тех случаях, когда величина КСЖ находится в пределах диапазона нормы, и в случае, когда эта величина ниже нижней границы нормы. При этом следует отметить, что такие соединения с железом, в большинстве случаев, не парамагнитны. Данные исследования показывают также, что стандартно используемые измерения ОЖСС не всегда являются корректными в спортивной медицине, поскольку могут давать явно заниженные значения.

Выводы

Таким образом, проведённые исследования дают основание считать, что использование метода ЭПР-спектроскопии в спортивной медицине является обоснованным и перспективным, поскольку эта методика позволяет не только оценить степень нарушений в обмене железа, но и определить механизмы нарушения обмена железа

при его избыточном накоплении в организме, а также сделать правильный выбор используемых биологически активных препаратов.

Литература

1. Brissot P., Ropert M., Lan C.Le., Loréal O.: Biochimica et Biophysica Acta. **1820**, 403–410 (2012)
2. Bresgen N., Eckl P.M.: Biomolecules **5**, 808–847 (2015)
3. Aasa R.: J. Chem. Phys. **52**, no.8, 3919–3930 (1970)
4. Jang A.S., Gaffney B.J.: Byophys. J. **5**, 55–67 (1987)
5. Grady J.K., Manson A.D., Woodworth R.C., Chasteen N.D.: Biochem. J. **309**, 403–410 (1995)
6. Dawson J.H., Dooley D.M., Clark R., Stephens P.J., Gray H.B.: J. Am. Chem. Soc. **101**, 5046–5053 (1979)
7. Musci G., Bonaccorsi di Patti M.C., Calabrese L.: Arch. Biochem. Biophys. **306**, 111–118 (1993)
8. Mailer C., Swartz H.M., Konieczny M., Ambegaonkar S., Moore V.C.: Cancer Res. **34**, 637–642 (1974)
9. Vassiliev V., Harris Z.L., Zatta P.: Brain Res. Rev. **49**, 633–640 (2005)

Магнитные свойства h-$YMnO_3$

Р. М. Ерёмина, Т. П. Гаврилова, И. В. Яцык, Д. В. Мамедов, В. А. Шустов

Лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков; отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии, лаборатория физики углеродных наноструктур и композитных систем

Методом рентгенофлуоресцентного анализа керамики $YMnO_3$ было установлено, что во всём образце соотношение между ионами Y/Mn составляет 1.2, что приводит к изменению валентности части ионов марганца с 3+ на 4+. В результате картина магнитных взаимодействий получается необычайно многогранной. Проведённые нами исследования температурной зависимости магнитной восприимчивости, показали, что в системе наблюдается два фазовых перехода при ~42 и ~70 К. Антиферромагнитные корреляции наблюдаются в широком температурном диапазоне согласно зависимости намагниченности от магнитного поля. В спектре магнитного резонанса наблюдаются линии от парамагнитных, ферромагнитных и антиферромагнитных областей, что свидетельствует о сильном фазовом расслоении в керамике $YMnO_3$.

Введение

Манганиты с малыми ионными радиусами (Re = Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y и Sc) кристаллизуются в пространственную гексагональную группу $P63cm$ [1]. Гексагональные манганиты $RMnO_3$ (Sc, Y, In, и Dy-Lu) являются мультиферроиками, где механизм сегнетоэлектричества обусловлен геометрическими причинами. Дополнительный интерес к этому классу материалов возник из-за сообщения о наблюдении вихреподобных сегнетоэлектрических доменных структур [2]. Вокруг ядра вихря формируются узоры из шести доменов, знак поляризации меняется шесть раз. В гексагональном $YMnO_3$ соединении наблюдаются два перехода, при 900 К сегнетоэлектрическое, а при ~70 К антиферромагнитное упорядочения [3]. В литературе отмечается, что соединение $YMnO_3$ может кристаллизоваться в орторомбической фазе [4], пространственная группа *Pnma*. В орторомбическом $YMnO_3$ наблюдаются два фазовых перехода: первый переход в *E*-тип антиферромагнитного упорядочения с температурой Нееля 42 К, а второй сегнетоэлектрический переход при T_C = 30 К [5]. Две аномалии наблюдаются в температурной зависимости намагниченности при T_{N1} = 42 К и T_{N2} = 30 К, вдоль оси *b*, что соответствует магнитным фазовым переходам из парамагнитного в геликоидальное, а затем в антиферромагнитное магнитное упорядочение *E*-типа, взаимодействие между соседними спинами в плоскости антиферромагнитное, а между спинами из соседних плоскостей ферромагнитное [6]. Любое нарушение стехиометрического состава приводит к фазовому расслоению в образце и изменению магнитных свойств. Целью данной работы являлось исследование магнитных свойств нестехиометрической керамики $YMnO_3$.

Эксперимент и обсуждение

Исследуемые образцы изготавливалась по стандартной керамической технологии с предварительным твёрдофазным синтезом. В качестве исходных компонентов использовались порошки оксида иттрия (Y_2O_3), марганца (MnO_2), категории “ЧДА” или выше. Порошок оксида Y_2O_3 предварительно подвергался прокаливанию в течение 5 часов при температуре 900 °С для получения нужной стехиометрии компонентов в соединении. После чего порошки Y_2O_3 и MnO_2 взвешивались и смешивались в количествах, пропорциональных необходимой стехиометрии, затем тщательно перемешивались, прессовались. Далее проводился синтез в следующем режиме: нагрев в течение 8 часов до 1000 °С, выдержка при этой температуре 23 часа и охлаждение вместе с печью. Для гомогенизации и завершения синтеза материал повторно перетирался, прессовался и выдерживался при температуре 1050 °С в течение 30 часов, после этого снова перетирался и прессовался при нагрузке 6.5 тонн в диски требуемого размера. Из-за плохой прессуемости материала при прессовании керамических образцов было необходимо использование парафиновой связки. Спрессованные керамические образцы подвергались окончательному спеканию. Скорости нагрева и охлаждения были небольшими, чтобы избежать растрескивания образцов. Выдержка производилась при температурах: 450 °С в течение 5 часов для удаления связки, и при 1230 °С в течение 20 часов, с последующим медленным охлаждением. Плотность полученных образцов была около 80% от теоретического значения.

Таблица 1. Концентрация элементов в керамике $YMnO_3$ полученная методом рентген флуоресцентного анализа.

Элемент	Mn	Y	K	La	Ca
C [at.%]	45.44	54.43	0.05	0.04	0.04

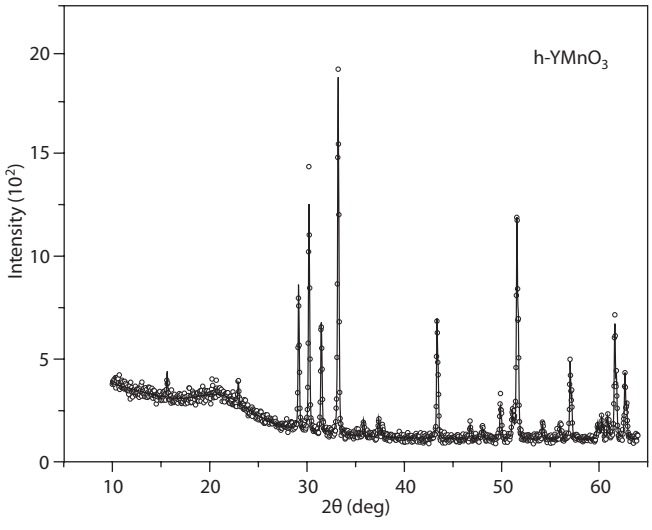


Рис. 1. Дифрактограмма керамики $YMnO_3$ при T = 300 К. Круги – экспериментальные точки, линия – теоретическое описание.

Методом рентген флуоресцентного анализа было установлено процентное соотношение элементов в керамике $YMnO_3$, результаты анализа приведены в таблице 1. Из таблицы видно, что отношение ионов иттербия и марганца составляет: Y/Mn = 54.43/45.44 = 1.2. Исходя из электрической нейтральности образца, можно предположить, что часть ионов марганца меняет валентность с 3+ на 4+, в результате формула имеет вид $Y^{3+}Mn^{3+}_{0.28}Mn^{4+}_{0.54}O_3$. Такое изменение валентности ионов марганца даёт богатые возможности для реализации фазового расслоения в $YMnO_3$.

Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре ДРОН-7 в геометрии Брегга-Брентано (тета-2тета). Излучение CuK_a(CuK_a с бета-фильтром, режим трубки 40 кВ/20 мА). Дифрактограмма сканировалась в диапазоне углов от 10 до 110° с шагом 0.02° и экспозицией в точке 5 сек. Калибровка прибора (аппаратное уширение профилей пиков) проводилась с помощью эталона – отожжённой никелевой фольги (300104-standart).

Рентгеноструктурный анализ, представленный на рис. 1, показывает, что гексагональная структура достаточно хорошо описывает экспериментальную дифрактограмму. Параметры ячейки $a = b$ = 6.1483 Å и c = 11.4432 Å согласуются с литературными данными [7], пространственная группа $P63cm$. Позиции атомов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры кристаллической структуры и позиции атомов в h-$YMnO_3$ образце при T = 300 К.

	x	y	z
Y (2a)	0	0	0.23270
Y (4b)	1/3	2/3	0.2294
Mn	0.323	0	0
O1	0.325	0	0.163
O2	0.629	0	0.338
O3	0	0	0.484
O4	0.3333	0.6667	0.022

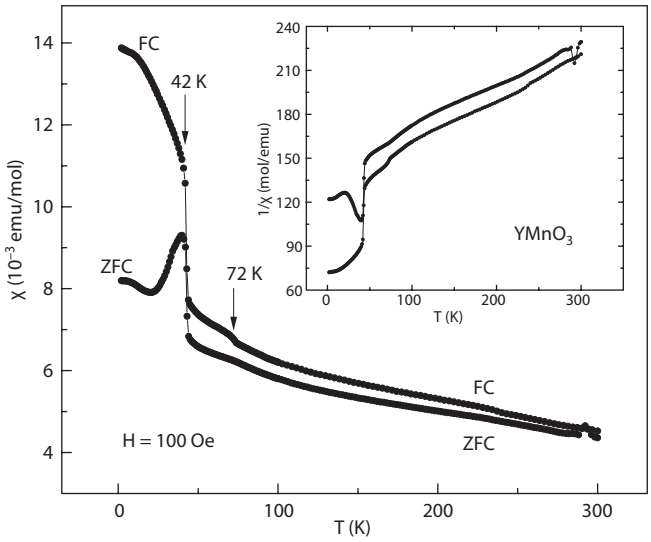


Рис. 2. Температурная зависимость магнитной восприимчивости $YMnO_3$, измеренная в магнитном поле 100 Oe. На вставке показана температурная зависимость обратной магнитной восприимчивости.

Измерения температурной и полевой зависимостей магнитной восприимчивости были проведены на PPMS-9. Температурная зависимость магнитной восприимчивости, измеренная в магнитном поле 100 Э, в широком температурном диапазоне от 2 до 300 К в двух режимах: при охлаждении в нулевом магнитном поле (ZFC) и в магнитном поле (FC) приведена на рис. 2. Ниже 42 К, наблюдается сильное расхождение кривых магнитной восприимчивости, зарегистрированных в режимах FC и ZFC, что говорит о состоянии спинового стекла в данном температурном диапазоне. На температурной зависимости магнитной восприимчивости при температуре 72 К наблюдается излом, согласующийся с температурой антиферромагнитного упорядочения в гексагональном $YMnO_3$, как показано в [3]. При температуре 23 К на

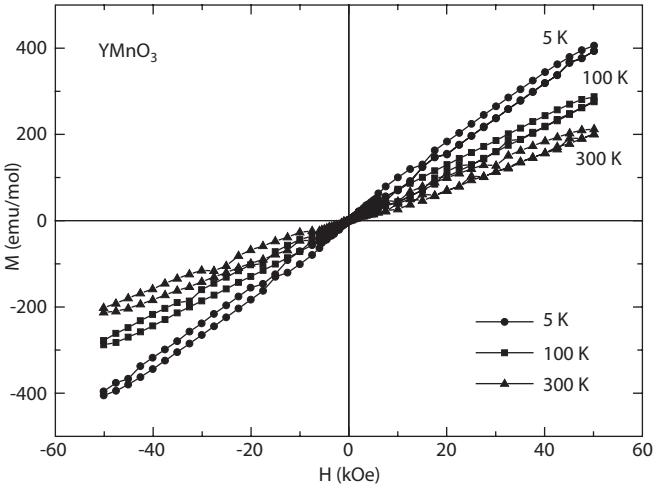


Рис. 3. Зависимость намагниченности от приложенного внешнего магнитного поля в керамике $YMnO_3$.

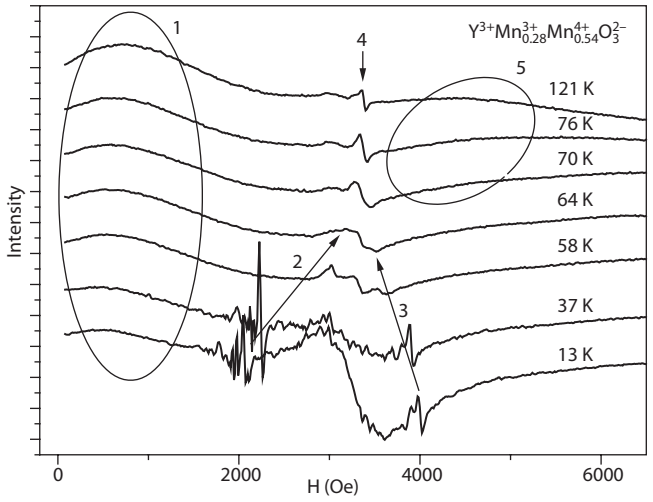


Рис. 4. Эволюция спектров магнитного резонанса от температуры в керамике $YMnO_3$ на частоте 9.4 ГГц.

кривой ZFC наблюдается излом. При температурах выше 42 К абсолютные значения магнитной восприимчивости в режимах FC и ZFC не совпадают, что говорит об наличие слабой ферромагнитной компоненты в керамике $YMnO_3$. Вместе с этим, зависимости намагниченности исследуемого образца от приложенного внешнего магнитного поля имеют антиферромагнитные петли гистерезиса при температурах 5, 100 и 300 К (рис. 3). Отсюда следует, что области с антиферромагнитными корреляциями со слабым ферромагнетизмом наблюдаются в широком температурном интервале от 42 до 300 К в нестехиометричной керамике $YMnO_3$.

Измерения спектров магнитного резонанса керамики $YMnO_3$ проведены на спектрометре Bruker EMX+ на частоте 9.4 ГГц в температурном диапазоне от 13 до 121 К. На рис. 4 представлена эволюция спектров магнитного резонанса при изменении температуры для керамики $YMnO_3$. В отличие от работы [8], где в спектре магнитного резонанса орторомбической керамики $Y_{1-x}Ca_xMnO_3$ наблюдалась одна обменно суженая линия, в спектре нестехиометричной керамики $YMnO_3$ наблюдается несколько линий различной природы. Так при температуре 13 К обнаружено несколько спектральных линий (см. рис 4): первая линия, наблюдающаяся до комнатной температуры, как мы предполагаем, обусловлена присутствием антиферромагнитно упорядоченных областей в $YMnO_3$, что подтверждается экспериментами по магнитометрии (см. рис. 3). Линии второй и третьей группы, наблюдаются от 13 до 64 К и, вероятно, обусловлены ферромагнитными кластерами с небольшим разбросом поля анизотропии, 4 линия имеет парамагнитную природу.

Рассмотрим зависимость от температуры для каждой группы линий. Первая спектральная линия обладает большой шириной, следовательно, определить резонансное поле является сложной задачей. От 13 до 60 К параметры первой линии не изменяются, выше 60 К ширина линии незначительно уменьшается, а резонансное поле сдвигается в область низких полей. Резонансные поля второй и третьей группы линии от 13 и до 64 К сдвигаются: вторая группа линий перемещается в область высоких полей (стремится к g = 2), а третья группа линий стремиться в область низких полей (стремится к g = 2). При температуре 64 К вторая и третья группа линий накладываются друг на друга. При температуре 70 К зарождается пятая спектральная линия с большой шириной и эффективным значением g-фактора приблизительно около двойки. Ширина линии уменьшается при повышении температуры. Температура появления сигнала совпадает с температурой фазового перехода из антиферромагнитной в парамагнитную фазу [3]. Мы предполагаем, что данный сигнал обусловлен обменно-связанной спиновой системой ионов марганца в парамагнитной области.

Заключение

Проведены исследования магнитных свойств нестихеометричной гексагональной керамики $YMnO_3$ методами магнитного резонанса и магнитометрии. Методом рентген флуоресцентного анализа установлено, что соотношение между Y/Mn = 1.2. В результате в образце наблюдается фазовое расслоение, приводящие к наблюдению в спектре магнитного резонанса одновременно линий антиферромагнитного, ферромагнитного и парамагнитного резонансов.

Мы благодарны И. Ф. Гильмутдинову (К(П)ФУ, Казань) за измерение температурной зависимости магнитной восприимчивости и В. И. Чичкову (МИСиС, Москва) за предоставленные образцы.

Литература

1. Katsufuji T., Mori S., Masaki M., Moritomo Y., Yamamoto N., Takagi H.: Phys. Rev. B **64**, 104419 (2011)
2. Ruff E., Krohns S., Lilienblum M., Meier D., Fiebig M., Lunkenheimer P., Loidl A.: Phys. Rev. Lett. **118**, 036803 (2017)
3. Tomuta T.G., Ramakrishnan S., Nieuwenhuys G.J., Mydosh J.A.: J. Phys.: Condens. Matter **13**, 4543 (2001)
4. N Rao M.N., Kaur N., Chaplot S.L., Gaur N.K., Singh R.K.: J. Phys.: Condens. Matter **21** 355402 (2009)
5. Aguero O., Leyva A.G., Konig P., Vega D., Polla G., Aliaga H., Causa M.T.: Physica B **320** 47 (2002)
6. Okuyama D., Ishiwata S., Takahashi Y., Yamauchi Y., Picozzi S., Sugimoto K., Sakai H., Takata M., Shimano R., Taguchi Y., Arima T., Tokura Y.: Phys. Rev. B **84**, 054440 (2011)
7. Kristin Bergum K., Hiroshi Okamoto H., Helmer Fjellvåg H., Tor Grande T., Mari-Ann Einarsrud M.-A., Sverre M., Selbach S.M.: Electronic Supplementary Material (ESI) for Dalton Transactions © The Royal Society of Chemistry (2011)
8. Causa M.T., Winkler E., Tobıa D., Tovar M.: Physica B **398** 464 (2007)

Высокочастотные спектры ЭПР иона Fe^{2+} в кристаллах синтетического берилла и природного гошенита

Г. С. Шакуров, Р. И. Хайбуллин

Лаборатория радиоспектроскопии диэлектриков; отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной физики

В кристаллах синтетического и природного берилла с примесью железа изучены спектры электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в субмиллиметровом диапазоне волн. Сделан вывод, что наблюдаемые сигналы ЭПР обязаны резонансным переходам иона Fe^{2+} из основного синглетного состояния на возбуждённые уровни дублета. Измеренный энергетический интервал между синглетом и дублетом оказался равным $\Delta = 12.7$ см$^{-1}$. Расчёт значений анизотропного g-фактора и параметров кристаллического поля сделан в рамках спинового гамильтониана ромбической симметрии с эффективным спином $S = 1$. Анализ полученных данных указывает на то, что ионы Fe^{2+} находятся тетраэдрических позициях и замещают катионы Be^{2+} в структуре берилла.

Введение

Кристалл берилла ($Be_3Al_2Si_6O_{18}$) имеет гексагональную симметрию (пр.гр. *P6*/*mcc*) и в его структуре катионы трёхвалентного алюминия окружены кислородными анионами в форме октаэдра, а двухвалентные катионы бериллия и 4-х валентные ионы кремния кислородными тетраэдрами, соответственно. Точечная симметрия позиций катионов: Al^{3+}, Be^{2+} и Si^{4+} – D_3, D_2 и C_s, соответственно. Характерной особенностью кристаллической решётки берилла является наличие в ней структурных каналов, расположенных вдоль оси шестого порядка. В процессе роста бериллов в природе, или в условиях гидротермального синтеза, структурные каналы могут заполняться одиночными молекулами воды. Причём содержание молекулярной воды может достигать 3% от веса кристалла.

Наличие в структуре берилла ионов примеси 3d-элементов обуславливает окрашивание кристаллов в различные цветовые тона [1]. В частности, образцы берилла (гелиодоры), содержащие примесь железа в форме ионов трёхвалентного железа в структурных позициях алюминия, окрашены в жёлтый цвет, а бериллы (аквамарины), содержащие, в основном, ионы двухвалентного железа, окрашены в голубые тона, соответственно. Известна серия работ (см., например, [2–4]), относящихся к ЭПР исследованиям ионов трёхвалентного железа, Fe^{3+}, а также обменно-связанных пар Fe^{3+}-Fe^{3+}, как в кристаллах синтетических, так и природных бериллов. Однако имеется лишь одно сообщение [5] о наблюдении в X- диапазоне сигналов ЭПР ионов двухвалентного железа, Fe^{2+}, локализованных в низко симметричной структурной позиции бериллия и находящихся в возбуждённом состоянии. Заметим, что основным энергетическим уровнем некрамерсового иона Fe^{2+} в кристаллическом поле с низкой симметрией является синглетное по электронному спину состояние, а возбуждённые, 2-х или 3-х кратно вырожденные уровни энергии достаточно далеко от него удалены, чтобы наблюдать на них резонансные переходы методом ЭПР в X- или Q-диапазонах. С этой точки зрения, наиболее удобной для изучения некрамерсовых ионов Fe^{2+} представляется ЭПР спектроскопия субтерагерцового диапазона, когда энергия кванта электромагнитного поля достаточно велика, чтоб наблюдать резонансные переходы с основного на возбуждённые уровни энергии иона Fe^{2+} как в низкосимметричных, так и в высокосимметричных кристаллах [6–9]. В данной работе, впервые, в субмиллиметровом диапазоне длин волн детально исследованы спектры ЭПР ионов Fe^{2+} в кристаллах природного и синтетического берилла и показано влияние молекулярной воды на форму линии наблюдаемых спектров ЭПР.

Эксперимент

В качестве объектов исследования брались три образца бериллов, содержащих примесь железа: образец № 1 – кристалл синтетического берилла голубоватого оттенка, полученный гидротермальным методом [10]; образец № 2 – тот же кристалл, но повергнутый процедуре дегидратации путём высокотемпературного отжига в условиях вакуума при температуре 1000 °C в течение 24 часов; и образец № 3 – кристалл природного бесцветного берилла (гошенита) из месторождений среднего Урала [11, 12]. Согласно рентгеновскому энергодисперсионному (EDX) элементному микроанализу содержание примеси железа в синтетических образцах № 1 и № 2 составило величину равную 0.65 ат.%, а в природном образце № 3 – 0.15 ат.%, соответственно. При этом в природном образце, согласно данным мёссбауэровской спектроскопии большинство примеси железа (~80 % от общего количества) было найдено в форме ионов двухвалентного железа, локализованных либо в октаэдрических (60%), либо в тетраэдрических (20%) узлах решётки, изоморфно замещающих катионы алюминия и бериллия, соответственно (см. таблицу в работе [12]).

Измерения спектров магнитного резонанса проводились при различной ориентации кристаллов берилла по отношению к направлению приложенного магнитного поля на экспериментальном широкополосном ЭПР спектрометре в высокочастотном диапазоне 350–401 ГГц. Подробное описание конструкции спектрометра приведено в работе [13]. Все измерения были выполнены при температуре жидкого гелия.

Результаты и их обсуждение

Во всех трёх исследуемых образцах бериллов в субмиллиметровом диапазоне были обнаружены сигналы ЭПР ионов двухвалентного железа. Наблюдаемые спектры представлены на рис. 1 для разных частот и при заданной ориентации кристаллов $\mathbf{B}_0 \| c$, где $\mathbf{B}_0$ – индукция постоянного магнитного поля, а c - главная ось симметрии кристалла берилла. В синтетическом образце № 1 линия ЭПР проявляет неразрешённую многокомпонентную структуру, состоящую, по крайней мере, из двух линий. Как в отожжённом образце № 2, так и в природном образце № 3 регистрировались лишь одна широкая линия, положение которой при равной частоте измерения совпадало с положением наиболее интенсивной линии образца № 1. Измерения частотно-полевой зависимости для образца № 1 (рис. 2) позволили сделать заключение о схеме энергетических уровней (приведена на вставке) для иона Fe^{2+} в кристалле берилла. Из эксперимента следует, что наблюдаются резонансные переходы типа синглет-дублет с расщеплением в нулевом поле (РНП) между ними ~12.7 $см^{-1}$, причём уровни дублета, в свою очередь, также разделены небольшим энергетическим

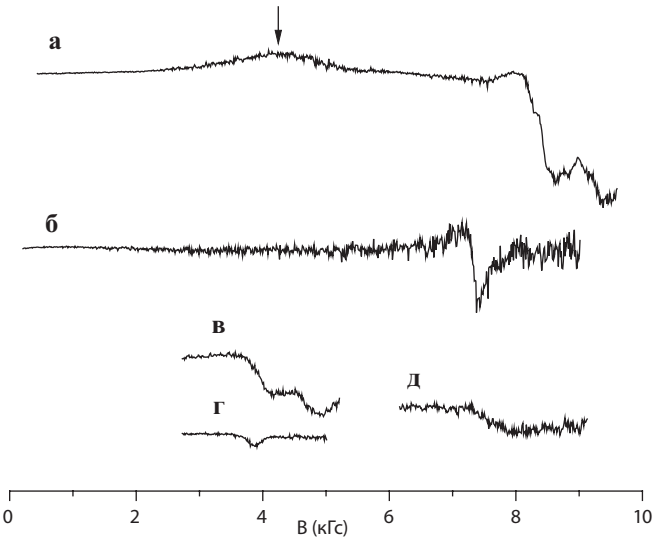


Рис. 1. Спектры ЭПР иона Fe^{2+} в кристаллах берилла: образец № 1 (**а**, **в**), образец № 2 (**б**, **г**) образец № 3 (**д**). Стрелкой обозначена слабая широкая линия перехода синглет-синглет в образце № 1. Частоты: **а** – 401.5 ГГц; **б**, **д** – 399.5 ГГц; **в** – 391.2 ГГц; **г** – 391 ГГц. Ориентация $\mathbf{B} \| c$.

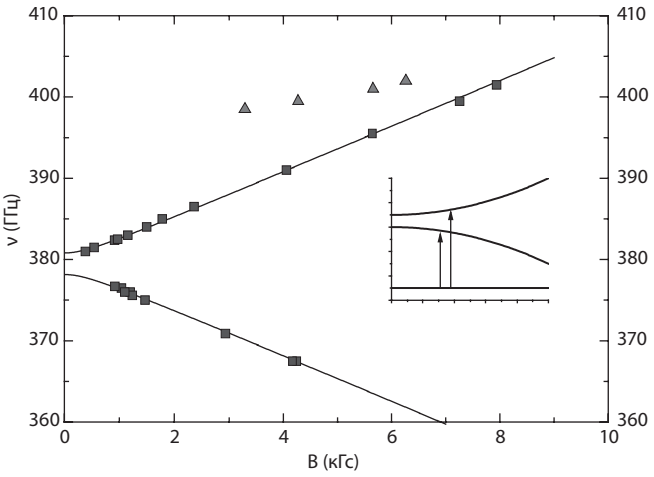


Рис. 2. Частотно-полевая зависимость резонансных переходов иона Fe^{2+} в берилле (образец № 1). Точки – эксперимент (нанесены положения наиболее интенсивной линия структуры), линии – расчёт. Треугольники – резонансный переход синглет-синглет.

зазором. При этом на график нанесена лишь интенсивная линия структуры. В области частот больших, чем РНП на низкополевом участке спектра в образце № 1 регистрировалась дополнительная очень слабая линия, которая, на наш взгляд, связана с резонансным переходом синглет-синглет. Из-за малого отношения сигнал/шум она подробно не изучалась. На рис. 1 эта линия обозначена стрелкой. Её удалось измерить лишь на нескольких частотах, и эти значения нанесены также на частотно-полевую зависимость (рис. 2). Угловая зависимость (рис. 3) измерялась в плоскости $(10\bar{1}0)$. В плоскости (0001) сигналы ЭПР не регистрировались. Угловые зависимости не выявили наличия магнитно-неэквивалентных центров, однако диапазон углов при измерениях оказался неполным. В данном случае имели место ограничения, связанные с наличием структурной воды в каналах берилла. Ранее [14, 15] нами было установлено, что водяные молекулы интенсивно поглощают субмиллиметровые волны в поляризации $\mathbf{E}_1 \perp c$, где $\mathbf{E}_1$ – напряжённость электрического поля излучения. Спектры ЭПР наблюдались при условии $\mathbf{B}_1 \perp \mathbf{B}_0$, при этом в спектрометре использовалась геометрия Фогта, т.е. $\mathbf{k} \perp \mathbf{B}_0$, где $\mathbf{k}$ – волновой вектор падающей на образец плоской волны. Поэтому при отклонении от ориентации $\mathbf{B}_0 \| c$ ($\mathbf{E}_1 \| c$) к ориентации $\mathbf{B}_0 \perp c$ ($\mathbf{E}_1 \perp c$), кроме уширения линии из-за уменьшения эффективного g-фактора, из-за нарастания поглощения связанного с водой в каналах уменьшалась микроволновая мощность, проходящая через образец. Совокупность этих факторов привела к ограниченному диапазону углов при измерении угловой зависимости спектров. Чтобы устранить влияние поглощения, вызванного водой, мы подвергли кристалл дегидратации. После отжига кристалл приобрел молочно-белый цвет из-за большого количества микротрещин и широкополосное поглощение в области наблюдения сигналов ЭПР в поляризации $\mathbf{E}_1 \perp c$ исчезло. Однако одновременно с этим трансформировались и

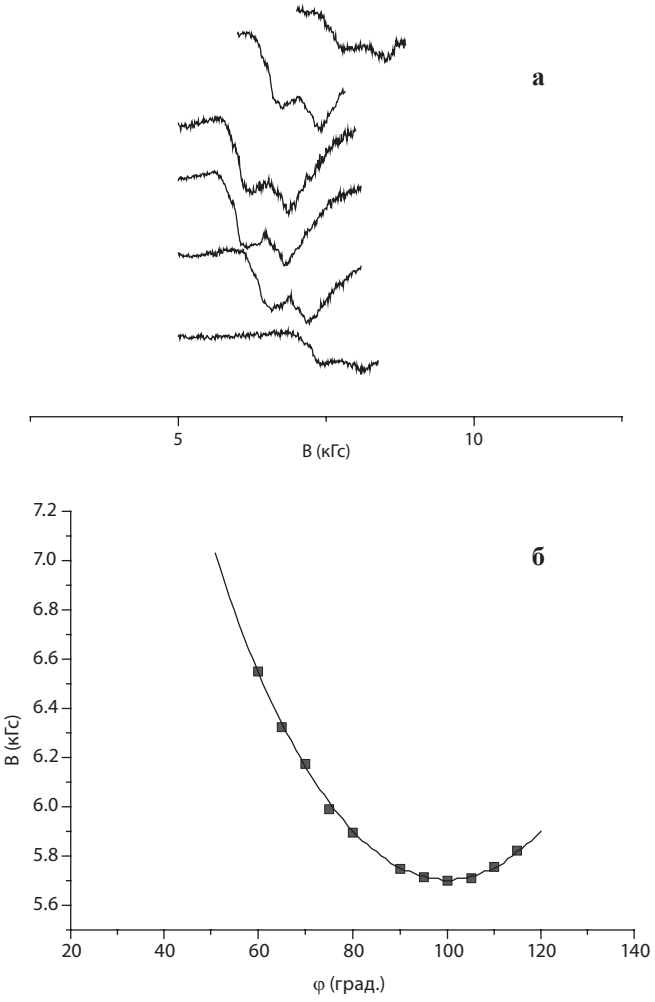


Рис. 3. а Вид спектров ЭПР иона Fe^{2+} в кристалле берилла (образец № 1, вращение в плоскости *ac* с шагом в 20 град.). **б** График угловой зависимости (образец № 2). Частота 395.5 ГГц.

спектры ЭПР. Во-первых, линии ЭПР сузились, и исчезла их структура, во-вторых, интенсивность сигнала ЭПР существенно уменьшилась, что не позволило расширить диапазон углов в ориентационной зависимости. На рис. 1 для сравнения представлены спектры ЭПР до и после дегидратации.

Поскольку спектры ЭПР трёхвалентного железа и обменных пар Fe^{3+}-Fe^{3+} известны и не могут объяснить сигналы, наблюдаемые в субмиллиметровом диапазоне, то можно сделать вывод, что наблюдаемее спектры принадлежат изолированным ионам Fe^{2+} (электронная конфигурация d^6, основной терм ^5D). Для определения типа кристаллографической позиции, в которую входят ионы двухвалентного железа, примем во внимание наличие расщепления между уровнями дублета. Это обстоятельство свидетельствует о ромбической составляющей локальной симметрии, т.е. октаэдрическую координацию с симметрией D_3 с большой долей вероятности можно исключить. Тетраэдрические позиции допускают расщепление дублета, но для кремний-кислородных тетраэдров замещение Si^{4+} на Fe^{2+} требует компенсации заряда, что должно приводить к появлению сопряженных спектров, причём магнитные оси направляются на компенсаторы под "косыми" углами. В случае бериллиевого тетраэдра также должны существовать магнитно-неэквивалентные центры, однако для изовалентного замещения магнитные оси центров должны быть направлены вдоль $\langle 2\bar{1}\bar{1}0\rangle$, $\langle 10\bar{1}0\rangle$ и [0001]. При этом, поскольку в эксперименте не удаётся получить спектры ЭПР при направлении магнитного поля перпендикулярно оси с кристалла, то наблюдаемый одиночный спектр можно объяснить при условии, что оси *Z* наблюдаемых центров направлены вдоль оси шестого порядка. Дальнейшее обсуждение основано на предположении, что ион Fe^{2+} замещает бериллий в тетраэдре. Если это так, то основным орбитальным состоянием в кубическом поле является дублет Γ_3. Под действием низко симметричных составляющих кристаллического поля дублет расщепляется и основным орбитальным состоянием должен быть синглет пятикратно вырожденный по спину. Спин-орбитальное взаимодействие во втором порядке снимает спиновое вырождение и приводит к системе спиновых подуровней, характеризующейся спином $S = 2$ [16]. В рамках такого подхода описаны, например, экспериментальные результаты дальней ИК-спектроскопии в соединении $Fe(SPh)_4^{2-}$ [17]. В то же время, ранее экспериментально и теоретически изучено расположение низколежащих уровней энергии центров Fe^{2+} в неискаженных тетраэдрах с симметрией T_d (ZnS, CdTe, $MgAl_2O_4$) [18], где основной вклад в расщепление орбитального дублета вносит спин-орбитальное взаимодействие второго порядка. В этих соединениях обнаружено пять эквидистантных уровней энергии с симметрией Γ_1, Γ_4, Γ_3, Γ_5, Γ_2, причём основной синглет (Γ_1) отделен от возбуждённого триплета (Γ_4) энергетическим интервалом 15 $см^{-1}$ в $ZnS:Fe^{2+}$, 10 $см^{-1}$ в CdTe и 13 $см^{-1}$ в $MgAl_2O_4$. Недавние измерения спектров ЭПР в $ZnSe:Fe^{2+}$ позволили нам дополнить этот ряд и измерить расщепление между синглетом и триплетом, которое оказалось равным примерно 15.5 $см^{-1}$ [19]. Сравнивая эти величины с РНП в бериллe (12.7 $см^{-1}$), можно отметить близость измеренных величин. Кроме того, регистрация в нашем случае слабой широкой дополнительной линии с РНП, превышающей РНП дублета, может быть связана с расщеплением в ромбическом поле триплета на дублет и синглет. Отметим, что расщепление между уровнями дублета в нашем случае мало, а наличие синглет-синглетого перехода с РНП, близким к РНП синглет-дублетного перехода, не вписывается в схему уровней со спином $S = 2$. Можно предположить, что система уровней Fe^{2+} в бериллe примерно та же, что и в кубических кристаллах, а действие низкосимметричных компонент кристаллического поля является возмущением. Подобная схема уровней реализуется, например, в гексагональном $GaN:Fe^{2+}$ [20], где возбуждённый триплет Γ_4 расщепляется тригональным полем на дублет Γ_3 и синглет Γ_2.

Поскольку положение линий синглет-синглет определялось с большой погрешностью и количество измеренных точек было недостаточным для расчёта, то

для теоретического описания мы использовали только резонансные переходы типа синглет-дублет. Расчёт сделан в приближении эффективного спина $S = 1$. Спиновый гамильтониан имел вид:

$$\mathcal{H} = g_{\parallel}\beta B_z S_z + g_{\perp}\beta(B_x S_x + B_y S_y) + D[S_z^2 - S(S+1)/3] + E(S_x^2 - S_y^2).$$

Нахождение параметров гамильтониана производилось в два этапа. Вначале на основе экспериментальной частотно-полевой зависимости (рис. 2) были найдены величины $g_{\parallel} = g_c = 2.0 \pm 0.1$, $D = 379.5$ ГГц, $E = 1.3$ ГГц. Для определения перпендикулярного g-фактора мы воспользовались угловой зависимостью, измеренной на частоте 355.5 ГГц, и получили значение $g_{\perp} = 3.7 \pm 0.5$. Расчётные кривые, полученные с помощью программы на языке МАТЛАБ, представлены на рис. 2 и 3 сплошными линиями. Хотя согласие вполне удовлетворительно, необходимо отметить, что точность определения $g_{\perp}$ невысока из-за того, что зеемановская энергия даёт лишь небольшой вклад в энергию резонансного перехода и погрешность в определении частоты (±0.5 ГГц) в данном случае оказывается существенной.

В работе [4] сообщалось о наблюдении линии ЭПР, принадлежащей иону Fe^{2+}, в железосодержащих образцах, выращенных флюсовым методом с недостатком в исходной шихте BeO. В этой работе зарегистрирована линия с $g_c = 3.773$, которую авторы связали с резонансным переходом $-1 \leftrightarrow +1$ иона Fe^{2+} в позиции Be^{2+} в рамках модели, когда спиновые подуровни описываются полным спином $S = 2$. Хотя угловую зависимость измерить полностью также не удалось, была обнаружена магнитная кратность ($K_M = 3$) спектров, тогда как мы не наблюдали магнитно-неэквивалентных центров. Поэтому можно сделать вывод, что в нашем случае мы имеем дело с другим центром. Также необходимо отметить, что спектры ЭПР, которые в работе [4] приписаны иону Fe^{2+}, наблюдались при комнатной температуре, что не согласуется с известными литературными данными. Поскольку наша интерпретация входит в противоречие с результатами работы [4], окончательно вопрос идентификации спектров Fe^{2+} будет возможно решить при условии наблюдения других возбуждённых уровней.

Хотя детальный физический механизм, обуславливающий двухкомпонентную форму линии ЭПР для ионов Fe^{2+}, окончательно не установлен, ещё раз отметим, что структура линий ЭПР исчезает после дегидратации берилла. Основываясь на этом факте, можно сделать вывод о том, что молекулы воды оказывают существенное влияние на кристаллическое поле лигандов, окружающих ионы Fe^{2+}. Наиболее вероятно, что, обладая большим электрическим дипольным моментом, вода вносит существенное искажение в потенциал кристаллического поля, действующего на ионы Fe^{2+}.

Заключение

Впервые в субмиллиметровом диапазоне длин волн в кристаллах природного и синтетического берилла были наблюдены спектры ЭПР некрамерсового иона двухвалентного железа. Установлено, что ионы Fe^{2+} локализованы в тетраэдрических структурных позициях и, по-видимому, изоморфным образом замещает катионы Be^{2+} в кристаллической структуре берилла. Определены величина расщепления уровней энергии иона Fe^{2+} между основным (синглетным) и возбуждёнными (дублетными) состояниями, а также значения анизотропного g-фактора и параметров кристаллического поля ромбической симметрии. Показано, что наличие молекул воды в структурных каналах берилла оказывает существенное влияние на форму наблюдаемых линий ЭПР.

Данная работа поддержана РФФИ, грант № 14-02-00255, и выполнена совместно с В.Г. Томасом, Р.И. Машковцевым, Д.А. Фурсенко (ИГИМ, г. Новосибирск), О.Н. Лопатиным, А.Г. Николаевым (КФУ, г. Казань), Б.П. Горшуновым, Е.С. Жуковой (ИОФ РАН, г. Москва). Авторы выражают благодарность Лядову Н.М. (КФТИ КазНЦ РАН, г. Казань) за проведение элементного EDX микроанализа.

Литература

1. Платонов А.Н., Таран М.Н., Балицкий В.С.: Природа окраски самоцветов.: М. Недра 1984. 197 с.
2. Зарипов М.М., Шамонин Ю.Я.: Известия АН СССР, сер. физ. **20**, 1224–1225 (1956)
3. Dvir M., Low W.: Phys. Rev. **119**, 1587–1591 (1960)
4. Edgar A., Hutton D.R.: Solid State Commun. **41**, 195–198 (1982)
5. Солнцев В.П., Букин Г.В., Лохова Г.Г., Вейс Н.С.: Труды ИГиГ СО РАН. вып. 610, 128–134 (1985)
6. Doerfler R, Allan G.R., DavisB.W., Pidgeon C.R., Vass A.: J. Phys. C.: Solid State Phys. **19**, 3005–3011 (1986)
7. Shakurov G.S., Shcherbakova T.A., Shustov V.A.: Appl. Magn. Reson. **40**, 135–145 (2011)
8. Anderson B.R., Challis L.S.: J. Phys. C.: Solid State Phys. **6**, L266–L270 (1973)
9. Slack G.A., Roberts S., Ham F.S.: Phys. Rev. **155**, 170–177 (1967)
10. Вильке К.-Т.: Выращивание кристаллов.: Л. Недра 1977. 600 с.
11. Лопатин О.Н., Хайбуллин Р.И., Вагизов Ф.Г., Базаров В.В., Бахтин А.И., Хайбуллин И.Б.: Записки ВМО (Записки Всероссийского Минералогического Общества) **4**, 122–127 (2001)
12. Khaibullin R.I., Lopatin O.N., Vagizov F.G., Bazarov V.V., Bakhtin A.I., Khaibullin I.B., Aktas B.: Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., B **206**, 277 (2003)
13. Tarasov V.F., Shakurov G.S.: Appl. Magn. Reson. **2**, 571–576 (1991)
14. Gorshunov B.P., Zhukova E.S., Torgashev V.I., Lebedev V.V., Shakurov G.S., Kremer R.K., Pestrjakov E.V., Thomas V.G., Fursenko D.A., Dressel M.: J. Phys. Chem. Lett. **4**, 2015–2020 (2013)
15. Zhukova E.S., Gorshunov B.P., Torgashev V.I., Lebedev V.V., Shakurov G.S., Kremer R.K., Pestrjakov E.V., Thomas V.G., Fursenko D.A., Dressel M.: J. Chem. Phys. **140**, 224317(1-12) (2014)
16. Абрагам А., Блини Б.: Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов.: М. Мир 1972. Т. 1. 651 с.
17. Champion P.M., Sievers A.J.: J. Chem. Phys. **66**, 1819–1825 (1977)
18. Slack G.A., Ham F.S., Chrenko R.M.: Phys. Rev. **152**, 376–402 (1966)
19. Shakurov G.S., Pytalev D.S., Kozlovsky V.I., Korostelin. Yu.V.: Modern Development of Magnetic Resonance: Abstr. of the Intern. Conf., 22-26 Sept. 2015, Kazan, Russia. P. 131
20. Malguth E., Hoffmann A., Xu X.: Phys. Rev. B **74**, 165201(1-4) (2006)

ЭПР исследование магнитных свойств новых дендримерных комплексов Fe(III) первой генерации

Н. Е. Домрачева, В. Е. Воробьёва

Лаборатория молекулярной радиоспектроскопии

Магнитные свойства новых жидкокристаллических дендримерных комплексов железа(III) первой генерации, $[FeL_2]^+ \cdot X^-$, (X = Cl, NO_3), изучены методами электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и мёссбауэровской спектроскопии. Установлено, что соединения обладают мезоморфными свойствами, а комплекс $[FeL_2]^+ \cdot Cl^-$ демонстрирует дискотическую (колончатую) фазу с гексагональной упаковкой. ЭПР показал, что соединения содержат два типа магнитных центров Fe(III): низко-спиновые (НС, S = 1/2) центры, характеризуемые g-факторами: $g_x = g_y = 2.211$, $g_z = 1.96$, и высоко-спиновые центры (ВС, S = 5/2), имеющие параметры тонкой структуры: D = 0.42 см$^{-1}$, E = 0.105 см$^{-1}$. В комплексах наблюдается частичный спин-кроссовер переход, НС и ВС молекулы связаны слабым антиферромагнитным обменным взаимодействием и, вероятнее всего, образуют цепочки в колонках. Результаты мёссбауэровской спектроскопии подтвердили наличие в системе, $[FeL_2]^+ \cdot NO_3^-$, двух типов магнитных (НС, ВС) центров, частичный спин-кроссовер переход для ~2–8% молекул и антиферромагнитный тип упорядочения ВС центров при T = 5 К.

Введение

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к изучению комплексов переходных металлов с переключаемыми (спин-переменными) свойствами, поскольку такие объекты являются перспективными материалами в молекулярной наноэлектронике [1]. Данные соединения имеют энергетически близкие электронные термины с разной спиновой мультиплетностью, что позволяет управлять спиновым состоянием системы посредством внешних воздействий. Комплексы Fe(III) с основанием Шиффа являются такими объектами и демонстрируют спин-кроссовер (СК) (S = 1/2 ↔ 5/2) свойства [2]. Представлялось интересным объединить в одном материале жидкокристаллические (ЖК) свойства системы со спин-переменными (СК) свойствами иона Fe(III). Первый шаг в этом направлении был сделан в работах [3, 4], где к комплексу Fe(III) с основанием Шиффа присоединялись длинные линейные заместители, обеспечивающие стержнеобразную геометрию молекул, а, следовательно, жидкокристалличность системы. СК и ЖК свойства в таком соединении наблюдались в различных температурных интервалах: постепенный спиновый переход регистрировался в области температур (4.2–388 К), а ЖК смектическая мезофаза детектировалась в интервале (388–419 К). Интересно отметить, что этот первый ЖК комплекс Fe(III) демонстрировал завышенное значение магнитной анизотропии в мезофазе, а молекулы комплекса обладали способностью ориентироваться в ЖК фазе под действием внешнего магнитного поля.

Сочетание спин-переменных свойств комплекса Fe(III) с ЖК свойствами позволило другим авторам [5] обнаружить методом ЭПР новую молекулярную нестабильность: конверсию низкоспиновых электронных конфигураций $(d_{xz},d_{yz})^4(d_{xy})^1 \leftrightarrow (d_{xy})^2(d_{xz},d_{yz})^3$ управляемую температурой и индуцируемую переходом системы в ЖК фазу.

Известно также, что дендронизация системы является полезной синтетической стратегией для создания новых полифункциональных материалов, поскольку позволяет получать материалы с качественно новыми физическими свойствами. В нашей предшествующей работе (статья в Ежегоднике за 2015 год) мы исследовали влияние дендронизации на магнитное поведение СК комплекса Fe(III). Для этой цели в ядро (фокальную точку) дендримера встраивался магнитоактивный блок, обладающий спин-переменными свойствами – комплекс Fe(III) с основанием Шиффа, к которому присоединялись дендроны второй генерации. В настоящей работе будут изучены магнитные свойства этого комплекса Fe(III) с дендронами первой генерации, которые имеют длинные линейные заместители, обеспечивающие жидкокристалличность системы. В данной работе будет показано: как изменяются магнитные свойства центрального спин-кроссовер блока с вариацией степени генерации дендронов, а также как ЖК свойства влияют на СК поведение центрального магнитного блока.

Результаты и обсуждение

Для этих целей были синтезированы два новых дендримерных комплекса Fe(III), $[FeL_2]^+ \cdot X^-$, первой генерации с противоионами X = NO_3 (**1**) и Cl (**2**), схематическая модель которых представлена на рис. 1а. Результаты исследования соединений методами элементного анализа, УФ, ИК, ЯМР спектроскопии и масс-спектрометрии позволили установить, что ион Fe(III) имеет октаэдрическое окружение (N_4O_2), сформированное двумя тридентантными (ONN) лигандами (L).

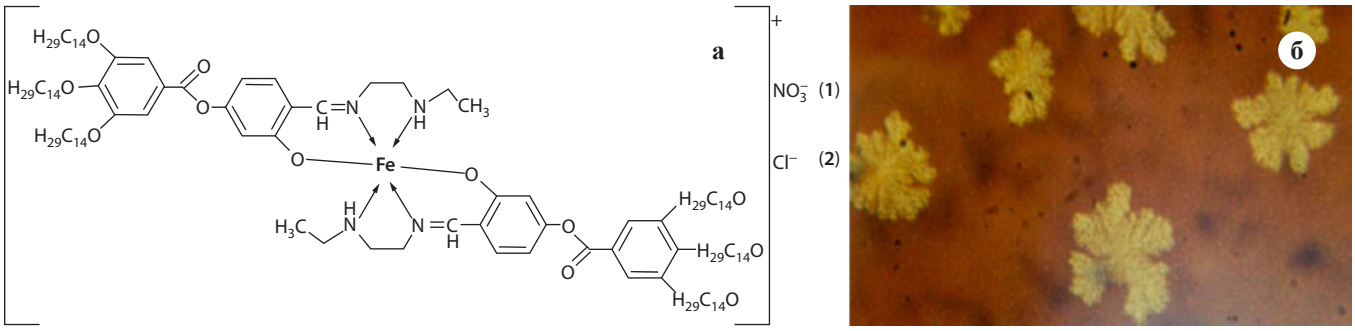


Рис. 1. Схематическая модель синтезированных комплексов Fe(III) (**а**); пальцеобразные домены, цикл охлаждения, $T = 25$ °C, николи параллельны (**б**).

Жидкокристаллические свойства комплексов были изучены методами дифференциальной сканирующей калориметрии и поляризационной микроскопии. Показано, что соединения обладают мезоморфными свойствами, а комплекс **2** демонстрирует дискотическую (колончатую) фазу с гексагональной упаковкой (рис. 1б).

Квантово-химические расчёты структур (проведённые методом DFT [10]) показали, что соединения могут иметь различные модели координационных полиэдров (рис. 2). Важно отметить, что только модель **1** (транс/транс изомер) обеспечивает параллельную ориентацию линейных лигандных заместителей и, следовательно, только она согласуется с упаковкой молекул в дискотической фазе.

Спектры ЭПР для обоих соединений снимались при различных температурах (4.2–300 K) в X- ($h\nu$ = 0.3 см$^{-1}$) и Q-диапазонах ($h\nu$ = 1.2 см$^{-1}$). Комплексы **1**, **2** демонстрировали аналогичные спектры ЭПР. На рис. 3 представлены спектры ЭПР для соединения **2** в X- и Q-диапазонах, соответственно. Видно, что в спектрах ЭПР (X-диапазона) наблюдаются два типа сигналов. Слабый по интенсивности сигнал в низких полях с g_{eff} = 4.2 обусловлен высокоспиновыми (ВС, S = 5/2) центрами Fe(III), характеризуемыми параметрами тонкой структуры ($D \gg h\nu$ = 0.3 см$^{-1}$, E/D = 1/3), а сильная по интенсивности линия с неразрешённой структурой в области g-фактора 2.125, относится к низкоспиновым (НС, S = 1/2) центрам Fe(III). Последнее заключение подтверждается результатами измерений в Q-диапазоне (ν = 34.2 Ггц), где спектр хорошо разрешается и наблюдается анизотропный сигнал типичный для НС центров (рис. 3в, г). Отметим, что спектр ЭПР снятый в Q-диапазоне, не содержит линии с g_{eff} = 4.2, что позволяет оценить [12] диапазон изменения параметра D тонкой структуры 0.3 см$^{-1} \le D \le$ 0.6 см$^{-1}$.

Экспериментальные спектры были симулированы с использованием программы EasySpin (пунктирные линии на рис. 3). Наилучшее согласие экспериментальных спектров с теоретическими получено для следующих магнитных параметров: g = 2.0, D = 0.42 см$^{-1}$, E = 0.105 см$^{-1}$ для

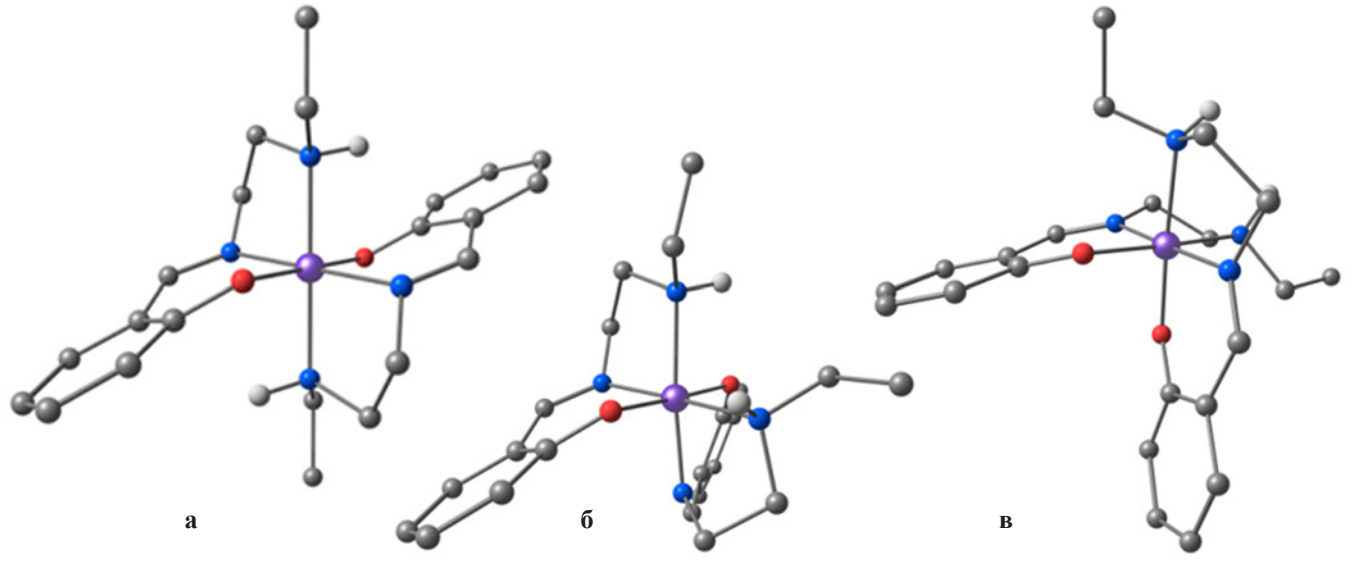


Рис. 2. Координационные модели для соединений (лигандные хвосты не показаны): **а** модель 1 (транс/транс изомер), **б** модель 2 (транс/цис изомер), **в** модель 3 (цис/цис изомер).

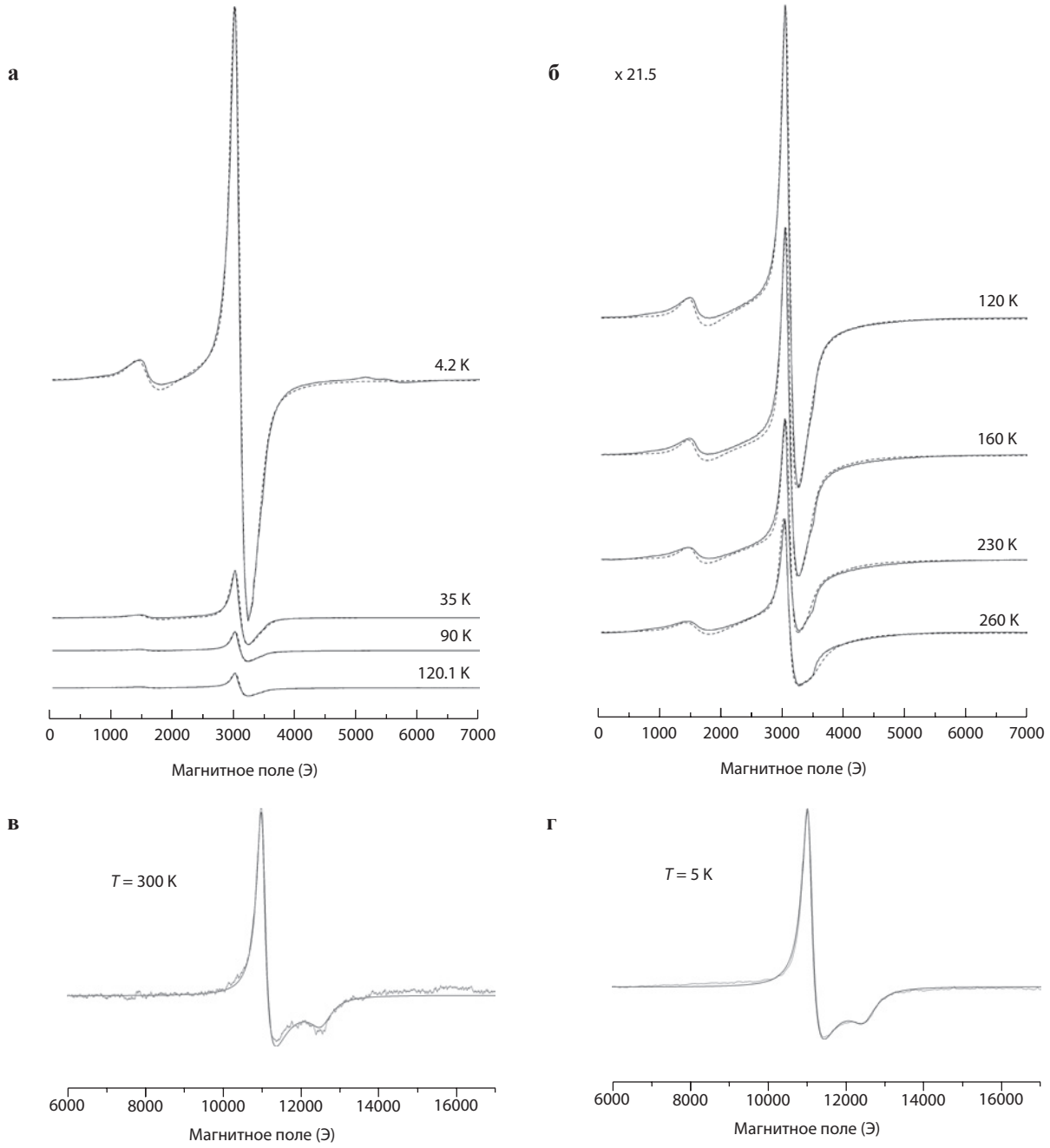


Рис. 3. Спектры ЭПР (X-диапазон) соединения **2** при различных температурах (**а, б**). Спектры ЭПР (Q-диапазон) комплекса **2** при 300 К (**в**) и 5 К (**г**). Штриховыми линиями показаны теоретические спектры, сплошными - результаты их аппроксимации.

ВС центров и $g_{x,y}$ = 2.211, g_z = 1.96 для НС центров железа(III), при моделировании спектров использовалась лоренцева форма линии.

Проанализируем теперь поведение спектров ЭПР для каждого типа магнитных центров раздельно. На рис. 4 приведены температурные зависимости интегральной интенсивности линий спектров ЭПР (I) для НС и ВС центров. Обе зависимости в интервале температур (4.2–160 К) подчиняются закону Кюри-Вейса с константами $\theta_{НС}$ = –0.35 К и $\theta_{ВС}$ = –0.64 К для НС и ВС центров, соответственно.

Отрицательный знак константы θ указывает на наличие антиферромагнитных обменных взаимодействий между ионами железа. Обработка температурных данных интегральной интенсивности линий спектра ЭПР для ВС центров согласно уравнениям (1, 5 и 6) из работы [13] и величиной параметра D = 0.42 см$^{-1}$ позволила определить величину обменного интеграла J = –0.07 см$^{-1}$. Поскольку молекулы комплекса **2** самоорганизуются в дискотическую (колончатую) фазу, разумно предположить, что НС и ВС центры формируют цепочки в колонках. Центры связаны слабыми антиферромагнитными обменными

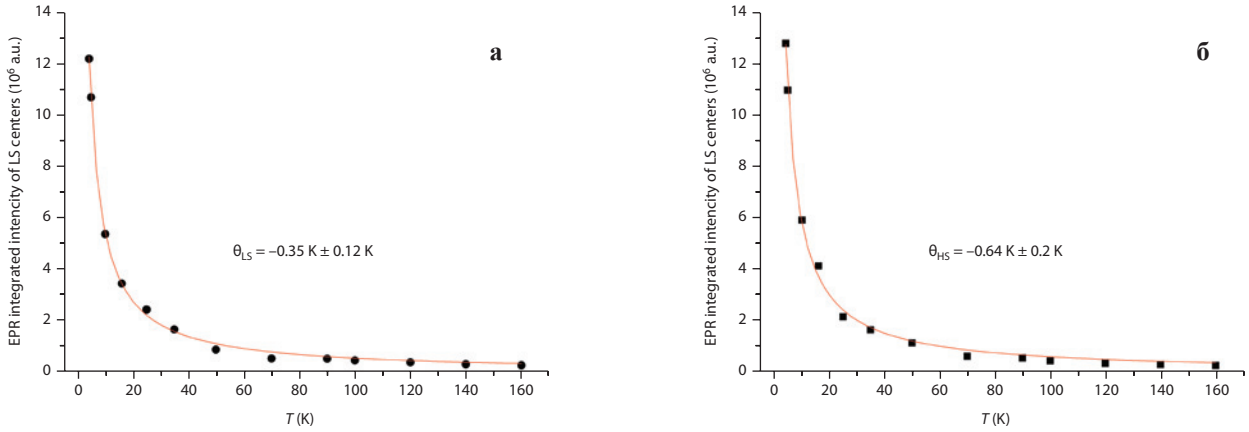


Рис. 4. Температурная зависимость интегральной интенсивности спектра ЭПР НС (**а**) и ВС (**б**) центров. Сплошной линией показаны результаты расчёта с константами Вейса (см. текст).

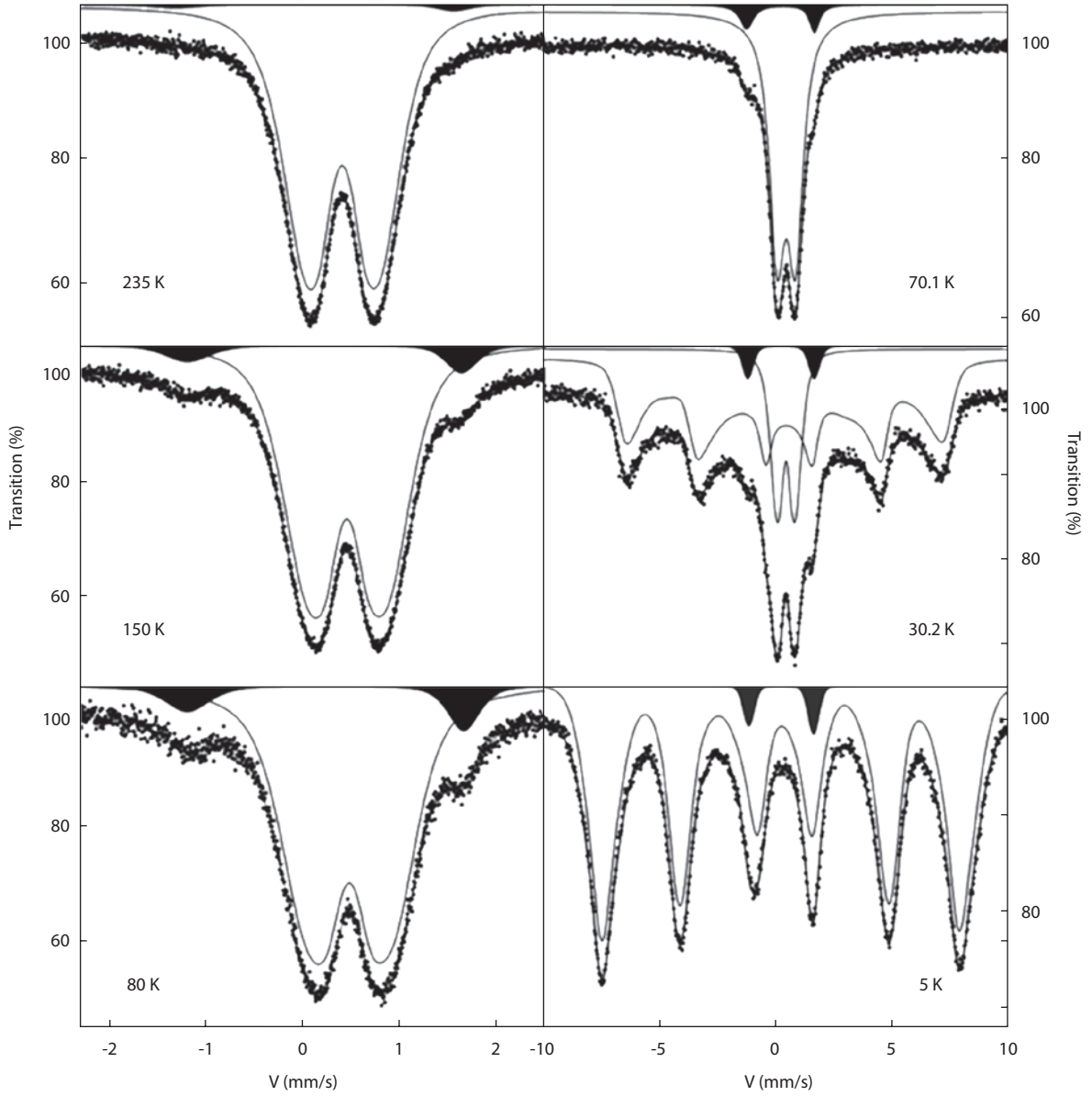


Рис. 5. Мёссбауэровские спектры соединения **1** при различных температурах.

взаимодействиями, благодаря образованию водородной связи между противоионом и протонами азометинов от ближайших соседних лигандов. Выше 160 К в соединениях наблюдается частичный спин-кроссовер переход, в котором принимают участие ~(2–8)% комплексов железа. Таким образом, наличие ЖК свойств в дендримерных комплексах Fe(III) с дендронами первой генерации практически блокирует спин-кроссовер переход.

Мёссбауэровские спектры соединения **1**, представленные на рис. 5, были измерены в широком температурном интервале (5–285 К). При 285 К, спектр состоит из одного широкого дублета, характеризуемого параметрами: изомерным сдвигом δ_{Fe} = 0.37 мм/с и квадрупольным расщеплением Q_S = 0.73 мм/с, которые соответствуют ВС центрам Fe(III) с октаэдрическим окружением. Новый дублет, характеризуемый параметрами: δ_{Fe} = 0.12 мм/с и Q_S = 2.89 мм/с появляется в спектре при 235 К и соответствует ионам Fe(III) в НС состоянии, а сам факт появления в спектре НС фракции указывает на начало термоиндуцированного спин-кроссовер перехода. При понижении температуры доля НС центров растёт и при 80 К составляет порядка ~8.9%. При 5 К, в мёссбауэровском спектре появляется асимметричный спектр с магнитной сверхтонкой структурой (H_{obs} = 479 кЭ) и дублет, соответствующий НС центрам. Асимметричный вид спектра для ВС центров свидетельствует об антиферромагнитном типе упорядочения этих центров при 5 К [14].

Дополнительно нами было проведено изучение влияния степени генерации дендронов на магнитные свойства центрального спин-кроссовер блока. Установлено, что изменение степени генерации дендронов с первой на вторую сопровождается появлением нового типа ВС центров железа(III) со слабо-искаженным координационным узлом. Число этих новых ВС центров преобладает над остальными, и они имеют цис/цис изомерную структуру (модель 3). Такая изомерная структура комплексов позволяет ионам Fe(III) приближаться значительно ближе друг к другу, вследствие чего величина антиферромагнитного обменного взаимодействия возрастает на порядок (θ = –9.9 К) в дендримерных комплексах железа(III) второй генерации.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН № 24 совместно с соавторами: А. В. Пятаевым, А. Г. Ивановой (Казанский (Приволжский) федеральный университет, проведение мёссбауэровских измерений) и М. С. Груздевым, У. В. Червоновой, А. М. Колкером (Институт химии растворов РАН, синтез и характеристика соединения).

Литература

1. Gütlich P., Goodwin H.A.: Spin Crossover in Transition Metal Compounds I, Topics in Current Chemistry, vol. 233, p. 324. Heidelberg: Springer 2004.
2. Nihei M., Shiga N., Maeda Y., Oshio H.: Coord. Chem. Rev. **251**, 2606–2621 (2007)
3. Galyametdinov Yu., Ksenofontov V., Prosvirin A., Ovchinnikov I., Ivanova G., Gutlich P., Haase W.: Angew. Chem. Int. Ed. **40**, 4269–4271 (2001)
4. Ovchinnikov I.V., Ivanova T.A., Petrashen V.E., Galyametdinov Yu.G., Ivanova G.I.: Appl. Magn. Reson. **29**, 325–334 (2005)
5. Domracheva N., Pyataev A., Manapov R., Gruzdev M., Chervonova U., Kolker A.: Eur. J. Inorg.Chem. **2011**, 1219–1229 (2011)
6. Paez J.I., Martinelli M., Brunetti V., Strumia M.C.: Polymers **4**, 355–395 (2012)
7. Domracheva N., Vorobeva V., Pyataev A., Tamura R., Suzuki K., Gruzdev M., Chervonova U., Kolker A.: Inorg. Chim. Acta **439**, 186–195 (2016)
8. Chervonova U.V. (Ph.D. thesis). G. A. Krestov Institute of Solution Chemistry of RAS: Ivanovo 2012.
9. Usol'tseva N., Akopova O., Bykova V., Smirnova A., Pikin S.: Liquid crystals: discotic mesogens, p. 546. Ivanov State Univ.: Ivanovo 2004.
10. Domracheva N., Pyataev A., Vorobeva V., Zueva E.: J. Phys. Chem. B **117**, 7833–7842 (2013)
11. Carrington A., McLachlan A.D.: Introduction to magnetic resonance: with applications to chemistry and chemical physics, p. 266 (Chapman and Hall: London 1979.
12. Aasa R.: J. Chem. Phys. **52**, 3919–3930 (1970)
13. Pavlishchuk V.V., Prushan M., Addison A.: Teor. Eksp. Khim. **41**, 229–234 (2005)
14. Luetkens H., Klauß H.H., Benda R., Waif G.H., Litterst F.J., Latterman G.: Hyp. Int. **120-121**, 243–246 (1999)

ЭПР прекурсора [Fe(Salten)Cl] в поликристаллическом состоянии и в разбавленных застеклованных растворах в ацетонитриле

Е. Н. Фролова, Т. А. Иванова, О. А. Туранова, Л. В. Мингалиева, В. А. Шустов, И. В. Овчинников

Лаборатория молекулярной радиоспектроскопии; отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии, лаборатория физики углеродных наноструктур и композитных систем

Показано, что комплексы с пятидентатным лигандом Salten [Fe(Salten)Cl] обладают высокоспиновым состоянием (ВС) $S = 5/2$ в концентрированной (поликристаллической) фазе, а в разбавленных застеклованных растворах обнаруживают одновременное сосуществование как высокоспиновой, так и низкоспиновой (НС, $S = 1/2$) фракций. Для поликристаллической фазы прослежена корреляция вида спектров ЭПР со степенью кристалличности образцов. Обнаружено, что основная масса комплексов в кристаллах образует обменно-связанные кластеры, сигнал от которых не наблюдается. В спектрах ЭПР замороженных растворах в ацетонитриле выделено несколько типов ВС центров: с симметрией близкой к осевой ($D >> h\nu$, $E \sim 0–0.09D$, основное количество ~90%) и сильно искаженные ($D >> h\nu$, $E \sim 0.33D$); а также два типа низкоспиновых комплексов, отличающихся значениями g-факторов. Установлено, что диполь-дипольные взаимодействия в застеклованных растворах [Fe(Salten)Cl] эффективно уширяют линии спектров до концентраций ~0.63 ммоль/л. Получены параметры и относительная доля подспектров, характерных для НС фракции, проведена оценка параметра ковалентности комплексов. Изучено поведение интегральных интенсивностей линий спектров с температурой как ВС, так и НС фракций и процентное содержание подтипов комплексов зависящее от температуры.

Введение

Известно, что создание соединений с особыми магнитными свойствами, которыми можно управлять как посредством изменения внешних факторов (температуры, давления, облучения и т.п.), так и структуры (путём выбора комплексообразователя, типа и строения лиганда, отсутствия или наличия, а также природы противоиона и/или сольвата) является актуальной целью современных исследований. В качестве наиболее часто используемых лигандов современной координационной химии до сих пор остаются основания Шиффа и их структурные аналоги, что объясняется относительной простотой синтеза и большим разнообразием, достигаемым путём введения заместителей, с получением как моно- так и полидентатных лигандов [1].

Ранее, путём варьирования заместителей в лигандах, природы и структуры мостиковых лигандов, противоионов, синтезирована и описана серия комплексов Fe(III) с пентадентатным основанием Шиффа, многие из которых обладают спин-переменными свойствами [2], также получены и исследованы моно и биядерные жидкокристаллические комплексы Fe(III) [3].

Любой синтез полиядерных комплексов с пентадентатным лигандом неизменно проходит через стадию получения моноядерных координационных соединений – прекурсоров, строительных блоков для дальнейшего синтеза. Отличительной особенностью прекурсоров данного типа является наличие единственного лабильного координационного места, которое может быть атаковано моно- или бидентатными мостиковыми лигандами, с образованием моно- или биядерных координационных соединений, соответственно. При взаимодействии прекурсора с другими комплексами получены и исследованы триядерные и разнометальные [4], а также три- и гептаядерные разновалентные Fe(III), Fe(II) координационные соединения [5]. При таком широком использовании прекурсоров в синтезе казалось бы, что эти соединения должны быть хорошо исследованы. Тем не менее, основное внимание уделялось непосредственно разнолигандным комплексам – конечным продуктам синтеза, а магнитные свойства прекурсоров оставались в тени.

В данной работе получен комплекс 4-азагептаметилен 1,7-бис(салицилидениминато) хлорида железа(III) [Fe(Salten)Cl], использующийся в качестве прекурсора при синтезе соединений [Fe(Salten)L]Y, в которых стабилизируются различные спиновые состояния ионов Fe(III) или проявляются спин-переменные свойства в зависимости от вида монодентатного лиганда L и внешнесферного аниона Y [6]. Представляло интерес выявить структурные особенности прекурсора в поликристаллическом состоянии и в растворе, определить спиновое состояние наряду с межмолекулярными взаимодействиями ионов Fe(III).

Экспериментальная часть

Лиганд и исследуемое комплексное соединение были получены по методике [7]. Все использованные реагенты очищали перекристаллизацией, а растворители подвергали перегонке и обезвоживанию до совпадения их констант с литературными данными. Состав и строение синтезированных соединений подтверждалось методами элементарного анализа, ЯМР ^{1}H (для лиганда), УФ-спектроскопии. Элементный анализ был выполнен на анализаторе EuroVector CHNS-O Elemental Analyzer

EA3000. УФ спектры регистрировались на спектрофотометре Varian Cary 100. Спектры ^{1}H ЯМР записаны на спектрометре BrukerAvance 400.

Порошковые дифрактограммы записаны на дифрактометре ДРОН-7 с излучением CuK_α с β-фильтром.

Измерения ЭПР выполняли в X-диапазоне в интервале температур 5–300 К на спектрометре EMXplus фирмы Bruker. Для измерения спектров ЭПР в замороженных растворах образцы предварительно стекловались погружением в жидкий азот, затем перемещались в резонатор спектрометра при T = 100 К. Симуляция полученных ЭПР спектров проводилась с использованием пакета программ EasySpin.

Исследование температурной зависимости намагниченности прекурсора [Fe(Salten)Cl] проведено на автоматизированном комплексе для измерения физических свойств с опцией измерения AC и DC-намагниченности PPMS-9 фирмы Quantum Design в Центре коллективного пользования физическими методами исследования ИОНХ РАН (абсолютная чувствительность при измерении DC-намагниченности $\pm 2.5 \cdot 10^{-5}$ Гс · см^3). Измерения выполнены при напряжённости внешнего магнитного поля H = 5000 Гс в процессе охлаждения (интервал температур T = 2–300 К). Масса навески m = 0.0513 г. Введена поправка на диамагнетизм молекулы по схеме Паскаля.

Результаты и обсуждение

Спиновое состояние комплексов [Fe(Salten)Cl] в поликристаллах

Для исследования структурных особенностей [Fe(Salten)Cl] в кристаллической упаковке был проведён рентгеноструктурный анализ выращенных монокристаллов. Монокристалл получили путём медленного испарения маточного раствора ($CHCl_3$/EtOH в соотношении 1/1). Кристаллы имели пространственную группу симметрии $P2_1/c$, с Z = 4 и параметрами решётки a = 7.6183(3), b = 19.5342(9), c = 13.3349(6), α = 90°, β = 102.426°, γ = 90°, которые хорошо совпадают с литературными данными [8]. Строение молекулы прекурсора, рассчитанное методом DFT, и элементарной ячейки кристалла представлены на рис. 1.

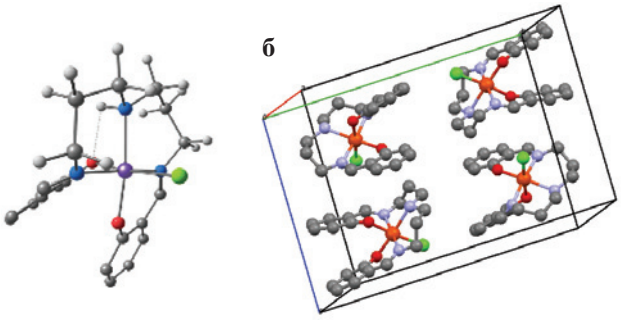


Рис. 1. Строение молекулы [Fe(Salten)Cl] (**а**) и элементарной ячейки кристалла (**б**).

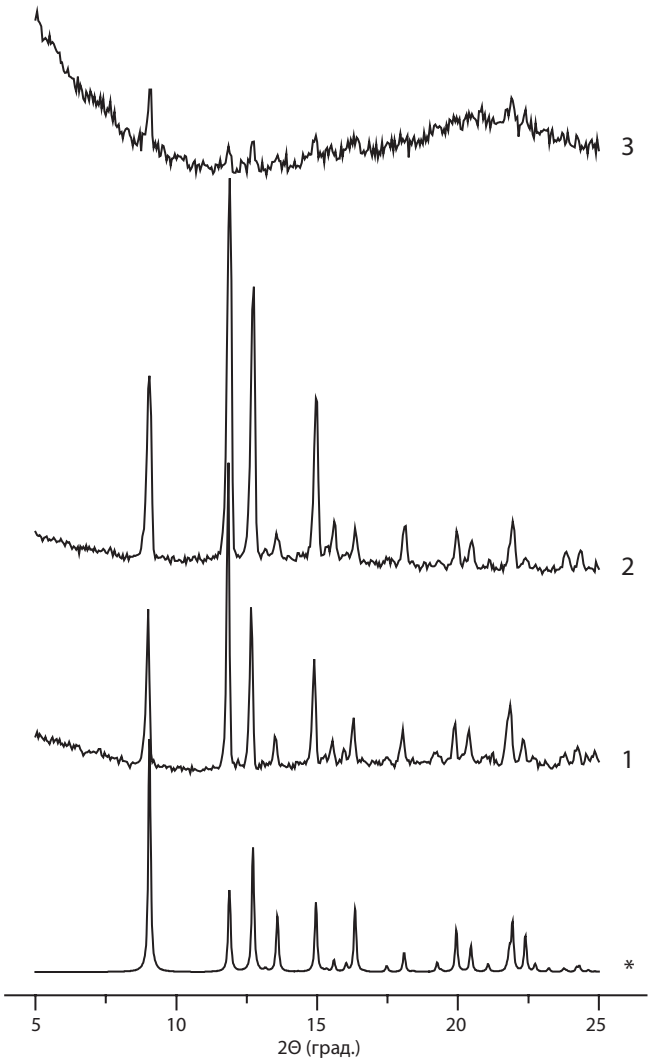


Рис. 2. Дифрактограммы образцов 1–3 в сравнении с теоретически рассчитанной (*).

Для исследования влияния времени кристаллизации [Fe(Salten)Cl] из раствора были получены образцы в виде поликристаллических порошков (образцы 1 и 2) при кристаллизации в течение 2–4 часов, и в виде дисперсного порошка (образец 3) при быстром осаждении в течение от 30 мин до 1 часа.

Рентгенофазовый анализ полученных поликристаллических соединений показал, что для образцов 1 и 2 наблюдались идентичные дифрактограммы, соответствующие теоретической, рассчитанной на основании параметров монокристалла (рис. 2). То есть структура полученных поликристаллических соединений соответствовала приведённым выше параметрам. В соединении 3 на фоне широкой базовой линии наблюдались несколько слабых рефлексов, совпадающих по положению с наиболее сильными рефлексами теоретического спектра, однако большинство ожидаемых дифракционных пиков не детектировались. Следовательно, в этом образце только часть

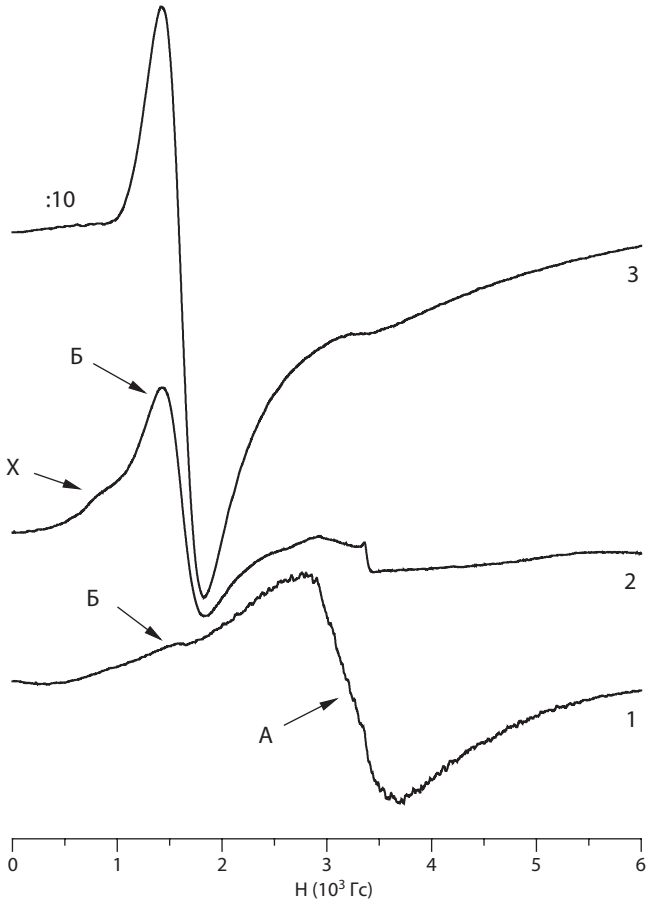


Рис. 3. Спектры ЭПР поликристаллических образцов 1–3 при 200 К.

комплексов остается организованной в поликристаллы, остальные же переходят в аморфную фазу.

Спектры ЭПР образцов 1–3, приведённые на рис. 3, масштабированы относительно реперного сигнала пустого резонатора спектрометра. В образце 1 наблюдалась широкая практически изотропная линия А с g_{eff} = 2.17, ΔH_{eff} = 1000 Гс, на слабополевом плече которой детектировался сигнал Б с g_{eff} = 4.2 (в точке пересечения с нулевой линией), ΔH_{eff} = 170 Гс. Сигналы типа Б принадлежат ионам Fe(III) в высокоспиновом (ВС) состоянии (электронная конфигурация d^5, S = 5/2) и соответствуют индивидуальным комплексам [Fe(Salten)Cl], с большой величиной параметра тонкой структуры (D > hv) и сильными ромбическими искажениями ($E/D \approx 1/3$). Линия А может быть отнесена к структурам, в которых центры Fe(III) обменно связаны (магнитные ассоциаты и/или кластеры). Учитывая, что интегральная интенсивность сигнала А более чем на два порядка превышает интенсивность сигнала Б, можно утверждать, что комплексы [Fe(Salten)Cl] в этом образце преимущественно образуют обменные группы. Отметим, что температурная зависимость интегральной интенсивности сигнала Б удовлетворительно описывалось законом Кюри, в то время как интенсивность и форма сигнала А практически не менялась вплоть до 5 К.

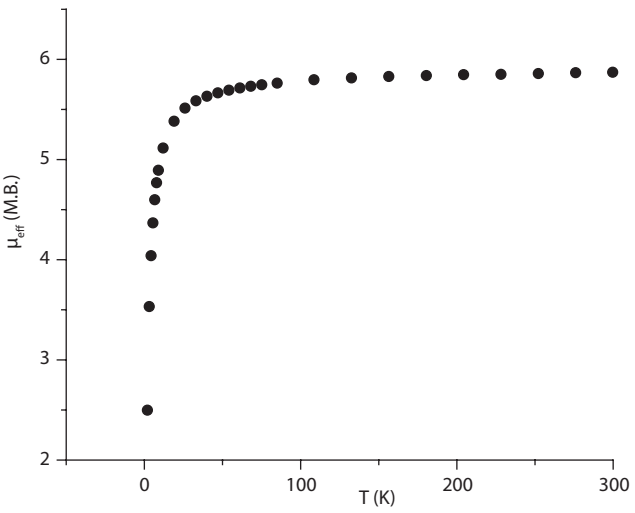


Рис. 4. Температурная зависимость эффективного магнитного момента [Fe(Salten)Cl].

В образце 2 интенсивность сигнала типа Б с параметрами с g_{eff} = 4.2, ΔH_{eff} = 387 Гс существенно больше интенсивности обменной линии А. Кроме того, наряду с сигналами А и Б появляется линия Х с $g_{\text{eff}} \sim 6$, которая соответствует ВС комплексам железа с незначительными степенями ромбичности ($E/D \sim 0$). В образце 3, степень аморфности которого достаточно высока, наблюдаются только сигналы типа Б и Х. Следует отметить, что степень кристалличности исследуемых образцов определённым образом коррелирует с интенсивностью сигналов в ЭПР-спектрах: при одинаковых исследуемых объёмах интенсивность сигналов ЭПР в спектрах аморфного образца 3 существенно выше, чем в более кристалличных 1 и 2. Сопоставление интенсивностей линий ЭПР в исследуемых образцах позволяет сделать вывод, что для порошков с высокой степенью кристалличности в спектрах виден сигнал не от всех содержащихся в образце ионов Fe(III). По-видимому, основная масса комплексов в кристаллах образует обменно-связанные кластеры, сигнал от которых не наблюдается.

Температурная зависимость намагниченности прекурсора (рис. 4) подтверждает предположение о том, что линия типа А в спектрах ЭПР поликристаллических образцов соответствует взаимодействующим высокоспиновым, а не низкоспиновым центрам Fe(III), поскольку наблюдаемые в эксперименте величины эффективного момента $\mu_{\text{eff}} \sim 5.74$ М.В. свидетельствуют о ВС состоянии ионов Fe(III) в интервале температур выше 70 К. При уменьшении температуры ниже 70 К величина μ_{eff} несколько уменьшается до величин порядка 5 М.В., а ниже 10 К резко уменьшается и достигает 2.5 М.В. при температуре 2.0 К.

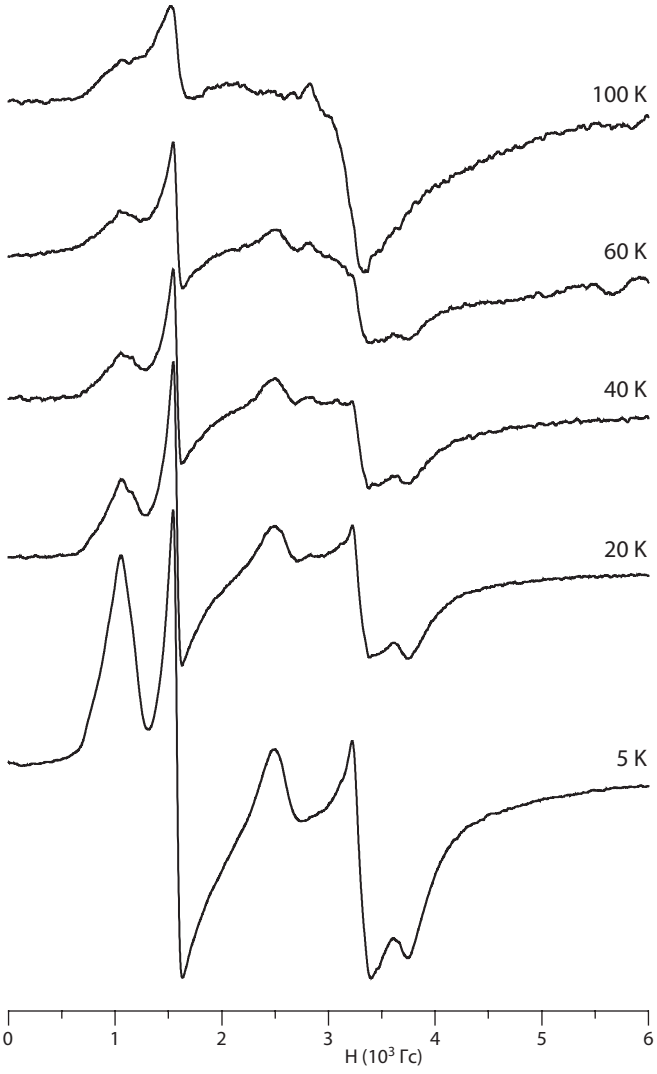


Рис. 5. Спектры ЭПР (записанные при разных усилениях) застеклованного раствора комплексов [Fe(Salten)Cl] (1.25 ммоль/л) в ацетонитриле при разных температурах.

Спиновое состояние комплексов [Fe(Salten)Cl] в застеклованных растворах

Нам представлялось интересным исследовать состояние комплексов [Fe(Salten)Cl] в отсутствие стабилизирующего влияния регулярной упаковки кристалла на строение отдельного металлоцентра. С этой целью были исследованы растворы прекурсора в ацетонитриле. Измерения проводились при разных концентрациях прекурсора: 5 ммоль/л (практически предельная концентрация растворимости для данного соединения), 2.5 ммоль/л, 1.25 ммоль/л, 0.63 ммоль/л и 0.31 ммоль/л.

Для приготовления растворов использовались порошки 1–3. В полученных спектрах ЭПР отличий, вызванных степенью кристалличности исходного образца [Fe(Salten)Cl] обнаружено не было. Разумно предположить, что при растворении порошка в большом объёме растворителя кооперативные взаимодействия между комплексами Fe(III), обусловленные упаковкой молекул в микрокристаллах

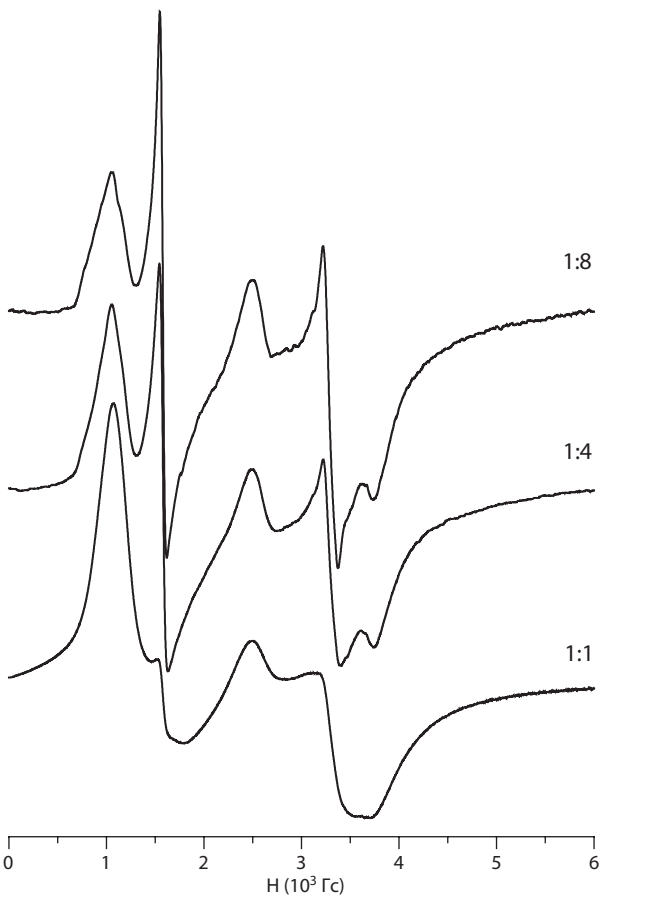


Рис. 6. Спектры ЭПР комплексов [Fe(Salten)Cl] в застеклованных растворах в ацетонитриле при разных концентрациях (1:1 = 5, 1:4 = 1.25; 1:8 = 0.63 ммоль/л соответственно) при T = 5 К.

снимутся, и основными линиями в спектрах ЭПР должны остаться линии индивидуальных центров.

Действительно, спектры ЭПР застеклованных растворов существенно отличаются от спектров порошков: в них при температурах 5–180 К наряду с линиями, характерными для индивидуальных ВС комплексов железа (S = 5/2, линии типа Б и Х) регистрируются сигналы, которые могут быть отнесены к низкоспиновым (S = 1/2) центрам Fe(III) (рис. 5). Проведённый анализ температурной зависимости ВС и НС компонент спектров, не позволяет однозначно подтвердить осуществление в исследуемых системах термоиндуцированного спинового перехода (S = 5/2, терм $^6A_1 \leftrightarrow S$ = 1/2, терм $^2T_2$). Полученные данные свидетельствуют скорее об одновременном сосуществовании в застеклованных растворах ВС и НС фракций в исследованном диапазоне температур 5–180 К.

Исследуемые растворы представляли собой достаточно разбавленные системы: максимальная концентрация комплексов не превышала 5 ммоль/л. Однако даже при таких сравнительно малых концентрациях линии спектров оказались уширенными из-за диполь-дипольных взаимодействий между комплексами. Только снижение концентрации комплексов на порядок привело к независимости ширины линии отдельных компонент спектра

Таблица 1. Параметры спектров ЭПР центров с $S = 1|2$ для замороженных растворов [Fe(Salten)Cl] в ацетонитриле при разных концентрациях.

Растворитель	Концентрация [Fe(Salten)Cl] (ммоль/л)	T (К)	Спектр	a.u.(%)	$g_x \pm 0.005$	$g_y \pm 0.005$	$g_z \pm 0.005$
Ацетонитрил	5	180	Г	42	1.910	2.175	2.265
			Д	58	1.760	2.155	2.650
		100	Г	15	1.870	2.085	2.290
			Д	75	1.760	2.085	2.640
	1.25	40	Г	22	1.910	2.050	2.450
			Д	78	1.780	2.100	2.705
		5	Г	13	1.920	2.060	2.200
			Д	87	1.795	2.050	2.705

от изменения концентрации раствора (рис. 6). Следовательно, на основании данных ЭПР можно сделать вывод, что комплексы [Fe(Salten)Cl] в ацетонитриле склонны к образованию ассоциатов, в которых металлоцентры остаются достаточно близко расположенными для проявления межмолекулярных диполь-дипольных взаимодействий.

Симуляция экспериментальных ЭПР-спектров показала, что для ВС фракции в растворах характерно сосуществование нескольких типов симметрии центрального координационного узла Fe(III). Значения параметров соответствуют центрам Fe(III) с большой величиной параметра тонкой структуры ($D >> h\nu$) и различными по величине ромбическими искажениями: сильно искаженные центры с $E \sim 0.33D$ составляют около 2–7% общей фракции $S = 5/2$, основными являются комплексы с не столь значительными отклонениями от осевой симметрии координационного октаэдра $E \sim 0–0.09D$.

Спектры ЭПР фракции с $S = 1/2$ для замороженных растворов также являются сложными. Во всём исследованном диапазоне температур удовлетворительное описание формы линии ЭПР возможно при использовании не менее двух подспектров ромбической симметрии (Г, Д). Полученные параметры и относительная доля подспектров представлены в таблице 1. Спектр типа Д является основным и характеризуется большей анизотропией g-фактора, чем Г. Расчёты параметра ковалентности K, проведённые по методике, описанной в [9–11], позволяют считать комплексы типа Д менее ковалентными ($K \sim 0.84–0.94$), чем комплексы типа Г ($K \sim 0.55–0.87$). Оценка интегральных интенсивностей симулированных спектров показала, что количество НС комплексов в застеклованных растворах [Fe(Salten)Cl] в ацетонитриле меняется с температурой: так, в застеклованном растворе с концентрацией 1.25 ммоль/л при 40 К доля НС центров составляет 46%, а при 5 К около 35%.

Очевидно, что причинами появления комплексов Fe(III) с $S = 1/2$ в растворах является взаимодействие комплексов [Fe(Salten)Cl] с молекулами растворителя. Это взаимодействие может быть внешнесферным, когда комплекс в целом координируется молекулами растворителя за счёт водородных связей, и изменение распределения электронной плотности на ионе Fe(III) будет происходить за счёт изменения конфигурации или донорных свойств пятидентатного лиганда. А также внутрисферным, если произойдет замещение иона Cl по 6 позиции в [Fe(Salten)Cl] на молекулу растворителя, что приведёт к ожидаемому изменению электронных свойств иона металла. В пользу внешнесферной координации говорит тот факт, что количество НС комплексов в образцах достаточно велико и оно изменяется при изменении температуры эксперимента.

Наблюдаемые изменения в спектрах ЭПР (относительные интенсивности линий подспектров, величины g-факторов), связанные с изменением температуры образцов, могут свидетельствовать как о структурных изменениях самих металлоцентров с температурой, так и о влиянии на строение комплексов металла окружающего объёма застеклованного растворителя, т.е. внешнего давления.

Выводы

Методами ЭПР и магнитной восприимчивости показано, что комплексы исследуемого прекурсора [Fe(Salten)Cl] обладают ВС состоянием $S = 5/2$ в поликристаллических образцах. Обнаружено, что наряду с отдельными металлоцентрами с большими параметрами D и разной степенью ромбических искажений, в поликристаллических образцах возникают обменно-связанные кластеры с аномальной температурной зависимостью интегральной интенсивности линий, а также отсутствием сигнала ЭПР от основной массы введенных ионов Fe(III).

В растворе в ацетонитриле кластеры распадаются на индивидуальные центры высокоспиновой и низкоспиновой ($S = 1/2$) фракций, которые сосуществуют в изученном диапазоне температур 5–180 К. Следует отметить, что в спектрах ЭПР застеклованных существенно разбавленных растворов (5–0.63 ммоль/л) проявляются диполь-дипольные взаимодействия комплексов. Поведение интегральных интенсивностей линий ЭПР с температурой как ВС так и НС фракций не следует закону Кюри, а процентное содержание подтипов зависит от температуры. Указанные особенности могут быть вызваны как структурными изменениями металлоцентров с температурой, так и

являться следствием изменения давления окружающего объёма застеклованного растворителя.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы № 26 Президиума РАН “Электронный спиновый резонанс, спин-зависящие электронные эффекты и спиновые технологии”. Авторы выражают благодарность А. Т. Губайдуллину (ФГБУН ИОФХ КазНЦ РАН) за анализ образцов методом РСА, Н. Н. Ефимову (ЦКП ФМИ ФГБУН ИОНХ РАН) за измерение температурной зависимости намагниченности прекурсора, Е. М. Зуевой (ФГБОУ ВО “КНИТУ”) за расчёты строения комплекса методом DFT.

Литература

1. Гарновский А.Д., Васильченко И.С.: Успехи химии **71**, №11, 201–206 (2002)
2. Boillot M.-L., Zarembowich J., Sour A. in: “Spin Crossover in Transition Metal Compounds”. (Gutlich P., Goodwin H.A., eds.) Springer. V. II, 261, 2004.
3. Туранова О.А., Иванова Г.И., Гафиятуллин Л.Г., Иванова Т.А., Мингалиева Л.В., Туранов А.Н., Овчинников И.В.: Журнал общей химии **84**, №11, 1878–1883 (2014)
4. Boca R., Nemec I., Salitros I., Pavlik J., Herchel R., Renz F.: Pure Appl. Chem. **81**(8), 1357–1383 (2009)
5. Boca R., Salitros I.: Chem. Papers. **62**(6), 575–579 (2008)
6. Овчинников И.В., Иванова Т.А., Туранова О.А., Иванова Г.И., Мингалиева Л.В., Суханов А.А.: Коорд. Хим. **39**, №8, 502–506 (2013)
7. Matsumoto N., Ohta Sh., Yoshimura Ch., Ohyoshi A.: J. Chem. Soc. Dalton Trans. **12**, 2575–2584 (1985)
8. Holt E.M., Holt S.L., Vlasse M.: Cryst. Struct. Commun. **8**, 645 (1979)
9. Иванова Т.А., Овчинников И.В., Туранов А.Н.: ФТТ. **49**, 2033–2038 (2007)
10. Bhadbhade M.M., Srinivas D.: Polyhedron. **17**, 2699–2711 (1998)
11. Bohan T.L.: J. Magn. Reson. **26**, 109–118 (1977)

Сигналы ЭМР тканей спинного мозга после его травматического повреждения

С. В. Юртаева, Г. Г. Яфарова, И. В. Яцык, Х. Л. Гайнутдинов

Лаборатория молекулярной радиоспектроскопии; отдел химической физики, лаборатория спиновой физики и спиновой химии

Методом ЭПР-спектроскопии изучены ткани спинного мозга (СМ) и кровь крыс с экспериментальной моделью травмы спинного мозга. В тканях травмированного СМ обнаружены сигналы ЭМР, характеризующиеся зависимостью $H_{рез}$ от ориентации в магнитном поле. Обнаружено сильное увеличение сигнала ЭМР непосредственно в области травмы по сравнению с соседними областями СМ. Характеристики сигналов ЭМР соответствуют магнетиту.

Введение

В последнее время изучение молекулярных механизмов повреждения нервных тканей и поиск путей восстановления возникающих нарушений после него ведутся очень интенсивно. Тяжелая травма позвоночника, осложненная повреждением спинного мозга (СМ) остается одной из актуальных медико-социальных проблем, т.к. ведёт к глубокой инвалидизации пострадавших. Отсутствие в настоящее время адекватных методов лечения и реабилитации при данной патологии побуждает к интенсивному изучению молекулярных механизмов травмы нервных тканей.

Одним из метаболитов, активно участвующих в развитии посттравматических состояний при повреждении нервной ткани является железо. Известно, что поражение СМ сопровождается гибелью клеток и кровотечением, что вызывает увеличение пула свободного железа [1–3]. Считается, что избыточное железо может инициировать вторичное повреждение тканей путём усиления свободно-радикальных процессов. В этом случае возможно усиление процессов биоминерализации железа [4] в тканях, результатом которых является образование кристаллических оксидов железа. Метод ЭПР позволяет зарегистрировать такие кристаллы.

К настоящему моменту известно о наблюдении сигналов электронного магнитного резонанса (ЭМР), зависящих от ориентации магнитного поля в травмированных нервных тканях. Ранее, подобные сигналы были зарегистрированы в травмированном седалищном нерве [5] и травмированном СМ [6]. Уже в первой работе, обнаружившей анизотропный сигнал в нервной ткани, высказывалось предположение о его ферромагнитном происхождении [5], однако ни источники этого типа сигналов, ни их характеристики впоследствии не были установлены. Понимание природы данных сигналов ЭМР может дать дополнительную информацию о молекулярных процессах, развивающихся после травмы нервной ткани, и способствовать разработке новых методов диагностики и коррекции возникающих метаболических сдвигов.

В соответствии с вышесказанным, целью работы было изучение природы и характеристик возникающих анизотропных сигналов ЭМР в тканях травмированного СМ и в крови крыс.

Результаты

В настоящей работе изучались ткани крыс с моделью травмы спинного мозга (ТСМ) ($n = 3$) и ткани контрольных крыс ($n = 2$). Моделирование травмы осуществлялось по методике Аллен [7], длительность моделирования составляла 7 дней. В условиях моделирования ТСМ в тканях СМ обнаружены сигналы ЭМР, зависящие от ориентации.

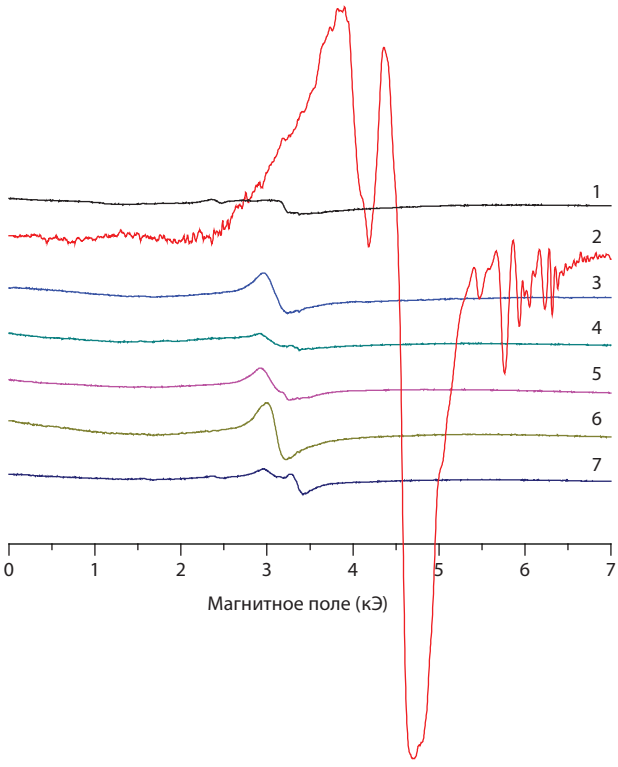


Рис. 1. Сигналы ЭМР в ткани СМ: 1 – ткань выше ТСМ, 2 – в области травмы СМ, 3 – ниже травмы, 4–6 аналогичные области СМ контрольной крысы, 7 – кровь травмированной крысы.

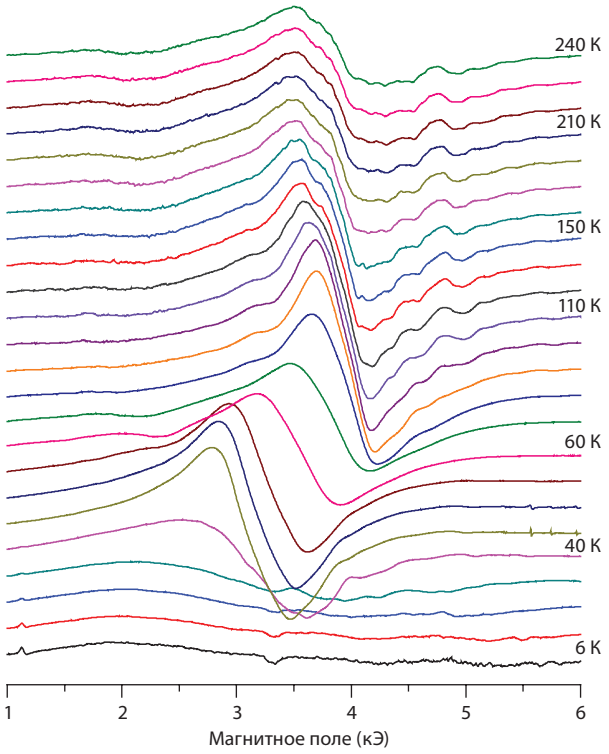


Рис. 2. Температурное поведение сигнала ЭМР в образце травмированного СМ.

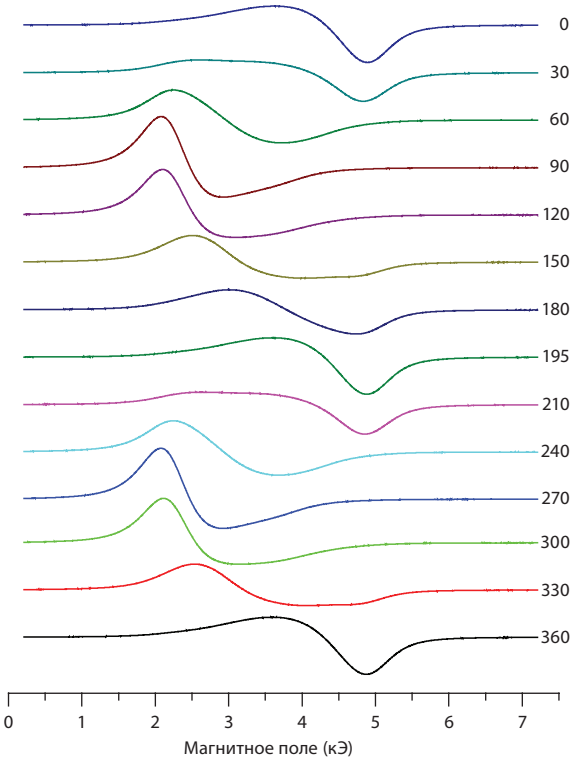


Рис. 4. Угловая зависимость сигнала ЭМР в модельном объекте – взвеси из наночастиц магнетита диаметром 30 нм, высушенных на подложке.

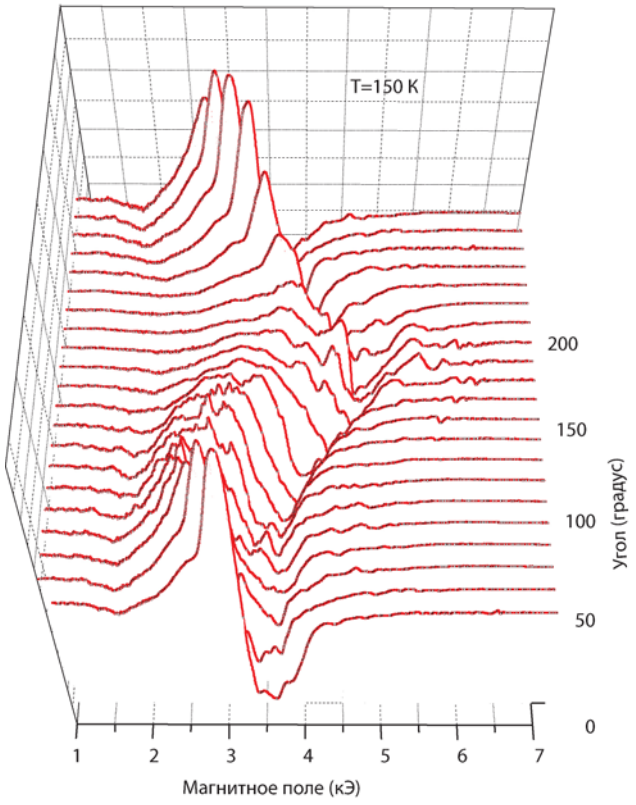


Рис. 3. Угловая зависимость наиболее интенсивного сигнала ЭМР в области ТСМ.

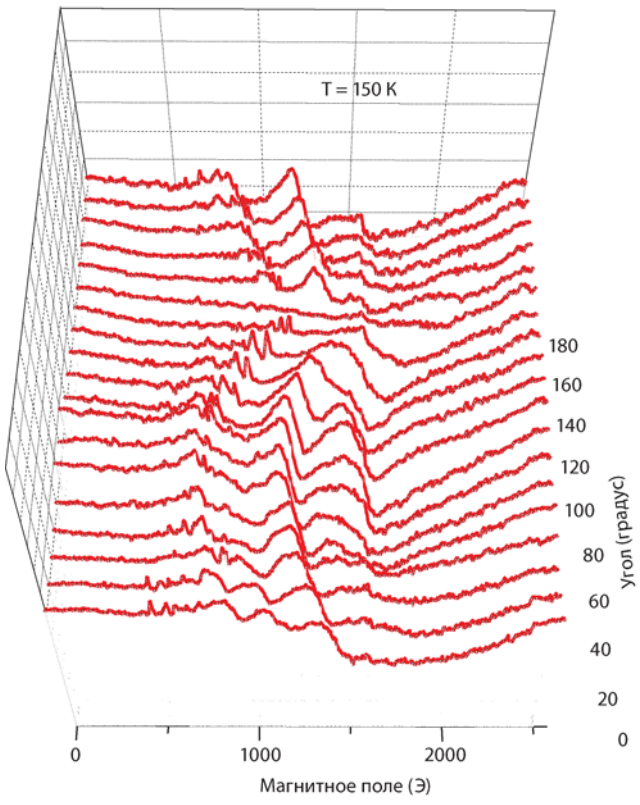


Рис. 5. Пример угловой зависимости линий ТС ЭМР в образце травмированного СМ при температуре 150 К.

Методом ЭПР были исследованы ткани спинного мозга в области экспериментальной травмы, выше и ниже травмы, а также образцы крови лабораторных крыс с моделью ТСМ. Для сравнительной характеристики изучались образцы из аналогичных областей СМ контрольных крыс. Было установлено, что сигнал ЭМР в образце из области травмы по амплитуде превышал в 1.5–10 раз сигнал в соседних тканях СМ, а также сигналы в аналогичных участках тканей СМ контрольных крыс. На рис. 1 приведён пример тканей с наибольшим эффектом увеличения сигнала в области ТСМ.

В спектрах образцов тканей из области травмы СМ наблюдалось два типа сигналов: широкие сигналы с шириной линии до нескольких сотен Э и узкие "шумоподобные сигналы" с шириной в несколько десятков Э (линии тонкой структуры (ТС) спектров ЭМР [8, 9]). Для установления источника сигналов, было изучено температурное поведение сигнала ЭМР в образце непосредственно из области травмы (рис. 2) в интервале температур 6–240 К. Оно соответствовало магнетиту, характеристики которого описаны нами в [10]. Также были изучены угловые зависимости сигналов ЭМР в области ТСМ. Анизотропия $H_{рез}$ в угловой зависимости имела два вклада аксиальный и кубический. Характер анизотропии $H_{рез}$ в каждом образце был индивидуальным.

Обнаруженное усиление сигнала в травмированной области СМ (рис. 1) свидетельствует об увеличении количества железа, накопленного в виде биомагнетита. Зарегистрированная ориентационная зависимость наиболее интенсивного сигнала в области ТСМ (рис. 3) свидетельствует о сильной анизотропии кристаллического объекта, обуславливающего данный сигнал. Угловая зависимость этого широкого сигнала (ΔH ~ 600 Э при температуре 150 К) (рис. 3) демонстрировала аксиальную форму анизотропии $H_{рез}$ и была близка к угловой зависимости в плёнке из наночастиц магнетита (рис. 4). Параметр аксиальной анизотропии составлял ~2000 Э. Более узкие сигналы (ΔH ~ 150–200 Э при T = 150 К) описывались 2-х компонентной анизотропией – суммой аксиального и кубического вкладов. Линии ТС ЭМР имели аксиальный вид анизотропии (рис. 5).

Кроме того, в образцах крови у 2-х из 3-х крыс с ТСМ также наблюдались интенсивные анизотропные сигналы, хотя анизотропия $H_{рез}$ была меньшей. Разница между $H_{рез\ max}$ и $H_{рез\ min}$ не превышала 400 Э.

Обнаруженное методом ЭПР увеличение количества кристаллического железа в ткани травмированного СМ через 7 дней после травматического повреждения может быть проявлением интенсивных процессов демиелинизации нервных волокон, сопровождающихся выходом железа из миелиновых оболочек [11].

Изучение описанных выше сигналов представляет интерес, в связи с тем, что их амплитуда может отражать интенсивность патологического процесса демиелинизации нервных волокон, а оценка интенсивности сигналов в крови позволит контролировать интенсивность этих процессов в ходе лечения спинальных травм.

Заключение

Проведённое методом ЭПР исследование показало, что сигналы ЭМР в образцах травмированного СМ обусловлены кристаллитами магнетита. Различие в анизотропии $H_{рез}$ сигналов в разных образцах говорит о разных пространственных формах накопления кристаллитов. В частности, аксиальный характер анизотропии широкого сигнала свидетельствует о том, что кристаллы накапливаются в виде плёнки, наличие ТС ЭМР говорит о появлении дисперсных наноразмерных зёрен магнетита.

Применение метода ЭПР-спектроскопии позволило обнаружить эффект увеличения депонированного железа в травмированной нервной ткани, что согласуется с предполагаемыми механизмами развития патологических молекулярных процессов при ТСМ, описанными в литературе.

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам Казанского Федерального Университета В. Н. Ефимову за плодотворное обсуждение результатов и А. А. Родионову за выполненные измерения температурных зависимостей спектров ЭПР.

Исследование методом ЭПР-спектроскопии выполнено при поддержке Программы Президиума РАН 1.26 П "Электронный спиновый резонанс, спин-зависящие электронные эффекты и спиновые технологии".

Литература

1. Rathore K.I., Kerr B.J., Redensek A., López-Vales R., Jeong S.Y., Ponka P., David S.: Journal of Neuroscience **28**(48), 12736–12747 (2008)
2. Koszyca B., Manavis J., Cornish R.J., Blumbergs P.C.: J. Clin. Neurosci. **9**(3), 298–301 (2002)
3. Liu D., Liu J., Sun D., Alcock N.W., Wen J.: Free Radical Biology and Medicine **34**(1), 64–71 (2003)
4. Kirschvink J.L.: Bioelectromagnetics **10**, 239–260 (1989)
5. Commoner B., Woolum J.C., Larsson E.: Science **165**, 703–704 (1969)
6. Milvy P., Kakari S., Campbell J.B., Demopoulos H.B.: Annals of the New York Academy of Sciences **222**, 1102–1111 (1973)
7. Allen A.: JAMA (The Journal of The American Medical Association) **57**, 878–80 (1911)
8. Мартьянов О.Н., Ли Р.Н., Юданов В.Ф.: Письма в ЖЭТФ **75**, вып.12, 763–767 (2002)
9. Petukhov V.Yu., Panarina N.Yu., Khabibullina N.R., Zheglov E.P., Mozhanova A.A.: Appl. Magn. Reson. **30**, 233–242 (2006)
10. Yurtaeva S.V., Efimov V.N., Yafarova G.G., Eremeev A.A., Iyudin V.S., Rodionov A.A., Gainutdinov Kh.L., Yatsyk I.V.: Appl. Magn. Reson. **47**, 555–565 (2016)
11. Plemel J.R., Keough M.B., Duncan G.J., Sparling J.S., Yong V.W., Stys P.K., Tetzlaff W.: Progress in Neurobiology **117**, 54–72 (2014)

О влиянии локализованных магнитных состояний на трансформацию дираковского полуметалла Cd_3As_2 в полуметалл Вейля

Ю. В. Горюнов

Лаборатория физики перспективных материалов

Первые измерения электронного спинового резонанса и магнитной восприимчивости легированого европием 3D топологического полуметалла Cd_3As_2 показали, что в нем образуются два типа магнитных ионов европия, которые при понижении температуры образуют, соответственно ферромагнитную и антиферромагнитную фазы. Обнаружено, что в этом случае знак магнетосопротивления меняется с положительного на отрицательный. Данные наблюдения рассматриваются, как свидетельства перехода под влиянием магнитных примесей дираковского полуметалла в вейлевский полуметалл.

Введение

Низкотемпературная аллотропная модификация соединения Cd_3As_2, долгое время известного, как узкозонный полупроводник, совсем недавно была идентифицирована, как 3D топологический полуметалл с дираковскими фермионами [1, 2], представляемого, как объёмный аналог графена. Зона проводимости и валентная зона арсенида кадмия имеют линейный закон дисперсии и соприкасаются друг с другом в 3D зоне Бриллюэна в конечном числе точек, называемых дираковскими узлами. Данное соединение в чистом виде имеет носители тока необычайно малой эффективной массы и, как следствие, большое положительное магнетосопротивление. Нарушение симметрии в дираковском полуметалле посредством либо магнитного поля, либо магнитных примесей способствует его трансформации в вейлевский полуметалл и приводит к необычным явлениям, например, таким как экзотические сверхпроводящие фазы, спиральное упорядочению спинов, хиральный магнитный эффект и актуальному в данной работе отрицательному магнетосопротивлению. В этом контексте представляется совершенно естественным вопрос: как ведут себя магнитные примеси в матрице с линейным электронным спектром, каким образом они взаимодействуют между собой, как влияют на свойства матрицы?

В случае параболического закона дисперсии для металлов теория косвенного обменного взаимодействия между локализованными моментами через носители тока [3] была построена в 1954 году и носит имя её авторов – Рудермана-Киттеля-Касуйи-Иосиды. В 1955 г. Бломбергеном и Ровальдом она [4] была расширена на случай носителей тока для валентной зоны. Основным качественным результатом теории является осциллирующий с расстоянием между примесями знакопеременный характер РККИ косвенного обменного взаимодействия. В дальнейшем в работах Б. И. Кочелаева с соавторами [5, 6] и Г. Г. Халиуллина косвенное взаимодействие между магнитными примесями в сверхпроводнике получило слабый, но дальнедействующий на расстояния порядка длины когерентности сверхпроводника, антиферромагнитный “хвост”. Также существуют системы, в которых косвенное обменное взаимодействие между магнитными примесями осуществляется за счёт поляризации сильно парамагнитной (на пороге возникновения зонного магнетизма) электронной системы ряда металлов и соединений (например, палладий) [7] и электронного остова матрицы (например, кондо изолятор SmB_6) [8]. Теория косвенного взаимодействия в 3D топологических дираковских полуметаллах и полуметаллах Вейля построена совсем недавно в работах [9–11]. Ранее РККИ взаимодействие локализованных магнитных моментов в графене было теоретически рассмотрено Е. Коганом [12] и многими другими авторами. Таким образом, экспериментальное изучение влияние магнитных примесей на свойства топологических полуметаллов совершенно злободневно. Задачей нашего исследования стало изучение поведения локализованных спинов примесей в 3D топологическом полуметалле Cd_3As_2. В качестве магнитных примесей для внедрения в эту матрицу мы выбрали европий и иттербий.

Эксперимент

Легированные европием слитки Cd_3As_2 были синтезированы при 1023 К путём прямой реакции составляющих элементов: Cd чистотой 99.999%, As – 99.9999%, Eu – 99.99%, помещённых в отпаянные кварцевые ампулы. Бинарные фазовые диаграммы указывают, что при температурах вдвое меньших происходит растворение европия в жидком кадмии или мышьяке. Исключается образование в этой системе соединения Eu_3As_2, наиболее тугоплавкого и наиболее опасного для процесса внедрения европия в Cd_3As_2, т.к. согласно работе [13] оно идет только при температурах выше 1270 К. Кристаллическая стехиометрия проверялась с помощью рентгеновского флуоресцентного анализа и рентгеновской порошковой дифракции. Электропроводимость измерялась стандартным

четырёхзондовым методом в температурном интервале 12–300 К и магнитном поле 1.5 Тл. Магнитная восприимчивость измерялась с помощью коммерческого СКВИД-магнитометра. Эксперименты по поглощению СВЧ излучения проводились на стандартном модуляционном ЭПР спектрометре Брукер в X-диапазоне (9.3 ГГц).

Результаты эксперимента

Структура и состав образцов. Полученные данные рентгеновских измерений подтверждают идентичность синтезированных чистых и легированных соединений низкотемпературной тетрагональной модификации Cd_3As_2 [2] с пространственной группой симметрии $I4_1cd$ и параметрами решётки a = 12.654(5) Å, c = 25.465(3) Å. Для чистого Cd_3As_2 a = 12.6539 Å, c = 25.4586 Å. Каких-либо других дополнительных фаз и соединений обнаружено не было. Экспериментальные и расчётные данные по рентгеновской дифракции практически совпадают. Данные рентгеновского флуоресцентного анализа указывают на некоторый дефицит по мышьяку. На рис. 1 представлена 1/8 кристаллической решётки α-фазы Cd_3As_2.

Электросопротивление

Измерения сопротивления чистого и легированных образцов в нулевом поле и в магнитном поле 1.5 Тл при комнатной температуре показали влияние примеси Eu на характер магнетосопротивления: для чистого образца наблюдалось значительное положительное магнетосопротивление $(R_{(H = 1.5\ \text{Тл})} - R_{(H = 0)})/R_{(H = 0)} = 0.4$, тогда как для образца, легированного европием, наблюдалось значительное отрицательное магнетосопротивление $(R_{(H = 1.5\ \text{Тл})} - R_{(H = 0)})/R_{(H = 0)} = -0.2$. Для легированного Cd_3As_2 температурная зависимость сопротивления имела металлический характер с $R_{300\ \text{K}}/R_{12\ \text{K}} = 18$. Оценка концентрации электронов дала $n_e = 2.2 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$ против $n_e = 6 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ для чистого образца. Средние размеры областей, занимаемых отдельными электронами проводимости в легированном и чистом образцах, получаются, соответственно, 44 и 146 Å, что заметно больше размеров элементарной ячейки. Именно: один электрон в зоне проводимости приходится на 12 элементарных ячеек в случае легированного Cd_3As_2 и на 600 элементарных ячеек в чистом арсениде кадмия. Полагая, что ион европия даёт в зону проводимости один электрон, получаем уровень легирования порядка 0.26 ат.% Eu. Однако, следует иметь ввиду, что на самом деле при замещении двухвалентного иона кадмия двухвалентным ионом европия электроны должны уходить в валентную зону. Электрон в зону проводимости может поступать от трёхвалентного иона европия, который с большей вероятностью может образовываться в тетраэдрических вакансиях.

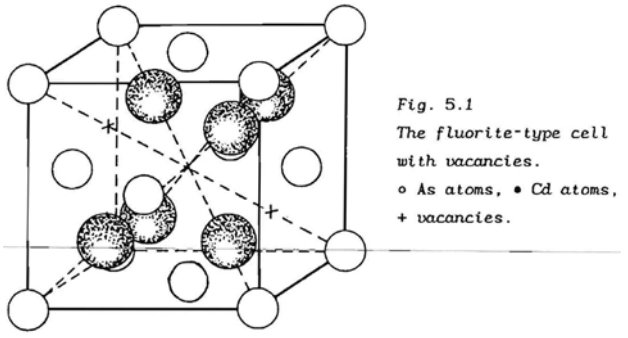


Рис. 1. Фрагмент элементарной кристаллической ячейки Cd_3As_2. Светлые шары – ионы As^{3-}, шары – ионы Cd^{2+}, крестиками обозначено расположение тетраэдрических вакансий.

Магнитная восприимчивость

При высоких температурах легированный европием образец диамагнитен. При температурах ниже 110 К парамагнитный вклад превалирует и быстро возрастает при дальнейшем понижении температуры. Однако, полагая, что диамагнетизм и парамагнетизм образца обусловлены различными электронными системами, мы можем вычесть диамагнитный вклад, считая его независящим от температуры. При таком подходе легко удаётся вычленить диамагнитный вклад. Парамагнитный вклад от локализованных магнитных моментов при температурах выше 130 К соответствует классическому антиферромагнетику с температурой упорядочения $T_{\text{AFM}} \approx 124$ К. Ниже температуры 110 К образец ведёт себя как классический ферромагнетик с $T_{\text{FM}} \sim 30$ К. Константа Кюри при понижении температуры ниже 110 К уменьшается в 1.7 раза. Упомянутый выше диамагнитный вклад составил $\chi_D \approx -2.65 \cdot 10^{-4}$ emu/mol и очень близок к диамагнитной восприимчивости висмута. Парамагнитный вклад при 300 К – $\chi_p \approx 1.33 \cdot 10^{-4}$ emu/mol. Сравнивая это значение, с магнитной восприимчивостью парамагнитного соединения $EuCl_2$ – $2.65 \cdot 10^{-2}$ emu/mol [14, 15] получаем оценку концентрации европия в образце $Cd_{3-x}Eu_xAs_2$, как x = 0.005 или 0.1 ат.% Eu. Из данных о намагниченности насыщения, соотношение ФМ и АФМ магнитных фаз оценивается, как 4:1.

Электронный спиновый резонанс

В экспериментах по поглощению СВЧ излучения X-диапазона (9.3 ГГц) измерены электронный спиновый резонанс на Eu^{2+} и полевая зависимость микроволнового поверхностного импеданса в чистых и легированных образцах. Измерения проводили в интервале температур 10–370 К и магнитных полей 0–1 Тл.

Образцы в форме порошка или взвеси порошка в парафине использовались с целью уменьшения влияния скин-слоя на интенсивность сигнала. В качестве контрольного образца в эксперименте применялся порошок тройного соединения из тех же компонент с другой

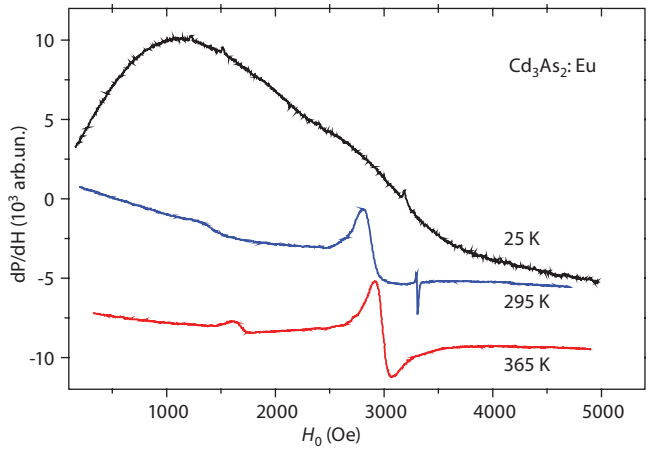


Рис. 2. Виды спектров ЭПР Eu^{2+} ионов в Cd_3As_2. Ясно видно, как при понижении температуры, производная поля поверхностного импеданса (магнетосопротивления) увеличивается, а ЭСР-сигналы исчезают. Характер нелинейности полевой производной поверхностного импеданса соответствует характеру магнетосопротивления на постоянном токе.

кристаллической структурой – $EuCd_2As_2$. При температурах заметно выше комнатной температуры спектр ЭСР образца, легированного европием, состоит из двух почти симметричных резонансных линий (см. рис. 2) с *g*-факторами вблизи 2.2 и 4.4, ширина и положение которых в первом приближении линейно зависят от температуры (см. рис. 3). При температурах ниже T_{c1} = 285 K обе линии прекращают изменение своего положения. Ниже 200 K резонансные линии катастрофически искажались и становились практически не наблюдаемыми. При низких температурах проявлялась очень сильная нелинейность полевой зависимости поверхностного импеданса (верхняя кривая на рис. 2), явно указывающая на нелинейность по полю сопротивления образца. При расплавлении и затвердевании парафина в магнитном поле образец приобретал текстуру и наблюдалась небольшая (~70 Э) анизотропия положения резонансной линии. Это свидетельствует о влиянии кристаллического поля на *g*-фактор иона Eu^{2+} и о сильной анизотропии магнитной восприимчивости легированных образцов Cd_3As_2 при высоких температурах.

Обсуждение

Для ионов, находящихся в S-состоянии, в частности, из группы редких земель Eu^{2+} и Gd^{3+}, имеющих конфигурацию $4f^7$, результирующий орбитальный момент их электронов равен нулю. Поэтому магнитное состояние данных ионов традиционно считается чисто спиновым состоянием с *g*-фактором, равным *g*-фактору свободного электрона – 2.0 и практически не подверженным влиянию орбитальных степеней свободы, связанных со свободными носителями заряда – электронами или дырками. По этой же причине электрическое поле кристалла не должно было бы расщеплять основные уровни этих ионов. На самом же деле, как было установлено из экспериментов и получило теоретическое обоснование, небольшие расщепления существуют [16–21]. Данное небольшое расщепление (порядка 10^{-3} базовой величины) имеет место даже для кубической симметрии кристалла, не говоря о симметриях более низкого порядка, тетрагональной или тригональной, и, особенно, при отсутствии центра инверсии. Расщепление зависит от расстояния до лигандов. Таким образом, магнитное состояние иона Eu^{2+} оказывается подверженным небольшому влиянию орбитальных степеней свободы в рядовых случаях, и, тем более, можно ожидать усиление этого влияния в случае обменного взаимодействия локализованного спина примесного иона со спином свободных носителей заряда, спины которых в случае дираковских квазичастиц жёстко связаны с их орбитальным движением. Ион Eu^{3+} не обладает магнитным моментом и не проявляется в магнитном резонансе, поэтому заметные отклонения *g*-фактора иона Eu^{2+}, как правило, вызываются состоянием с промежуточной валентностью, либо сильными обменными взаимодействиями. Это даёт основания ожидать, что полученные в эксперименте значения *g*-факторов и

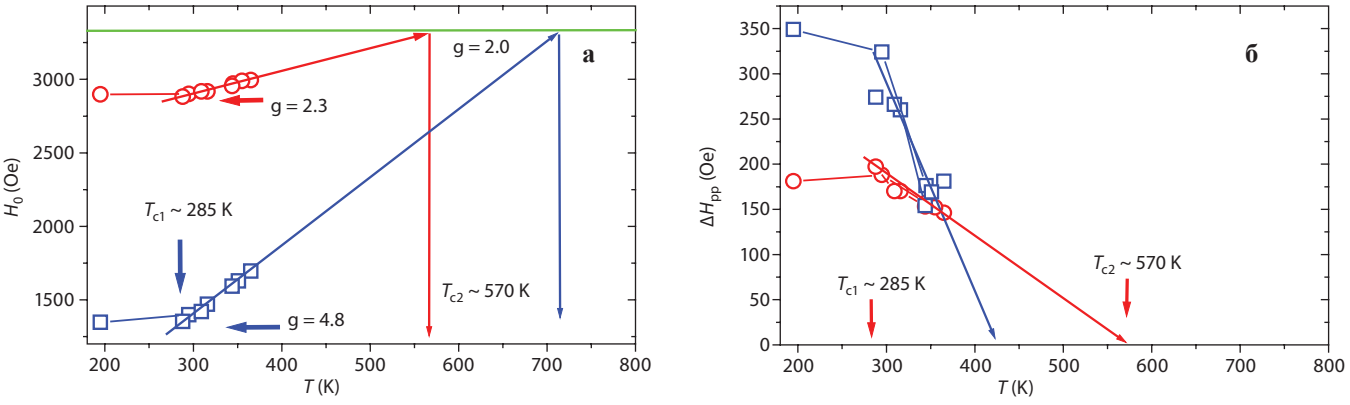


Рис. 3. а Температурные зависимости положения резонансных линий в ЭСР на Eu^{2+}. Длинные стрелки показывают температуры, при которых резонансные линии могли бы достигнуть позиции с *g*-фактором, равным 2.0. **б** Температурные зависимости пиковой ширины резонансных линий в ЭСР на Eu^{2+} в Cd_3As_2. Для основной линии (кружки) стрелки показывают температуры, при которой начинается линейная зависимость (T_{c1}) и при которой резонансные линии могли бы достичь позиции с *g*-фактором, равным 2.0 (T_{c2}).

их температурное поведение могут быть рассчитаны в рамках обосновываемого здесь сценария.

Для арсенида кадмия [22–24] характерны полиморфные превращения, происходящие по следующей схеме: α-Cd_3As_2 (503 К) → α′-Cd_3As_2 (738 К) → α″Cd_3As_2 (868 К) → β-Cd_3As_2. В работах [25, 26] показано, что образование твёрдых растворов Cd в α-Cd_3As_2 происходит путём заполнения вакантных мест в тетраэдрических пустотах (вакансиях) кристаллической решётки. Растворимость кадмия достигает 0.5 ат.% при 773 К и менее 0.1 ат.% при 298 К. Заметной растворимости мышьяка в α-Cd_3As_2 в данных работах обнаружено не было.

Учитывая, что растворимость кадмия в α-Cd_3As_2 в пределах 0.1–0.5 ат.%, будет эффективно приводить к соответствующему дефициту мышьяка в расчёте на формульную единицу, то факт обнаруженного дефицита по мышьяку, подтверждает размещение части ионов кадмия в тетраэдрических вакансиях кристаллической решётки и возможность их замещения двухвалентными ионами европия. Таким образом, размещение ионов европия возможно на месте "штатной" позиции иона кадмия и в тетраэдрических вакансиях. Вместе с тем растворимость кадмия (и, соответственно, европия) уменьшается с понижением температуры, и это должно приводить, с одной стороны, к увеличению напряжённости, вызываемой искажениями кристаллической решётки ионами примесей, а, с другой стороны, к образованию включений обогащённой европием другой фазы. Однако, на этот процесс накладываются диффузионные ограничения и более вероятным является обмен ионов европия из более тесных тетраэдрических вакансий с ионами кадмия в "штатных" позициях. Т.е. при комнатных температурах ион кадмия из "штатной" позиции вытесняется в ближайшую тетраэдрическую вакансию, а на его место встаёт ион европия.

Вполне вероятно, что, упомянутый в связи с оценкой концентрации электронов проводимости, отрыв у европия третьего электрона не происходит в полной мере и ион европия оказывается в состоянии с промежуточной валентностью, которое индицируется по соответствующему изменению *g*-фактора, возможность которого установлена ранее, например, в работах [18, 19]. Также очевидно, что третий валентный электрон европия может занять примесные донорные уровни в зоне проводимости, способствуя возникновению зонного магнетизма дираковского полуметалла и переходу в состояние полуметалла Вейля. Как упоминалось выше, изменение знака магнетосопротивления Cd_3As_2 после легирования указывает на это обстоятельство.

Сделанные выше замечания позволяют перейти к обсуждению собственно результатов измерения ЭСР. Как видно на рис. 3, температурное поведение положения и ширины резонансной линии чем-то напоминает поведение таковых при наличии сильного корринговского вклада. Однако, следует подчеркнуть, что для обычных металлов в этой области температур температурный коэффициент имеет противоположный знак, т.е. резонансная линия с повышением температуры уширяется, и условия наблюдения резонанса ухудшаются. При температуре T_{c1} = 285 К обе линии прекращают изменение своего положения, уширение их замедляется, что явно свидетельствует о прекращении действия факторов, обуславливающих сдвиг и уширение резонансных линий, и что при дальнейшем понижении температуры в действие вступают другие факторы. Т.е. соотношение темпов сдвига линий ЭСР или темпов их уширения примерно одинаково и составляет величину около 3.3, также как соотношение темпов сдвига и уширения для каждой линии также примерно одинаковое – 1.8. Совершенно подобное поведение двух резонансных линий однозначно указывает на их общий источник – ионы Eu^{2+}. Также не имеется и иных оснований не относить низкополевую линию к иону европия Eu^{2+} – в образце нет других примесей, сигнал от которых было бы возможно наблюдать при столь высоких температурах. Рентгеновские исследования показали структурную однофазность. Единственное концентрированное по европию соединение, которое могло бы образоваться за счёт неоднородного распределения европия, $EuCd_2As_2$, изучено и его спектр никак не соответствует наблюдаемым спектрам. Таким образом, дополнительную линию мы можем отнести только к иону европия и только к исследуемому соединению Cd_3As_2. Измерения интегральных интенсивностей спектров ЭСР порошков $Cd_{3-x}Eu_xAs_2$ и $EuCd_2As_2$ дают оценку содержания ионов Eu^{2+} $x \sim 0.005$–0.01. Соотношение интегральных интенсивностей резонансных линий 4.4 : 1 и на низкополевую линию мы можем отнести 0.02–0.03 ат.% Eu^{2+}, что, вообще говоря, соответствует приведённым выше литературным данным [25, 26] о равновесной доле ионов металла, попадающих в тетраэдрические вакансии. Сравнивая уровни легирования, оценённые из магнитной восприимчивости и сопротивления с уровнями легирования, оценёнными из ЭСР, а также соотношение магнитных фаз, оценённое из этих же измерений, заключаем, что данные оценки в пределах погрешности совпадают.

Таким образом, имеются все основания полагать, что дополнительная линия ЭСР, наблюдаемая при высоких температурах, относится к ионам европия, находящимся в тетраэдрических вакансиях и упорядочивающимся при низких температурах противоположно внешнему полю. Фаза представляет собой отдельные ионы Eu^{2+}, расположенные в тетраэдрических вакансиях, магнитные моменты которых связываются с близлежащими ионами Eu^{2+} в "штатных" позициях антиферромагнитным (АФМ) образом. Косвенное обменное взаимодействие между ионами Eu^{2+}, расположенными в "штатных" позициях на месте ионов Cd^{2+} имеет ферромагнитный характер. Другими словами, в арсениде кадмия, легированном европием имеются области, электроны в которых поляризуются магнитными ионами в тетраэдрических вакансиях АФМ-образом и области, поляризуемые ФМ-образом ионами европия, находящимися на "штатных" позициях ионов кадмия. Т.е. в результате размещения магнитных примесей в двух, вообще говоря, локально подобных позициях происходит пространственное расщепление

электронного спектра и арсенид кадмия приобретает свойства вейлевского металла.

Для более полного представления о процессах, происходящих в легированном магнитной примесью арсениде кадмия, следует рассмотреть вопрос о косвенных обменных взаимодействиях, действующих между магнитными ионами. Данные вопросы рассмотрены в выше упомянутой теоретической работе [11]. Согласно этой работе РККИ взаимодействие при значительном расстоянии R между магнитными ионами и равенстве констант J и λ обменных взаимодействий на узлах и между ними сводится к простому выражению, явно указывающему на дальнедействующую и осциллирующую природу этого взаимодействия.

При определённом расположении уровня Ферми, определяемого, в частности и концентрацией электронов, РККИ взаимодействие между магнитными примесями в дираковском металле становится не осциллирующим и ферромагнитным.

Оценка средних расстояний между ионами европия в $Cd_{3-x}Eu_xAs_2$ для $x = 0.005$ даёт величину около 40 Å, для ионов в "штатных" позициях ($x' = 0.004$), и для ионов в тетраэдрических вакансиях ($x'' = 0.001$) 60 Å. В то же время размер области, приходящейся на один электрон проводимости в легированном образце, определён нами как 44 Å. Таким образом, мы можем констатировать, что взаимодействие между магнитными ионами в исследуемых образцах простирается на довольно большие расстояния, сравнимые с типичной длиной когерентности сверхпроводника и имеет ферромагнитный знак для ионов Eu^{2+}, размещающихся на местах ионов Cd^{2+}.

Заключение

При легировании 3D топологического полуметалла α-Cd_3As_2 ионами европия обнаружено, что уже при комнатной температуре магнетосопротивление арсенида кадмия меняет знак и становится отрицательным. Измерения магнитной восприимчивости показали, что в образце имеются две магнитных фазы. Из данных ЭСР установлено, что эти фазы связаны с ионами Eu^{2+}, которые находятся в тетраэдрических вакансиях кристаллической решётки и на "штатных" позициях ионов Cd^{2+}. Последние при понижении температуры упорядочиваются вдоль внешнего магнитного поля, тогда как ионы Eu^{2+} в тетраэдрических вакансиях упорядочиваются против внешнего магнитного поля. Данное обстоятельство, как и изменение знака магнетосопротивления, по всей видимости, свидетельствует о том, что под влиянием магнитных примесей дираковский полуметалл α-Cd_3As_2 становится вейлевским полуметаллом.

Литература

1. Young S.M., Zaheer S., Theo J.C.Y., Kane C.L., Mele E.J.: Phys. Rev. Lett. **108**, 140405 (2012)
2. Borisenko S., Gibson Q., Evtushinsky D., Zabolotnyy V., Büchner B., Cava R.J.: Phys. Rev. Lett. **113**, 027603 (2014)
3. Ruderman M.A., Kittel C.: Phys. Rev. **96**, 99 (1954)
4. Bloembergen N., Rowland T.J.: Phys. Rev. **97**, 1679 (1955)
5. Kochelaev B.I., Tagirov L.R., Khusainov M.G.: Zh. Eksp. Teor. Fiz. **76**, 578 (1979) [Sov. Phys. JETP **49**, 291 (1979)
6. Khaliullin G.G., Kochelaev B.I.: Phys. Lett. A **106**, 318 (1984)
7. Коренблит И.Я., Шендер Е.Ф.: УФН. **126**, 233–268 (1978)
8. Altshuler T.S., Goryunov Yu.V., Bresler M.S.: Phys. Rev. **73**, 235210 (2006)
9. Chang Hao-Ran, et al.: arXiv:1509.04741v1 [cond-mat.mes-hall] 15 Sep 2015
10. Sun Jin-Hua, et al.: arXiv:1509.05180v1 [cond-mat.str-el] 17 Sep 2015
11. Chang Hao-Ran, Zhou Jianhui, Wang Shi-Xiong, Shan Wen-Yu, Xiao Di: Phys. Rev. B **92**, 241103(R) (2015)
12. Kogan E.: Graphene, **2**, 8 (2013)
13. Hulliger F., Vogt O.: Solid State Commun. **8**, 771 (1970)
14. Foëx G. (ed.): Tables de constantes et données numériques, 7. Constantes sélectionnées. Diamagnétisme et paramagnétisme. Verlag Masson & Cie.: Paris 1957.
15. Вонсовский С.В.: Таблицы физических величин. М.: 1976.
16. Леушин А.М.: ФТТ **5**(12), 3373 (1963)
17. Wybourne B.G.: Phys. Rev. **148**, 317 (1966)
18. Michels G., Roepke M., Niemöller T., Chefki M., Abd-Elmeguid M.M., Micklitz H., Holland-Moritz E., Schlabitz W., Huhnt C., Büchner B.: J. Phys.: Condens. Matter **8** 4055 (1996)
19. Kataev V., Khaliullin G., Michels G., Huhnt C., Holland-Moritz E., Schlabitz W., Mewis A.: J. Magnetism Magnet. Mater. **137**(1-2), 157 (1994)
20. Нейло Г.Н., Антоняк О.Т., Прохоров А.Д.: ФТТ, **43**(4), 627 (2001)
21. Nemkovski K.S., Kozlenko D.P., Alekseev P.A., Mignot J.-M., Menushenkov A.P., Yaroslavtsev A.A., Clementyev E.S., Ivanov A.S., Rols S., Klobes B., Hermann R.P., Gribanov A.V.: Phys. Rev. B **94**, 195101 (2016)
22. Бокий Г.Б.: Доклады академии наук СССР **195**, 603 (1970)
23. Pietraszko A., Lukaszewicz K.: Acta Crystallographica B **25**, 988 (1969)
24. Steigmann G.A., Goodyear J.: Acta Crystallographica B **24**, 1062 (1968)
25. Лазарев В.Б., Лужная Н.П., Маренкин С.Ф.: Неорганическая химия **17**(11) 3082 (1972)
26. Палкина К.К., Кузнецов В.Г., Лазарев В.Б.: Неорганическая химия **20**(8) 226 (1975)

Изучение диффузии лития в новом катодном материале $Li_{0.8}[Ni_{0.6}Sb_{0.4}]O_2$ методом ЯМР

Т. М. Салихов, Э. Р. Клышева, Е. Л. Вавилова

Лаборатория физики перспективных материалов

Методом ЯМР показано, что в соединении $Li_{0.8}Ni_{0.6}Sb_{0.4}O_2$ вакансии приводят к увеличению подвижности лития по сравнению со стехиометрическим образцом $LiNi_{2/3}Sb_{1/3}O_2$. Из температурной зависимости скорости релаксации, а также спектров ЯМР ядер лития была определена энергия активации.

1. Введение

Литий-ионные аккумуляторы играют важную роль в хранении и транспортировке электрической энергии. Они широко распространены в различных областях современной жизни, от мобильных устройств до автомобилей. Однако быстрое развитие науки и техники требует всё более и более эффективных накопителей энергии. Важным шагом для развития литий-ионных аккумуляторов является создание новых катодных материалов, так как катод отвечает за такие характеристики как плотность энергии, безопасность, токсичность и стоимость [1–3]. Большинство сегодняшних катодов относятся к такому классу соединений как слоистые оксиды переходных металлов, наиболее используемым является $LiCoO_2$. Однако, материалы основанные на Ni^{2+} привлекают к себе интерес в последние годы [4–7], так как никель является более дешёвым и менее токсичным чем кобальт.

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) широко применятся для исследования процессов диффузии в ионных проводниках, электролитах и электродных материалах [8–15]. Преимуществом данного метода является возможность изучения локальной подвижности ионов лития и отделение свойств вещества от свойств межгранулярных границ в поликристаллических материалах. Однако подобные ЯМР исследования осложняются в магнитных материалах, так как взаимодействия с парамагнитными ионами вносят большой вклад в параметры ЯМР [16, 17].

В этой работе была изучена диффузия ионов лития в катодном материале класса $LiM_{2/3}Sb_{1/3}O_2$ (M – 3d-металл) с вакансиями лития. В материалах этого класса кристаллическая структура состоит из плоскостей, где магнитный 3d-металл и сурьма составляют решётку типа пчелиных сот, чередующихся с плоскостями, занятыми ионами лития. Несмотря на выраженную квазидвумерность такой структуры, ионная подвижность в ней, как правило, невысока, так как позиции лития заполнены, и возможными являются только пути диффузии с достаточно высоким потенциальным барьером. Создание вакансий на позициях лития, по нашим предположениям, должно привести к существенному увеличению ионной подвижности. Для проверки этой гипотезы были синтезированы образцы соединения $Li_xNi_{(1+x)/3}Sb_{(2-x)/3}O_2$: одно с вакансиями ($x$ = 0.8) и второе без вакансий (x = 1).

2. Результаты

2.1. Спектры ЯМР

Для квадрупольных ядер ^{7}Li (I = 3/2) в спектре ЯМР монокристалла можно ожидать одну центральную линию и две линии квадрупольных сателлитов, порошковый спектр обычно демонстрирует усреднённую форму сателлитов, соответствующую разным ориентациям кристаллитов во внешнем магнитном поле. Тем не менее, в обоих образцах мы наблюдаем нерасщеплённый спектр, что свидетельствует о малости квадрупольного расщепления по сравнению с неоднородной шириной линии. При температурах от 300 до 450К спектр имеет Лоренцеву форму линии и позицию близкую к Ларморовской частоте. При понижении температуры форма линии изменяется на Гауссову и спектр сдвигается в область более низких полей.

На рис. 1 показана зависимость ширины линии ЯМР на ядре ^{7}Li в $Li_{0.8}Ni_{0.6}Sb_{0.4}O_2$ от температуры. При температурах ниже 250 К температурная зависимость ширины линии повторяет температурную зависимость статической магнитной восприимчивости, это означает что основным механизмом уширения спектра при данных температурах является сверхтонкое взаимодействие лития с парамагнитными ионами Ni^{2+}. При температурах выше 250 К наблюдается сужение линии ЯМР. Исследование стехиометрического соединения $LiNi_{2/3}Sb_{1/3}O_2$ демонстрирует аналогичное поведение формы линии при T < 250 К, но дополнительное сужение при 250 К > T > 450 К не наблюдается.

2.2. Ядерная релаксация

В оксидных магнитоконцентрированных материалах, к которым принадлежат исследуемые соединения, имеет смысл рассмотреть следующие механизмы ядерной спин-

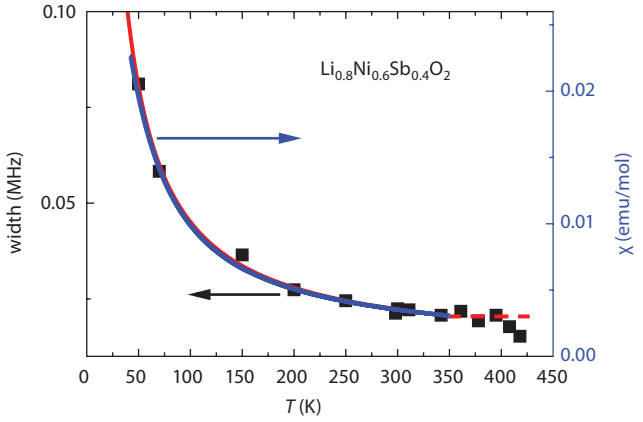


Рис. 1. Температурная зависимость ширины линии (квадратные символы), магнитной восприимчивости, измеренной при 0.7 Тл (синяя линия) и аппроксимация законом Кюри-Вейсса (красная линия).

решёточной релаксации, чья эффективность заведомо выше прочих: диполь-дипольное (сверхтонкое) взаимодействие с магнитными ионами, диполь-дипольное взаимодействие между ядрами лития, релаксация из-за движения ионов и квадрупольная релаксация. Эффективность механизма релаксации зависит от величины локального переменного поля на позиции ядра и частоты флуктуаций этого поля. Оценки температурно-независимой спин-решёточной релаксации за счёт взаимодействия ядер лития позволяют заключить, что вклад этого механизма наименьший из выше обозначенных четырёх. Магнитный момент Ni^{2+} примерно в 1000 раз больше чем магнитный момент ядер ^{7}Li, следовательно, магнитное поле индуцированное ионами никеля на позиции ядра лития гораздо больше, чем поле от других ядер лития, и данный вклад будет доминировать в парамагнетике. В то же время электронные флуктуации замедляются по мере понижения температуры, и их частота становится близкой к Ларморовской только при очень низких температурах, где механизм релаксации ядер через магнитную подсистему становится

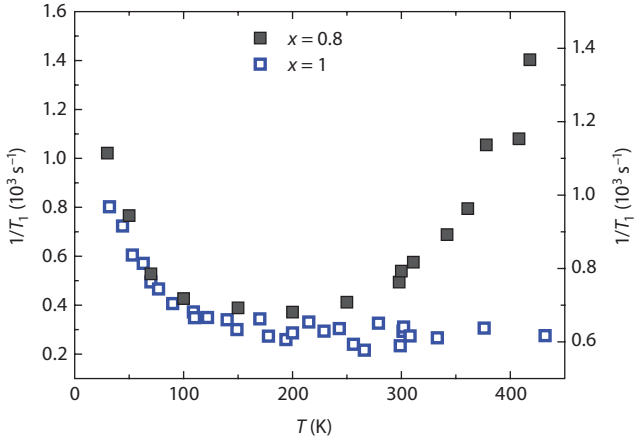


Рис. 2. Температурная зависимость скорости релаксации $1/T_1$, для $LiNi_{2/3}Sb_{1/3}O_2$ (открытые синие квадраты) и $Li_{0.8}Ni_{0.6}Sb_{0.4}O_2$ (закрытые чёрные квадраты) на частоте 12 МГц.

наиболее эффективным. При температурах много выше температуры магнитного упорядочения эффективность магнитного канала релаксации падает и становится сравнима с другими механизмами. Релаксация, вызванная движением ионов лития, обычно проявляется при температурах выше комнатной, когда ионы начинают двигаться достаточно быстро. И, наконец, квадрупольный механизм является в данном веществе, по-видимому, не очень эффективным из-за маленького квадрупольного расщепления вследствие достаточно симметричного кислородного окружения позиции лития. В дальнейших обсуждениях мы будем рассматривать только два вклада в релаксацию: взаимодействие с магнитными ионами и движение ионов лития.

Температурная зависимость скорости спин-решёточной релаксации ядер ^{7}Li $1/T_1$ в стехиометрическом соединении и структуре с недостатком лития показана на рис. 2. В $LiNi_{2/3}Sb_{1/3}O_2$ не наблюдается существенного изменения скорости релаксации от 120 до 450 К, что характерно для ядерной релаксации за счёт взаимодействия с магнитными ионами в парамагнетике при температурах много выше температуры Вейса. В соединении $Li_{0.8}Ni_{0.6}Sb_{0.4}O_2$ в области 70 К < T < 250 К релаксация также выходит на плато, но выше 250 К скорость релаксации начинает расти.

3. Обсуждение

При температурах выше 250 К скорость релаксации в $Li_{0.8}Ni_{0.6}Sb_{0.4}O_2$ возрастает, в то время как в $LiNi_{2/3}Sb_{1/3}O_2$ не изменяется. Причиной увеличения скорости релаксации является увеличение подвижности лития. В нестехиометрическом образце наличие вакансий на позиции щелочного металла снижает величину потенциального барьера и способствует увеличению вероятности перескока ионов при росте температуры. Скорость релаксации в таком случаем описывается теорией Бломбергена-Парселла-Паунда (BPP) и достигает максимума, когда время корреляции перескока ионов τ_0 равно обратной частоте ядерного магнитного резонанса $1/\omega_L$. Время корреляции подчиняется закону Аррениуса

$$\tau^{-1} = \tau_0^{-1}\left(\exp\left\{-\frac{E_a}{k_b T}\right\}\right), \qquad (1)$$

где E_a – энергия активации. Скорость ядерной спин-решёточной релаксации из-за подвижности ядер для $T < T_{max}$ описывается формулой [12]:

$$\frac{1}{T_{1diff}} = \omega_L^2\left(\exp\left\{-\frac{E_a}{k_b T}\right\}\right). \qquad (2)$$

Полная скорость ядерной спин-решёточной релаксации в парамагнетике складывается из диффузионного и магнитного вкладов

$$T_1^{-1} = T_{1diff}^{-1} + T_{1mag}^{-1}. \qquad (3)$$

Магнитная релаксация пропорциональна магнитной восприимчивости ионов Ni^{2+} [20–22], которая подчиняется закону Кюри-Вейсса. Когда температура существенно выше температуры Кюри, можно принять $T = const$. Тогда

$$\frac{1}{T_1} = \omega_L^2 \left(\exp\left\{ -\frac{E_a}{k_b T} \right\} \right) + const \,, \qquad (4)$$

где за значение константы примем значение T_1^{-1} при T = 200 К. Подобная процедура была предложена в работе Sugiyama и др. для интерпретации данных мюонной спектроскопии в парамагнитном Li_2MnO_3 [23]. Из экспериментальных данных было получено значение энергии активации ионов лития в $Li_{0.8}Ni_{0.6}Sb_{0.4}O_2$ (рис. 3), составившее 0.25 эВ. Максимума скорости релаксации T_1^{-1}, где выполняется условие $\tau_0 = 1/\omega_L$, достичь не удалось, поэтому определить время корреляции и коэффициент самодиффузии не представляется возможным.

Другой способ определить энергию активации – это исследование температурной зависимости ширины линии ЯМР. При температуре выше 250 К в образце с вакансиями лития наблюдается сужение линии ЯМР (рис. 1), это явление вызвано усреднением локальных полей на позициях ядер молекулярным (ионным) движением. В таком случае можно определить энергию активации из температурной зависимости ширины линии [24]. Мы использовали формулу, предложенную Wilkening Martin и др. [14] для диамагнетиков, и добавили к ширине линии в жёсткой решётке дополнительный член, который отвечает за неоднородное уширение линии за счёт взаимодействия с парамагнитными ионами. Этот вклад пропорционален магнитной восприимчивости при высоких температурах. Таким образом получаем формулу для ширины линии:

$$\Delta\nu = \left(k\left(\frac{1}{T}\right) + \nu\Delta_R \right) \times \left[1 + \left(\frac{k\left(\frac{1}{T}\right) + \nu\Delta_R}{B} - 1 \right) \exp\left\{ -\frac{E_a}{k_b T} \right\} \right]^{-1} + C \,, \qquad (5)$$

где $\Delta\nu$ – ширина линии при температуре T, $\nu\Delta$ и B – параметры, определяющие ширину линии в жёсткой решётке, C – малая добавка в ширину линии вызванная возможной неоднородностью постоянного магнитного поля. Аппроксимация формулой 5 даёт нам энергию активации (рис. 4) E_a = 0.35 эВ.

Третий возможный способ определить энергию активации - это эмпирическое выражение Вох-Федина [25].

$$E_a = (1.617 \cdot 10^{-3}) T_c, \qquad (6)$$

где E_a – энергия активации в эВ, T_c – установление режима усреднения движением. Взяв T_c = 250 К, получаем E_a = 0.323 эВ. Авторы работ [14, 25, 26] отмечают что феноменологическое уравнение (5) и эмпирическое выражение (6) обычно дают значение выше, чем значение энергии активации, полученное из анализа скорости релаксации, являясь неплохими методами для оценки величины энергии активации, но проигрывающими в точности релаксационному методу.

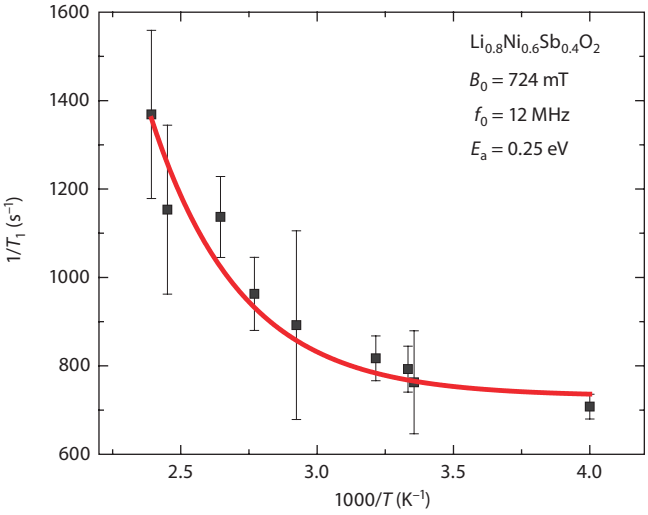


Рис. 3. Скорость релаксации T_1 как функция от 1000/T. Красная линия результат аппроксимации формулой 4.

Суммируя всё вышесказанное можно сделать вывод, что вакансии кристаллической структуры, которые образуются в соединении $Li_{0.8}Ni_{0.6}Sb_{0.4}O_2$, приводят к увеличению подвижности ионов лития. Полученные значения энергии активации самодиффузии лития являются сравнимыми с результатами полученными другими методами для слоистых литиевых соединений [4, 27], что показывает перспективность поиска эффективных катодных материалов среди соединений класса $LiM_{2/3}Sb_{1/3}O_2$ (M – 3d-металл) с нарушенной стехиометрией. К сожалению, мы не смогли определить коэффициент самодиффузии и получить информацию о возможных путях диффузии из-

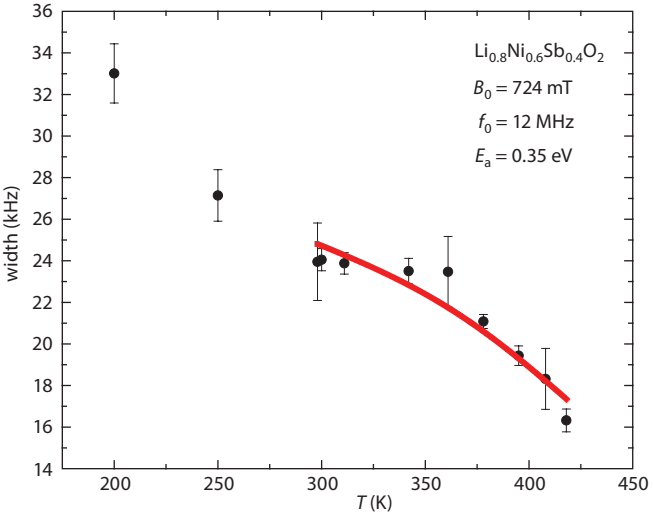


Рис. 4. Ширина линии ЯМР как функция от температуры.

за технических ограничений в температурном диапазоне. Измерение релаксации во вращающейся системе координат может помочь в решении этой проблемы.

Авторы благодарны доц. ЮФУ В. Б. Налбандяну за предоставленные образцы и доц. МГУ Е. А. Зверевой за помощь в измерении магнитной восприимчивости.

Литература

1. Croguennec L., Palacin M.R.: J. Am. Chem. Soc. **137**, 3140–3156 (2015)
2. Crabtree G., Kocs E., Trahey L.: MRS Bull. **40**, 1067–1076 (2015)
3. Bensalah N., Dawood H.: J. Mater Sci. Eng. **5**, 1000258 (2016)
4. Ma X., Kang K., Ceder G., Meng Y.S.: J. Power Sources **173**, 550–555 (2007)
5. Cui P., Jia Z., Li L., He T.: J. Phys. Chem. Solids **72**, 899–903 (2011)
6. Twu N., Li X., Urban A., Balasubramanian M., Lee J., Liu L., Ceder G.: Nano Lett. **15**, 596–602 (2015)
7. Yang Z., Zhang Z., Pan Y., Zhao S., Huang Y., Wang X., Chen X., Wie S.: J. Solid State Chem. **244**, 52–60 (2016)
8. Langer J., Wilkening M.: Solid State Ionics **293**, 85–93 (2016)
9. Nakhal S., Wiedemann D., Stanje B., Dolotko O., Wilkening M., Lerch M.: J. Solid State Chem. **238**, 60–67 (2016)
10. Walter S., Wilkening M.: Solid State Ionics **287**, 77–82 (2016)
11. Wohlmuth D., Epp V., Wilkening M.: ChemPhysChem **16**(12), 2582–2593 (2015)
12. Heitjans P., K?rger J. (eds.): Diffusion in condensed matter: methods, materials, models. Springer Science & Business Media (2006)
13. Paris M.A., Sanz J., Leon C., Santamar?a J., Ibarra J., V?rez A.: Chemistry of materials **12**(6), 1694–1701 (2000)
14. Wilkening M., Bork D., Indris S., Heitjans P.: Phys. Chem. Chem. Phys. **4**(14), 3246–3251 (2002)
15. Verhoeven V.W.J., De Schepper I.M., Nachtegaal G., Kentgens A.P.M., Kelder E. M., Schoonman J., Mulder F.M.: Phys. Rev. Lett. **86**(19), 4314 (2001)
16. Grey C.P., Dupr? N.: Chem. Rev. **104**(10), 4493–4512 (2004)
17. Tomeno I., Oguchi M.: J. Phys. Soc. Jpn. **67**, 318 (1998)
18. Zvereva E.A., Evstigneeva M.A., Nalbandyan V.B., Savelieva O.A., Ibragimov S.A., Volkova O.S., Medvedeva L.I., Vasiliev A.N., Klingeler R., B?chner B.: Dalton Trans. **41**(2), 572–580 (2012)
19. Zvereva E.A., Stratan M.I., Ovchenkov Y.A., Nalbandyan V.B., Lin J.Y., Vavilova E.L., Iakovleva M.F., Abdel-Hafiez M., Silhanek A.V., Chen X.-J., Stroppa A., Picozzi S, Jeschke H.O., Valent? R. Vasiliev A.N.: Phys. Rev. B **92**, 144401 (2015)
20. Iakovleva M.F., Vavilova E.L., Grafe H.J., Maljuk A., Wurmehl S., B?chner B., Kataev V.: Appl. Magn. Reson. **47**, 727 (2016)
21. Arango Y.C., Vavilova E., Abdel-Hafiez M., Janson O., Tsirlin A.A., Rosner H., Drechsler S.-L., Weil M., N?nert G., Klingeler R., Volkova O., Vasiliev A., Kataev V., B?chner B.: Phys. Rev. B **84**(13), 134430 (2011)
22. Moriya T.: Progress of Theoretical Physics **16**(1), 23–44 (1956)
23. Sugiyama J., Mukai K., Nozaki H., Harada M., M?nsson M., Kamazawa K., Andreica D., Amato A., Hillier A.D.: Phys. Rev. B **87**(2), 024409 (2013)
24. Heitjans P., Indris S.: J. Physics: Condens. Matter **15**(30), R1257 (2003)
25. Waugh J.S., Fedin E.I.: Soviet Physics-Solid State **4**(8), 1633–1636 (1963)
26. Kuhn A., Narayanan S., Spencer L., Goward G., Thangadurai V., Wilkening M.: Phys. Rev. B **83**(9), 094302 (2011)
27. Okubo M., Tanaka Y., Zhou H., Kudo T., Honma I.: J. Phys. Chem, B **113**(9), 2840–2847 (2009)

ЭПР исследование магнитоупорядоченных фаз в кристаллах Bi_2Te_3, легированных марганцем

В. О. Сахин, Е. Ф. Куковицкий, Н. М. Лядов, В. А. Шустов, Н. Н. Гарифьянов, Ю. И. Таланов, Г. Б. Тейтельбаум

Лаборатория физики перспективных материалов; отдел химической физики, лаборатория физики углеродных наноструктур и композитных систем; отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной физики

В работе представлены результаты изучения особенностей магнитного состояния кристаллов топологических изоляторов Bi_2Te_3, допированных магнитными ионами марганца. Из сравнительного анализа данных магнитного резонанса и SQUID магнитометрии получены детали фазовой диаграммы, выявлены возможности фазового расслоения и образования магнитных текстур в топологических изоляторах с магнитными примесями. Результаты ЭПР исследования, такие как угловая и температурная зависимости резонансного поля, обнаружили специфическое критическое поведение и подтвердили наличие ферромагнитного упорядочения магнитных моментов ионов Mn даже при невысоком уровне допирования.

Введение

Допированные магнитными ионами топологические изоляторы привлекают к себе внимание исследователей по двум причинам. Во-первых, ожидают, что такое допирование приведёт к нарушению симметрии системы по отношению к обращению времени, благодаря поляризации примесных магнитных ионов, и обнаружит новый класс квантового поведения (смотри, например, обзорную статью [1]). Вторая причина связана с постоянным интересом к фазовым переходам в магнито-разбавленных системах (см. обзор [2]). Важно отметить, что в обоих случаях внедрённые магнитные ионы играют роль локальных спиновых зондов, которые могут быть использованы как чувствительный инструмент для мониторинга локальных свойств системы. Такая возможность реализована в нашей работе, которая сфокусирована на изучении магнитных свойств кристаллов Bi_2Te_3, допированных ионами Mn, с использованием техники электронного спинового резонанса (ЭСР).

Существует много публикаций, посвящённых исследованию топологических изоляторов Bi_2Se_3 и Bi_2Te_3 с примесями переходных элементов. Среди них ионы Mn [3–5], Fe [3, 6], Cu [7, 8] и Cr [9–11]. Их исследование, выполненное в основном методами магнитометрии, показали, что замена ~2% висмута на марганец может привести к установлению ферромагнитного состояния с упорядочением примесных ионов при низких температурах [4].

Магнитные свойства примесных ионов сильно зависят от электронных свойств исходного соединения [12–15]. Известно, что ионы марганца в структуре топологических изоляторов Bi_2Se_3 и Bi_2Te_3 занимают положение ионов Bi [5]. Они имеют высокоспиновую конфигурацию с $S = 5/2$ вне зависимости от типа проводимости образца (электронная или дырочная) [16]. Непрямое обменное взаимодействие между ионами Mn типа Рудермана-Киттеля-Косуи-Иосиды может привести к магнитному упорядочению [7]. Величина этого взаимодействия очень чувствительна к особенностям зонной структуры в области уровня Ферми. Яркий пример такой чувствительности обнаружен в магнитных свойствах упомянутых выше соединений. Оба материала (Bi_2Se_3 и Bi_2Te_3) относятся к одному классу трёхмерных топологических изоляторов. Они имеют одинаковую структуру и в то же время проявляют совершенно разные магнитные свойства при допировании магнитными ионами Mn. Если в первом соединении магнитное упорядочение обнаруживается только при замене 25% висмута на марганец и при температуре ниже 2 К, то второе становится ферромагнитным при $x > 0.02$, а температура Кюри достигает 12 К при $x \sim 0.05$. Недавно было показано [14], что эта разница обусловлена немагнитной энергетической щелью в области дираковской точки в случае Bi_2Se_3, которая подавляет магнитные корреляции в этом соединении. Вследствие этого ЭПР исследование ионов Mn в этом соединении обнаруживает тонкую структуру спектра [16], которая характерна для случая, когда обменные корреляции между спинами неэффективны. Учитывая отмеченные обстоятельства, мы выбрали в качестве объекта нашего исследования допированное марганцем соединение Bi_2Te_3, которое проявляет магнитные корреляции и магнитное упорядочение ионов Mn.

Результаты и обсуждение

Монокристаллические образцы $Bi_{2-x}Mn_xTe_3$ выращивались в кварцевых тиглях при повышенном давлении (~2 атм) инертного газа методом медленного охлаждения расплава в температурном градиенте с аксиальной симметрией. Концентрация марганца в исходной смеси соответствует двум номинальным значениям $x = 0.005$ и 0.05. Кристаллы легко расщепляются на тонкие пластины вдоль кристаллографической плоскости *ab*. Типичные размеры исследованных образцов 5x2x0.1 мм^3.

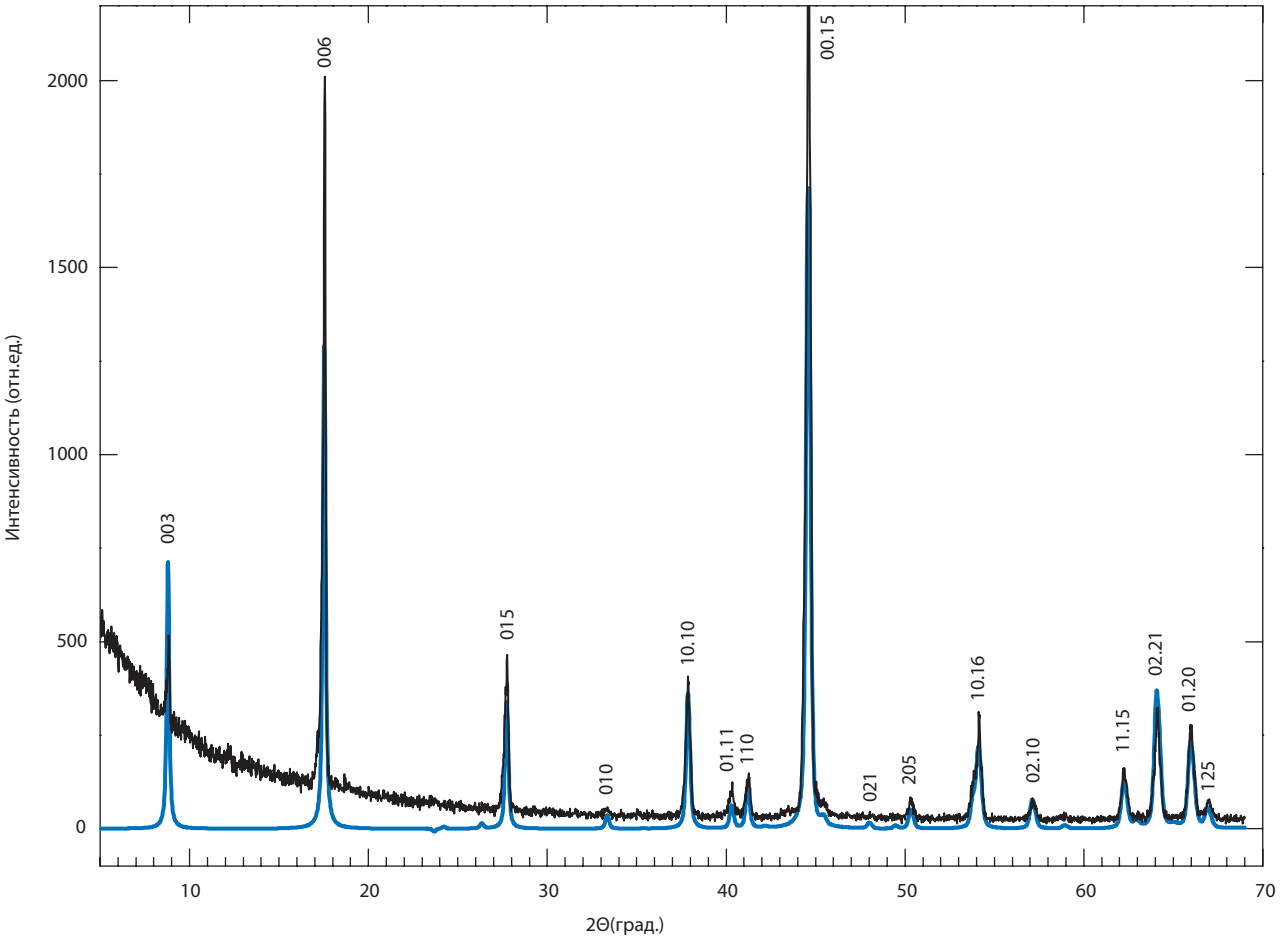


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма образца $Bi_{2-x}Mn_xTe_3$ с $x = 0.05$ (чёрная линия). Рассчитанный спектр показан толстой голубой кривой. Расчёт выполнен с помощью программы MAUD (v.2.71) [17] с использованием параметров кристаллической решётки Bi_2Te_3 из открытой базы данных COD [18]. В расчётах учитывалась текстура порошкового образца.

Для определения фазового состава образцов мы использовали рентгеновскую дифрактометрию (РДМ) и энергодисперсионную электронную спектроскопию (ЭДС). Рентгеновский фазовый анализ выполнялся на дифрактометре ДРОН-7 с длиной волны 1.54 Å (Cu Kα) на образцах, размолотых в порошок. Он показал наличие единственной фазы, – Bi_2Te_3. Допирование кристаллов марганцем вплоть до концентраций $x = 0.05$ не вносит заметных изменений в дифрактограмму (рис. 1).

Для выполнения ЭДС анализа использовался электронный микроскоп Carl Zeiss EVO 50 XVP. Анализ показал, что элементы Bi, Te и Mn присутствуют в образце $Bi_{2-x}Mn_xTe_3$ с $x = 0.05$ в соотношении 40.0:58.9:1.1 атомных %, что соответствует химической формуле $Bi_{1.95}Mn_{0.05}Te_{2.87}$. Это означает, что после процедур синтеза соединения и выращивания кристаллов соотношение между содержанием Bi и Mn остается таким же, как в исходной шихте, 40:1, а содержание Te немного снижается (2.87 вместо 3). Вероятно, это происходит вследствие испарения теллура в процессе синтеза соединения.

Добавление марганца в соединение Bi_2Te_3 приводит к изменению его электронных и магнитных свойств. В частности, растёт его удельное сопротивление ρ. Измерение сопротивления в нашей работе проводилось стандартным четырёхконтактным методом. Контакты были изготовлены с помощью проводящей серебряной пасты. Результаты измерений показали, что зависимость $\rho(T)$ имеет металлический характер. Известно, что чистые беспримесные кристаллы Bi_2Te_3 хорошо проводят электрический ток благодаря наличию большого числа структурных дефектов, таких как вакансии висмута [19]. Чтобы получить образцы с большим электрическим сопротивлением и проводимостью активационного (полупроводникового) типа, необходимо вводить неизовалентные примеси, компенсирующие свободные нелокализованные заряды. Именно таким образом действует примесь марганца.

Измерения намагниченности проводились с использованием SQUID-магнетометра в магнитном поле, параллельном плоскости *ab* кристалла, напряжённостью около 1 кЭ, в диапазоне температур от 4 до 40 К. Образцы с малой концентрацией марганца ($x = 0.005$) имеют парамагнитную восприимчивость χ во всём диапазоне температур измерения, то есть величина χ^{-1} линейно зависит от температуры. Увеличение концентрации Mn приводит к изменению характера зависимости $\chi^{-1}(T)$. Ниже 15 К она отклоняется от линейного хода (рис. 2),

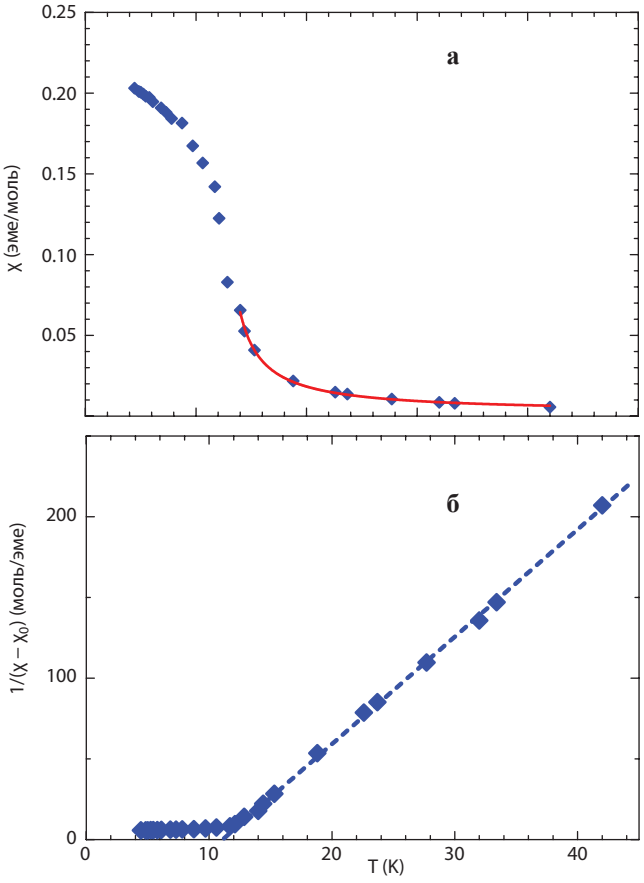


Рис. 2. а Температурная зависимость магнитной восприимчивости кристалла $Bi_{1.95}Mn_{0.05}Te_3$, полученная с помощью SQUID-магнетометра в поле 800 Э, параллельном кристаллографичес-кой оси *ab*. Сплошная кривая рассчитана по формуле (1). **б** Обратная величина восприимчивости в зависимости от температуры.

и появляются признаки ферромагнитного упорядочения. Выше 15 К магнитная восприимчивость изменяется в соответствии с законом Кюри-Вейса:

$$\chi(T) = \chi_0 + \frac{C}{T - \Theta}. \qquad (1)$$

Здесь χ_0 – температурно-независимый вклад; Θ – параметр Кюри-Вейса; $C = N_A(\mu_B\mu)^2 c/3k_B$ – константа Кюри. Она включает в себя число Авогадро N_A, магнетон Бора μ_B, эффективный магнитный момент ионов марганца μ и константу Больцмана k_B.

Кривая на рис. 2а вычислена с помощью уравнения (1) с параметрами: $\chi_0 = 0.002$ эме/моль, $\Theta = 12$ К, и $C = 0.13$. Последняя величина соответствует эффективному магнитному моменту $\mu = 4.6$. Отметим, что она хорошо согласуется с оценкой магнитного момента иона марганца [4] в $Bi_{2-x}Mn_xTe_3$ при $x \geq 0.02$. Температуру Кюри T_c мы определяли в точке перегиба термомагнитной кривой $\chi(T)$ (рис. 2а). Для образца с $x = 0.05$ её оценка даёт 11.8 К.

Спектры электронного спинового резонанса (ЭСР) записывались с помощью спектрометра Bruker BER-418s, работающего в X-диапазоне частот (~9.5 ГГц). В спектрометре используется модуляция магнитного поля с частотой 100 кГц и амплитудой от 0.1 до 10 Э, а также система синхронного детектирования и усиления сигнала. Температура образца изменяется в пределах от 8 до 300 К с помощью проточного гелиевого криостата. При этом сохраняется возможность изменять угол θ между плоскостью *ab* образца и направлением постоянного магнитного поля в пределах 360°.

Сигналы ЭСР ионов Mn наблюдаются только в образцах с большой концентрацией марганца ($x = 0.05$). (Для образцов с $x = 0.005$ наблюдается только слабый сигнал в поле, соответствующем $g \approx 2.0$, обусловленный наличием парамагнитных центров в кварцевой ампуле, в которую помещался образец.) В спектре ЭПР кристалла $Bi_{1.95}Mn_{0.05}Te_3$ присутствуют два разных по поведению сигнала (см. рис. 3). Они наблюдаются в различных комбинациях в зависимости от внешних условий, таких, как температура и ориентация образца во внешнем магнитном поле. Их параметры (ширина, интенсивность, резонансное поле) изменяются по-разному, свидетельствуя о том, что они обусловлены разными парамагнитными центрами.

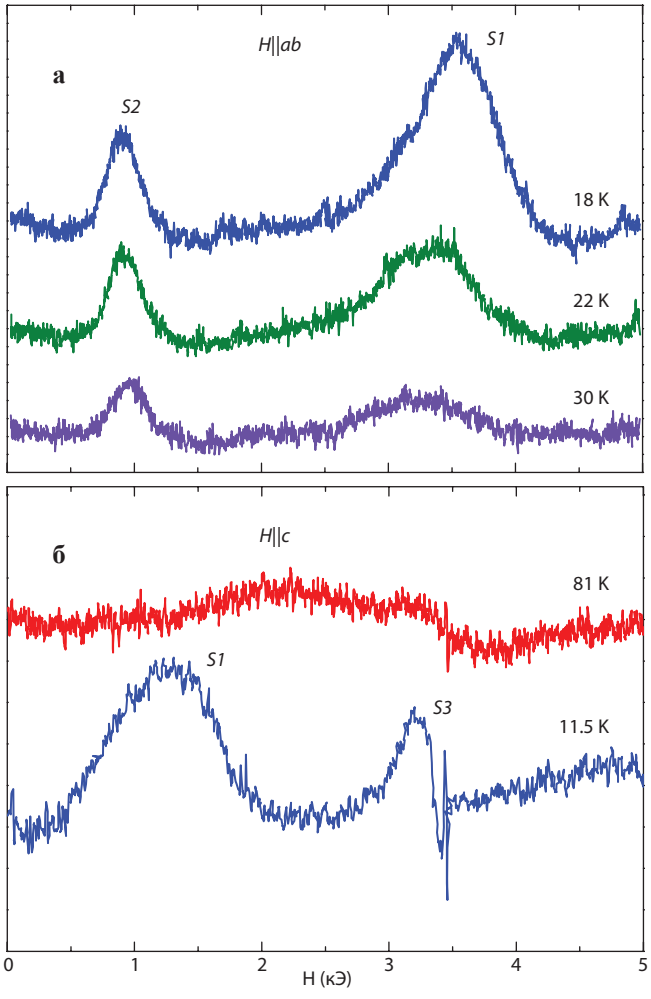


Рис. 3. Спектры ЭСР кристалла $Bi_{1.95}Mn_{0.05}Te_3$ в магнитном поле параллельном плоскости *ab* (**a**) и перпендикулярном ей (**b**). Сигнал *S3* обусловлен парамагнитными центрами кварцевой ампулы, в которую помещён образец.

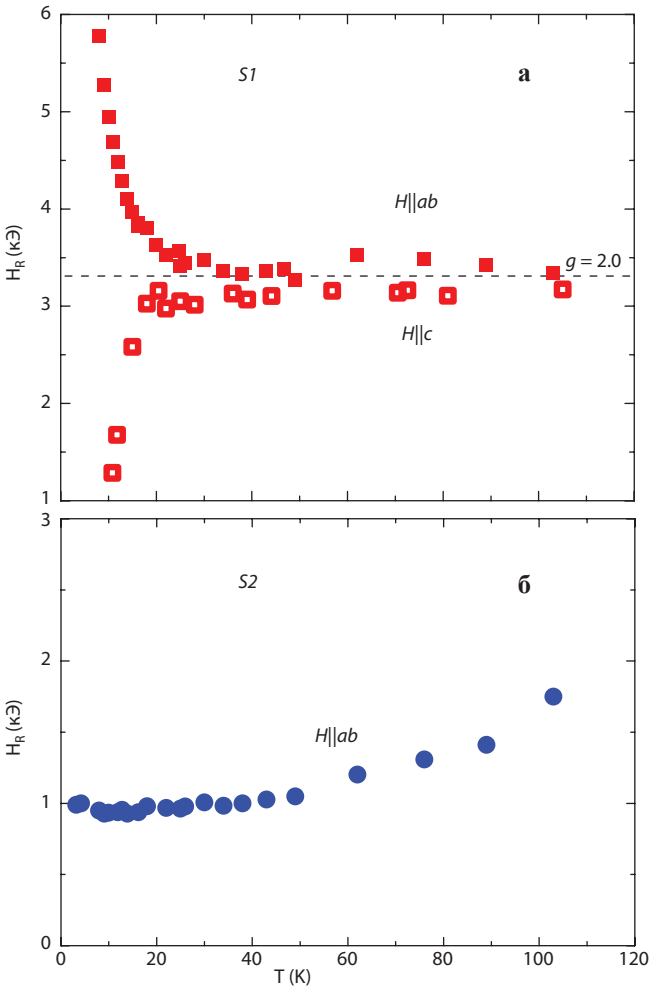


Рис. 4. Температурная зависимость резонансных полей сигналов *S1* (**а**) и *S2* (**б**) спектра кристалла $Bi_{1.95}Mn_{0.05}Te_3$ в параллельной (заполненные символы) и перпендикулярной (пустые символы) ориентациях. Для сигнала *S2* приведены данные только для параллельной ориентации, поскольку при $H \perp ab$ он частично или полностью находится за пределами наблюдения (доступных магнитных полей).

Ниже мы последовательно рассмотрим эти сигналы, их поведение и природу.

Резонансный сигнал, обозначенный как "*S1*" на спектрах Рисунка 3а и 3б, располагается в поле, соответствующем $g \approx 2$ при любой ориентации в температурном диапазоне от 15 до 110 К. Выше 110 К сигнал *S1* слабеет настолько, что его невозможно выделить и анализировать. Как видно на рис. 3 и 4, ниже 15 К он быстро смещается в сторону высоких полей в параллельной ориентации (внешнее магнитное поле лежит в плоскости кристалла $Bi_{1.95}Mn_{0.05}Te_3$, $H_0 \| ab$) и в сторону низких полей в перпендикулярной ориентации ($H_0 \perp ab$ и $H_0 \| c$). Необходимо отметить, что сигналы имеют асимметричную форму. Это особенно явно выражено при $H_0 \| ab$. Есть два источника искажения формы линии: (1) высокая проводимость материала и скин-эффект приводят к ассиметричной линии дайсоновского типа; (2) неоднородная намагниченность, обусловленная размагничивающими полями, индуцирует разные внутренние поля в разных частях образца. Чтобы получить значения параметров резонансной линии, мы проводили её численное моделирование в виде суммы лоренцевых функций поглощения и дисперсии с определёнными весовыми коэффициентами. Один из параметров моделирования, – резонансное поле H_R, построен в зависимости от температуры и ориентации образца на рис. 4 и 5.

Рассмотрим температурную зависимость резонансного поля сигнала *S1* (рис. 4а). Ниже будет показано, что он обусловлен ионами марганца, замещающими Bi в кристаллической решётке соединения Bi_2Te_3. Растущее отклонение величины резонансного поля от практически постоянного "парамагнитного" значения при охлаждении ниже 15 К свидетельствует о появлении ферромагнитно-коррелированных участков образца. Когда время их жизни превышает период колебаний резонансного СВЧ поля (~10^{-10} $с^{-1}$), они индуцируют дополнительное поле (поле одноосной анизотропии H_A) в местах локализации магнитных моментов. В результате при фиксированной частоте спектрометра резонансные условия будут вы-

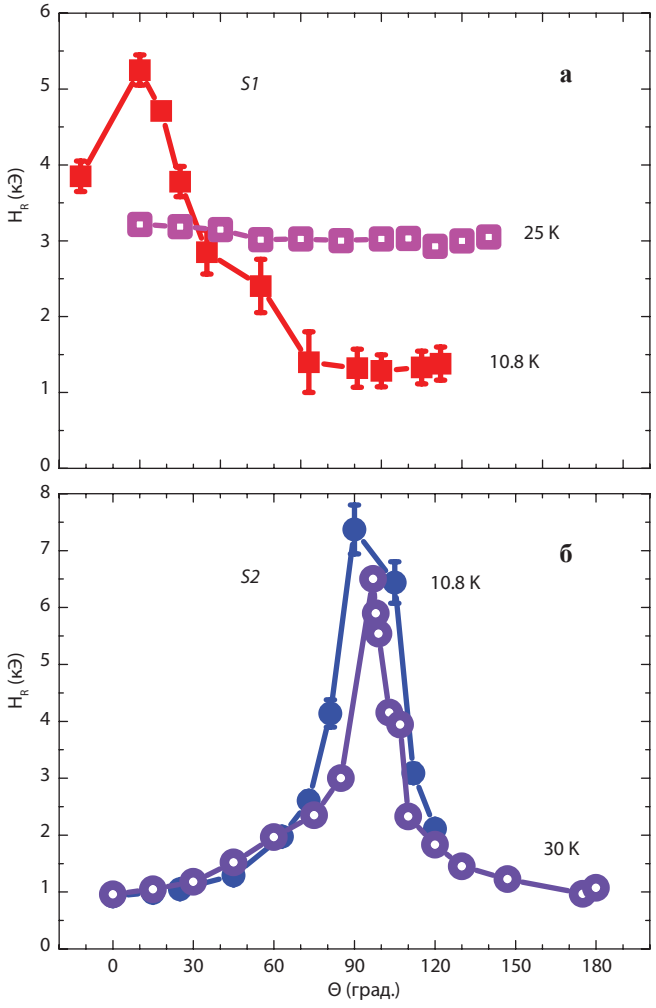


Рис. 5. Угловая зависимость резонансного поля сигналов *S1* (**а**) и *S2* (**б**). Образец – $Bi_{1.95}Mn_{0.05}Te_3$. Линии, соединяющие символы, нарисованы для удобства рассмотрения.

полняться при значении внешнего магнитного поля H_R, которое отличается от резонансного поля иона Mn в чисто парамагнитном состоянии.

В параллельной ориентации, когда внешнее магнитное поле направлено параллельно плоскости *ab* и перпендикулярно тетрагональной оси *c* (типичный случай одноосного поля), величина резонансного поля H_R определяется следующим выражением:

$$(\omega_0/\gamma_\perp)^2 = H_R(H_R - 2H_A) \quad (2)$$

при условии, что $H_R > 2H_A$. Здесь $\omega_0/\gamma_\perp$ – резонансное поле одиночного парамагнитного иона Mn, которое определяется частотой спектрометра ω_0 и гиромагнитным отношением для поля, перпендикулярного тетрагональной оси, $g_\perp$ – g-фактор иона Mn, μ_B – магнетон Бора, $\hbar$ – постоянная Планка.

В случае перпендикулярной ориентации ($H\perp ab$) выражение для резонансного поля имеет следующий вид:

$$\omega_0/\gamma_{||} = H_R + 2H_A, \quad (3)$$

где $\gamma_{||} = g_{||}\mu_B/\hbar$ и $g_{||}$ – величины, характерные для направления вдоль тетрагональной оси. Сдвиг сигнала от положения, характерного для парамагнитного резонанса, определяется температурной зависимостью поля анизотропии $H_A(T)$. Легко увидеть, что в соответствии с уравнениями (2) и (3) резонансный сигнал должен сдвигаться в противоположных направлениях для этих двух ориентаций, что и обнаруживается экспериментально (см. рис. 4а).

Величину возможного эффекта размагничивающего поля можно оценить, используя результаты измерения намагниченности, выполненные с помощью SQUID магнетометра. Для параллельной ориентации при T = 10.8 К величина восприимчивости (рис. 2а) даёт $4\pi M$ = 96 Э, в то время, как резонансное поле H_R = 5200 Э. Эти оценки ясно показывают, что положение резонансной линии определяется именно полем анизотропии $H_A(T)$, а не размагничивающим полем (при T = 10.8 К H_A = 3200 Э).

На рис. 5а представлена угловая зависимость резонансного поля сигнала *S1* при температурах 10.8 К и 30 К. Видно, что ниже температуры Кюри (T_c = 11.8 К) величина H_R изменяется в широких пределах при изменении ориентации образца по отношению к направлению внешнего магнитного поля. То есть, сигнал *S1* проявляет свойства, присущие ферромагнитному состоянию. При $T > T_c$ (в частности, при T = 25 К) угловая зависимость сигнала *S1* становится на порядок слабее, что характерно для парамагнитного состояния. Таким образом, анализ данных указывает на ферромагнитное упорядочение магнитных моментов ионов марганца в кристаллической решётке соединения $Bi_{2-x}Mn_xTe_3$ при x = 0.05 и $T < T_c$. Прямое обменное взаимодействие при таких концентрация ионов Mn^{2+} достаточно слабо. Поэтому их магнитное упорядочение можно объяснить косвенным обменным взаимодействием через носителей тока типа Рудермана-Киттеля-Косуи-Иосиды [12, 13]. Кроме того, РККИ обмен исключает тонкую структуру спектров ЭПР, которая наблюдается в соединении $Bi_{2-x}Mn_xSe_3$ [16]. Магнитные свойства соединения $Bi_{2-x}Mn_xSe_3$ существенно отличаются от таковых в $Bi_{2-x}Mn_xTe_3$. Благодаря наличию немагнитной энергетической щели в окрестности уровня Ферми [14], непрямая связь и обменные корреляции в первом соединении существенно подавлены. Это и приводит к столь разному поведению ЭСР ионов Mn в этих соединениях.

Спектры ЭСР ионов марганца, внедрённых в матрицу Bi_2Se_3, были детально изучены в работе [16]. В этой статье помимо детального описания тонкой структуры спектров были получены величины параметров спин-гамильтониана, такие как *g*-фактор (1.91), расщепление крамерсова дублета в нулевом поле (D = 0.28 см$^{-1}$). С другой стороны, никаких доказательств существования магнитных корреляций в этом соединении не было обнаружено.

Сигнал, обозначенный на спектре ЭПР как "*S2*" (рис. 3а), наблюдается в низких магнитных полях (~1000 Э) при $H_0||ab$. Интегральная интенсивность этого сигнала на порядок меньше, чем у сигнала *S1*. Его резонансное поле H_R слабо изменяется с температурой во всём диапазоне измерений (рис. 3 и 4). Когда магнитное поле $H_0\perp ab$, этот сигнал смещается в область высоких магнитных полей, уширяется и становится ненаблюдаемым из-за малой величины отношения "сигнал/шум" и невозможности прописать весь сигнал ввиду ограничения максимально достижимого поля нашего спектрометра. Представленная на рис. 5б угловая зависимость резонансного поля сигнала *S2* оказалась сдвинутой на 90° относительно таковой для сигнала *S1*. Главная особенность сигнала *S2* заключается в отсутствии заметных изменений его параметров в области температуры ферромагнитного упорядочения T_c. В тоже время, большой сдвиг этого сигнала от поля, соответствующего g = 2 (~3300 Э), и сильная угловая зависимость H_R (рис. 5б) указывают на то, что соответствующие магнитные частицы (ионы Mn) находятся в ферромагнитно-упорядоченном состоянии (по крайней мере до T = 110 К). С другой стороны измерения намагниченности образца $Bi_{1.95}Mn_{0.05}Te_3$ с помощью SQUID магнетометра обнаружили его магнитное упорядочение при T = 11.8 К. Это позволяет предположить, что сигнал *S2* вызван включениями (кластерами) какой-то примесной фазы, которая испытывает ферромагнитное упорядочение при температуре, существенно выше 100 К. Образование таких кластеров вполне вероятно, учитывая ограниченную растворимость марганца в Bi_2Te_3.

Подходящим кандидатом для магнитных включений такого рода являются кластеры ферромагнетика MnBi [20–23], внедрённые в структуру Bi_2Te_3. Отметим, что ферромагнитное соединение MnBi с температурой Кюри 630 К вполне соответствует включениям в матрицу Bi_2Te_3. Его элементарная ячейка, типа NiAs, с атомами Bi, занимающими промежуточное положение, имеет гексагональную симметрию с характерным размером в базисной

плоскости a = 4.283 Å и размером вдоль гексагональной оси c = 6.11 Å [20–23]. Такая элементарная ячейка может быть легко встроена в структуру Bi_2Te_3 с элементарной ячейкой, имеющей почти такой же размер в базисной плоскости (a = 4.38 Å) и размер вдоль гексагональной оси, равный пятикратному размеру таковой в MnBi (c = 30.49 Å). Сравнение интегральной интенсивности сигналов *S1* и *S2* при низких температурах показало, что относительная доля ионов Mn, принадлежащих фазе MnBi, составляет примерно 5–7% от их общего количества (учитывая, что эффективный магнитный момент ионов марганца ~4 μ_B в MnBi [20–23] и 4.6 μ_B в $Bi_{1.95}Mn_{0.05}Te_3$ в соответствие с полученной нами величиной константы Кюри). Это означает, что при $x \sim 0.05$ относительный объём, занимаемый включениями MnBi, должен быть меньше, чем 1%.

Важно отметить, что эти включения представляют собой кластеры соединения MnBi, которое при температурах ниже 100 К считается легкоплоскостным ферромагнетиком [20–23]. Поэтому ожидается, что угловая зависимость его резонансного поля будет сдвинута на 90° относительно таковой для соединения $Bi_{1.95}Mn_{0.05}Te_3$, которое, как известно, упорядочивается в состояние с осью легкого намагничивания. И это действительно реализуется, что видно из сравнения угловых зависимостей сигналов *S1* и *S2* на рис. 5.

Поскольку суммарный объём включений MnBi – меньше 1%, их прямое обнаружение методом рентгено-фазового анализа выглядит проблематичным. Тем не менее, можно сделать оценку их доли, используя приведённые выше данные ЭДС исследования. Предполагая, что соотношение элементов, выявленное с помощью ЭДС, учитывает вклады от MnBi и от $Bi_{1.95}Mn_{0.05}Te_3$ (y и 1 – y соответственно), можно сделать оценку относительных вкладов от ионов Mn в основном соединении и в примесной фазе: x = 0.052 и y = 0.002. Таким образом, данные ЭДС и ЭПР вполне согласуются друг с другом. Отметим, что так как содержание MnBi очень мало, и его восприимчивость слабо меняется при T < 40 К, она проявляет себя только как малая добавка χ_0 в общую восприимчивость (уравнение (1)), измеренную SQUID магнетометром.

Рассмотрим угловую зависимость резонансных полей сигналов *S1* и *S2* при температурах 10.8 К и 30 К (рис. 5). Оба сигнала проявляют свойства, присущие ферромагнитному состоянию при $T < T_c$: их резонансные поля изменяются в широких пределах при изменении ориентации образца по отношению к направлению внешнего магнитного поля. При $T > T_c$ (в частности, при T = 25 К) угловая зависимость сигнала *S1* становится в 10 раз слабее, в то время как размах вариаций H_R сигнала *S2* остается практически неизменным. Кроме того, положение максимумов и минимумов двух этих угловых зависимостей смещены на 90° друг относительно друга, что свидетельствует о разном типе магнитного упорядочения: “ось легкого намагничивания” и “плоскость легкого намагничивания”. Этот факт является дополнительным подтверждением разной природы сигналов *S1* и *S2*.

Таким образом, анализ наших экспериментальных данных указывает на ферромагнитное упорядочение магнитных моментов ионов марганца в кристаллической решётке соединения $Bi_{2-x}Mn_xTe_3$ при x = 0.05. Прямое обменное взаимодействие при таких концентрация ионов Mn^{2+} достаточно слабо. Следовательно, их магнитное упорядочение вызвано косвенным обменным взаимодействием через носителей тока типа Рудермана-Киттеля-Косуи-Иосиды [12, 13]. Кроме того, непрямой обмен исключает тонкую структуру спектров ЭПР, которая наблюдается в соединении $Bi_{2-x}Mn_xSe_3$ [16]. Магнитные свойства соединения $Bi_{2-x}Mn_xSe_3$ существенно отличаются от таковых в $Bi_{2-x}Mn_xTe_3$. Благодаря наличию немагнитной энергетической щели в окрестности уровня Ферми [14], непрямая связь и обменные корреляции в первом соединении существенно подавлены. Это и приводит к отличному поведению ЭСР ионов Mn в Bi_2Se_3 по сравнению с Bi_2Te_3. Спектры ЭСР ионов марганца, внедрённых в матрицу Bi_2Se_3, были детально изучены в работе [16]. В этой статье помимо детального описания тонкой структуры спектров были получены величины параметров спин-гамильтониана, такие как g-фактор (1.91), расщепление крамерсова дублета в нулевом поле (D = 0.28 см$^{-1}$). С другой стороны, никаких доказательств существования магнитных корреляций в этом соединении не было обнаружено. В то же время спектры ЭСР соединения $Bi_{2-x}Mn_xTe_3$ с x = 0.09 и их температурная зависимость, представленные в работе [24], обнаруживают полное отсутствие тонкой структуры и магнитное упорядочение ниже 11 К. Эти свойства полностью согласуются с поведением сигнала *S1*, исследованного в нашей работе.

Заключение

Кристаллы трёхмерных топологических изоляторов, теллурида висмута Bi_2Te_3, допированные марганцем, были исследованы с помощью методов спектроскопии ЭСР, SQUID магнитометрии, транспортных измерений и рентгеновской дифрактометрии. Полученные данные ЭСР, такие как температурная и угловая зависимости резонансных полей, выявили специфическое критическое поведение и подтвердили ферромагнитное упорядочение спинов марганца даже при умеренных концентрациях примеси.

Растущее отклонение резонансного поля от “парамагнитного” значения при охлаждении вблизи критической температуры свидетельствует о появлении в образце ферромагнитно-коррелированных областей. Когда время их жизни превышает период колебаний микроволнового поля (~10^{-10} с$^{-1}$), они индуцируют дополнительное магнитное поле (поле аксиальной анизотропии H_A) на локализованных магнитных моментах Mn. Сдвиг сигнала от положения парамагнитного резонанса определяется температурной зависимостью поля анизотропии $H_A(T)$. Знак сдвига – противоположный для двух ориентаций кристалла по отношению к направлению внешнего

магнитного поля: при параллельной ориентации сигнал сдвигается в высокие поля, а в перпендикулярной – в сторону низких полей.

Помимо критического поведения разбавленного ферромагнетика $Bi_{2-x}Mn_xTe_3$ выявлен эффект ограниченной растворимости марганца, являющийся причиной возникновения микроскопических включений примесной магнитной фазы MnBi. Эти включения удаётся обнаружить только с помощью техники ЭСР.

Литература

1. Ando J.: J. Phys. Soc. Japan **82**, 102001 (2013)
2. Dietl T., Ohno H.: Rev. Mod. Phys. **86**, 187 (2014)
3. Chen Y.L., Chu J.-H., Analytis J.G., Liu Z.K., Igarashi K., Kuo H.-H., Qi X.L., Mo S.K., Moore G., Lu D.H., Hashimoto M., Sasagawa T., Zhang S.C., Fisher I.R., Hussain Z., Shen Z.X.: Science **329**, 659 (2010)
4. Hor Y.S., Roushan P., Beidenkopf H., Seo J., Qu D., Checkelsky J.G., Wray L.A., Hsieh D., Xia Y., Xu S.-Y., Qian D., Hasan M.Z., Ong N.P., Yazdani A., Cava R.J.: Phys. Rev. B **81**, 195203 (2010)
5. Watson M.D., Collins-McIntyre L.J., Shelford L.R., Coldea A.I., Prabhakaran D., Speller S.C., Mousavi T., Grovenor C.R.M., Salman Z., Giblin S.R., van der Laan G., Hesjedal T.: New Journal of Physics **15**, 103016 (2013)
6. Jo N.H., Lee K., Kim J.: Appl. Phys. Lett. **104**, 252413 (2014)
7. Hor Y.S., Williams A.J., Checkelsky J.G., Roushan P., Seo J., Xu Q., Zandbergen H.W., Yazdani A., Ong N.P., Cava R.J.: Phys. Rev. Lett. **104**, 057001 (2010)
8. Kriener M., Segawa K., Ren Z., Sasaki S., Ando Y.: Phys. Rev. Lett. **106**, 127004 (2011)
9. Zhang J., Chang C.-Z., Tang P., Zhang Z., Feng X., Li K., Wang L.-L., Chen X., Liu C., Duan W., He K., Xue Q.-K., Ma X., Wang Y.: Science **339**, 1582 (2013)
10. Collins-McIntyre L.J., Harrison S.E., Schoenherr P., Steinke N.-J., Kinane C.J., Charlton T.R., Alba-Veneroa D., Pushp A., Kellock A.J., Parkin S.S.P., Harris J.S., Langridge S., van der Laan G., Hesjedal T.: EPL **107**, 57009 (2014)
11. Figueroa A.I., van der Laan G., Collins-McIntyre L.J., Zhang S.-L., Baker A.A., Harrison S.E., Schoenherr P., Cibin G., Hesjedal T.: Phys. Rev. B **90**, 134402 (2014)
12. Liu Q., Liu C.-X., Xu C., Qi X.-L., Zhang S.-C.: Phys. Rev. Lett. **102**, 156603 (2009)
13. Abanin D.A., Pesin D.A.: Phys. Rev. Lett. **106**, 136802 (2010)
14. Sanchez-Barriga J., Varykhalov A., Springholz G., Steiner H., Kirchschlager R., Bauer G., Caha O., Schierle E., Weschke E., Unal A.A., Valencia S., Dunst M., Braun J., Ebert H., Minar J., Golias E., Yashina L.V., Ney A., Holy V., Rader O.: Nat. Commun. **7**, 10559 (2016)
15. Litvinov V.I.: Phys. Rev. B **89**, 235316 (2014)
16. Wolos A., Drabinska A., Kaminska M., Hruban A., Strzelecka S.G., Materna A., Piersa M., Romaniec M., Diduszko R.: arXiv:1412.2012
17. Lutterotti L.: Program MAUD (V 2.33). http://www.ing.unitn.it/~maud/
18. Nakajima S.: The crystal structure of $Bi_2Te_{3-x}Se_x$. svn://www.crystallography.net/cod/cif/9/01/19/9011962.cif
19. Champness C.H., Kiplind A.L.: Can. J. Phys. **44**, 769 (1966)
20. B.W. Roberts, Phys. Rev. 104, 607 (1956).
21. Yang J.B., Yelon W.B., James W.J., Cai Q., Roy S., Ali N.: J. Appl. Phys. **91**, 7866 (2002)
22. Shanavas K.V., Parker D., Singh D.: J. Sci. Rep. **4**, 7222 (2014)
23. Williams T.J., Taylor A.E., Christianson A.D., Hahn S.E., Fishman R.S., Parker D.S., McGuire M.A., Sales B.C., Lumsden M.D.: Appl. Phys. Lett. **108**, 192403 (2016)
24. Zimmermann S., Steckel F., Hess C., Ji H.W., Hor Y.S., Cava R.J., Buechner B., Kataev V.: Phys. Rev. B **94**, 125205 (2016)

Контроль спектральных характеристик параметрического рассеяния света в нелинейных кристаллах с периодической доменной структурой

Д. О. Акатьев, А. А. Калачёв

Лаборатория нелинейной оптики

Было проведено теоретическое и экспериментальное исследование влияния электрооптического эффекта Поккельса на спектр спонтанного параметрического рассеяния света. Показано, что в кристалле ниобата лития варьируя амплитуду внешнего однородного электрического поля в диапазоне ± 20 кВ/см даёт возможно перестройки спектра параметрического рассеяния света на ±2.5 нм.

Введение

Явление спонтанного параметрического рассеяния (СПР) света в нелинейных кристаллах широко используется в современной квантовой оптике для проведения экспериментов по различным направлениям квантовой информатики, таким как квантовые вычисления, квантовая криптография и квантовая метрология [1, 2]. Отличительными особенностями СПР являются широкий непрерывный спектр, не связанный непосредственно с собственными частотами вещества, и двухфотонный характер излучения. Эти особенности позволяют использовать СПР для генерации различных неклассических состояний света, в частности однофотонных состояний, используемых в качестве носителей информации в оптических квантовых компьютерах и квантовых сетях связи. При этом требуется высокая чистота генерируемых состояний, что подразумевает, в частности, высокую стабильность источника по длине волны. Кроме того, точная настройка по длине волны требуется и для реализации эффективного взаимодействия генерируемых однофотонных импульсов с резонансными системами атомов. Традиционный способ перестройки и стабилизации источника по частоте с помощью температуры является медленным и, кроме того, не позволяет сохранять максимальную эффективность источника, которая часто достигается в узком интервале температур. С этой точки зрения представляет интерес разработка альтернативного подхода, использующего для частотной перестройки электрооптический эффект [3].

Основные результаты

В общем виде, вектор состояния поля спонтанного параметрического рассеяния записывается следующим образом [4]:

$$\left|\Psi\right\rangle = \left|0\right\rangle + \iint d\omega_s d\omega_i F(\omega_s, \omega_i)\left|\omega_s\right\rangle\left|\omega_i\right\rangle, \quad (1)$$

где $F(\omega_s, \omega_i)$ – спектральная амплитуда бифотона, которая определяет спектральные и пространственные свойства рассеянного поля. В случае коллинеарного режима СПР, когда коррелированные фотоны испускаются вдоль пучка накачки, амплитуда бифотона принимает вид:

$$F(\omega_s, \omega_i) = |A|^2 \cdot \mathrm{sinc}(\Delta kL/2) \quad (2)$$

где $|A|^2$ – множитель, учитывающий интенсивность накачки, величину квадратичной нелинейности и длину взаимодействия, $\Delta k = k_p - k_i - k_s - 2\pi/\Lambda$ – расстройка волновых векторов поля накачки (p), сигнального поля (s) и холостого поля (i), Λ – период модуляции нелинейности, $k_m = \omega_m n(\omega_m)/c$ – волновой вектор, $n(\omega_m)$ – показатель преломления на частоте ω_m ($m = i, s, p$). В случае, когда кристалл находится во внешнем однородном электрическом поле, показатели преломления, а следовательно, и волновые векторы становятся зависящими от величины поля, так что амплитуда бифотона (2) описывает изменение спектра СПР при изменении величины внешнего поля. Зная зависимость показателя преломления от амплитуды поля, можно определить частотный сдвиг сигнального и холостого полей и разработать однофотонный источник, допускающий тонкую настройку на частоту резонансного перехода.

В работе [5] было теоретически исследован противонаправленный режим СПР в периодически модулированном кристалле KTP при наличии внешнего электрического поля. Рассматривался кристалл с периодом модуляции Λ = 2.03 мкм, в котором при накачке на длине волны 532 нм возможна генерация фотонов на длинах волн 810 нм (вперёд) и 1550 нм (назад) [6]. Далее фотоны, испускаемые на длине волны 810 нм, будем называть сигнальными, а фотоны, испускаемые на длине волны 1550 нм – холостыми. Предполагаем, что поле накачки, которое распространяется вдоль оптической оси X, поляризовано вдоль оси Z, которая в каждом домене направлена либо вверх, либо вниз. В данном кристалле возможны следующие условия пространственного синхронизма: а) тип 0 – сигнальный и холостой фотон поляризованы параллельно накачке; б) тип I – сигнальный и холостой фотон поляризованы перпендикулярно накачке; в) тип IIa – сигнальный и холостой поляризованы перпенди-

кулярно друг другу, сигнальный параллельно накачке; г) тип IIб – сигнальный и холостой поляризованы перпендикулярно друг другу, холостой параллельно накачке. В работе было продемонстрировано, что прикладывая электрическое поле вдоль оптической оси Z происходит лишь растяжение или сжатие эллипсоида Френеля (в зависимости от ориентации домена), которое описывается уравнением:

$$\left(\frac{1}{n_x^2}+r_{13}E_z\right)x^2+\left(\frac{1}{n_y^2}+r_{23}E_z\right)y^2+\left(\frac{1}{n_z^2}+r_{33}E_z\right)z^2=1\,, \qquad (3)$$

где n_i – показатели преломления вдоль кристаллооптических осей в отсутствие внешнего электрического поля, i = 1, 2, 3 (x, y, z) и r_{ij} – электрооптические коэффициенты. Из уравнения (3) следует, что показатели преломления вдоль оптических осей кристалла в присутствии внешнего электрического поля равны

$$n_i'(E_z)=\left(\frac{1}{n_i^2}+r_{i3}E_z\right)^{-1/2}. \qquad (4)$$

При такой ориентации внешнего поля меняется только частота испускаемых фотонов, но не меняется их поляризация.

Результаты численного исследования продемонстрированы на рис. 1. Из них видно, что наибольшая чувствительность к внешнему электрическому полю, равная $\Delta\nu \approx 3.4$ МГц/(В/см), достигается в случае синхронизма типа I. Таким образом, изменение внешнего поля в пределах ±100 В/см обеспечивает перестройку частоты испускаемых фотонов в диапазоне 400 МГц. Этого вполне достаточно для стабилизации однофотонного источника при отсутствии соответствующей стабилизации лазера накачки.

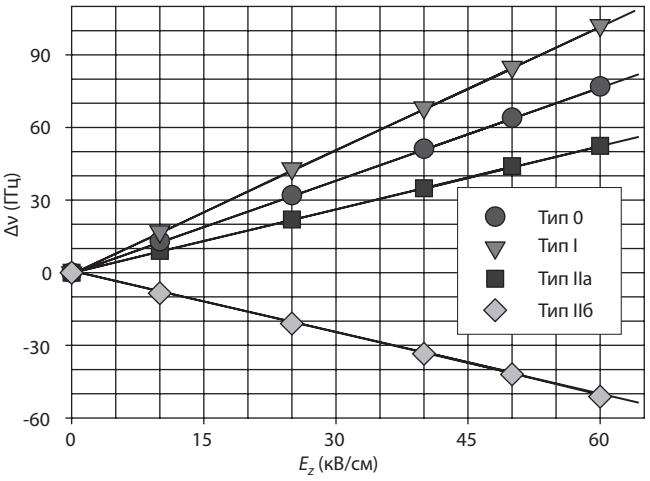


Рис. 1. Сдвиг спектра холостых фотонов $\Delta\nu = \nu_i(E_z) - \nu_i(0)$ как функция внешнего электрического поля для различных типов синхронизма противонаправленного режима СПР.

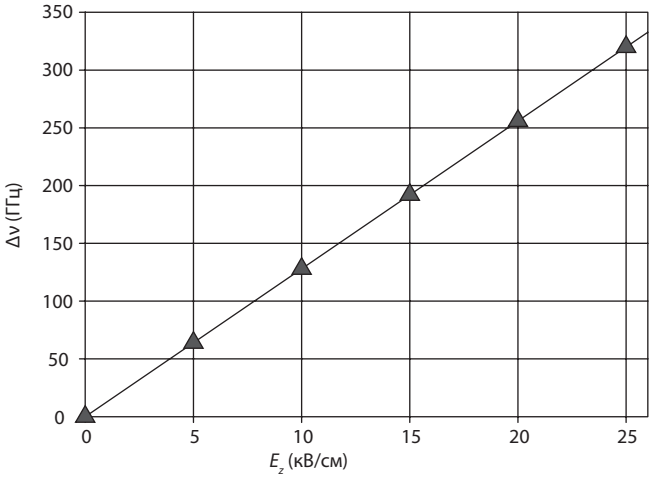


Рис. 2. Сдвиг спектра холостых фотонов $\Delta\nu = \nu_i(E_z) - \nu_i(0)$ как функция внешнего электрического поля E_z для периодически модулированного кристалла $LiNbO_3$.

Кроме того, были проведены эксперименты по частотной перестройке поля СПР в кристалле ниобата лития, находящемся во внешнем однородном электрическом поле. Период модуляции нелинейности (Λ = 7.47 мкм при рабочей температуре 80 °C) подбирался таким образом, чтобы при накачке на длине волны 532 нм рождались коррелированные пары фотонов на длинах волн 810 нм (сигнальное поле) и 1550 нм (холостое поле). При этом наблюдалось СПР типа “0”, когда все взаимодействующие поля поляризованы вдоль оптической оси Z, ориентированной перпендикулярно направлению распространения излучения. Если рассматривать случай, когда внешнее электрическое поле также приложено вдоль оси Z, то получаем следующие значения показателей преломления:

$$n_x'=n_y'=n_o'(E_z)=\left(\frac{1}{n_o^2}+r_{13}E_z\right)^{-1/2} \qquad (5)$$

$$n_z'(E_z)=n_e'=\left(\frac{1}{n_e^2}+r_{33}E_z\right)^{-1/2}, \qquad (6)$$

где n_o, n_e – показатели преломления вдоль кристаллооптических осей в отсутствие внешнего электрического поля. Используя данные зависимости можно проанализировать зависимость условий пространственного синхронизма и результирующего спектра генерируемых фотонов от величины поля. В результате численного моделирования была получена зависимость частоты холостых фотонов от напряжённости внешнего поля, которая изображена на рис. 2. Длина волны сигнальных фотонов связана с длиной волны холостых фотонов законом сохранения энергии.

Экспериментальные результаты, демонстрирующие частотный сдвиг в холостом канале в зависимости от величины внешнего поля, представлены на рис. 3. Измерение падение интенсивности сигнала при изменении величины поля позволяет, при известных параметрах экспериментальной установки, оценить величину смещения спектра СПР. Расчёты показывают, что ширина спектра

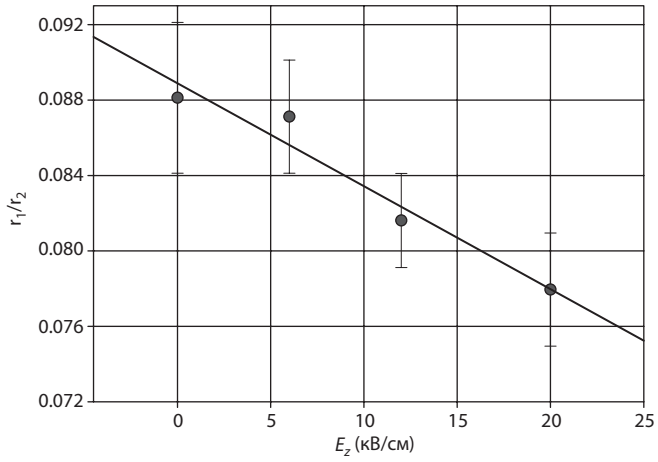


Рис. 3. Отношение числа отсчётов в холостом канале к числу отсчётов в сигнальном канале в зависимости от величины приложенного электрического поля. r_1 – количество отсчётов в холостом канале (1550 нм), r_2 – количество отсчётов в сигнальном канале (810 нм).

параметрического рассеяния света на длине волны 1550 нм $\Delta\lambda_{СПР} \approx 0.4$ нм, а наблюдаемый сдвиг спектра СПР равен $\Delta\lambda \approx 2.24$ нм, что хорошо согласуется с численным расчётом.

Заключение

Произведены расчёты зависимости спектра СПР в нелинейном кристалле KTP с периодической доменной структурой от величины внешнего однородного электрического поля. Рассмотрен вариант противонаправленного режима СПР и определён тип синхронизма, обладающий наибольшей чувствительностью к внешнему полю. Поставлены эксперименты по частотной перестройке поля СПР в кристалле ниобата лития с периодической доменной структурой.

Литература

1. Chunnilall C.J., Degiovanni I.P., Kück S., Müller I., Sinclair A.G.: Optical Engineering **53**, no. 8, 081910–081910 (2014)
2. Takeuchi S.: Japanese Journal of Applied Physics **53**, no. 3, 030101 (2014)
3. Катамадзе К.Г., Патерова А.В., Якимова Е.Г., Балыгин К.А., Кулик С.П.: Письма в ЖЭТФ **4**, № 4, 284–288 (2011)
4. Rubin M.H., Klyshko D.N., Shih Y.H., Sergienko A.V.: Physical Review A. **50**, no. 6, 5122 (1994)
5. Акатьев Д.О., Калачев А.А.: Компьютерная оптика **40**, № 1, 26–30 (2016)
6. Shukhin A.A., Akatiev D.O., Latypov I.Z., Shkalikov A.V., Kalachev A.A.: J. Phys.: Conf. Ser. **613**, 012015 (2015)

Противонаправленный режим спонтанного параметрического рассеяния в нелинейном волноводе PP KTP

И. З. Латыпов, А. А. Шухин, Д. О. Акатьев, А. В. Шкаликов, А. А. Калачёв

Лаборатория нелинейной оптики

Экспериментально реализован режим противонаправленного спонтанного параметрического рассеяния в кристалле титанил-фосфат калия (KTP) с периодической модуляцией нелинейности. Исследованы корреляционные и спектральные характеристики генерируемых однофотонных состояний.

Введение

Источники узкополосных однофотонных и двухфотонных состояний являются важными компонентами систем оптических квантовых вычислений и квантовой связи [1]. В частности, источники однофотонных волновых пакетов с шириной полосы порядка ГГц, которые могут эффективно взаимодействовать с атомными системами, необходимы для реализации масштабируемых квантовых вычислений и квантовых повторителей, использующих квантовую память [2]. Перспективным подходом к созданию источников узкополосных однофотонных состояний является условное приготовление фотонов в режиме противонаправленного спонтанного параметрического рассеяния (СПР) в нелинейном волноводе [3]. Преимуществом однофотонных источников, основанных на явлении СПР, является возможность снижения вклада вакуумных состояний, т.к. корреляция сигнального и холостого фотонов позволяет при детектировании одного из них определять наличие второго фотона на выходе из однофотонного источника. При этом механизм оповещения даёт возможность уменьшить вклад многофотонных состояний в поле СПР за счёт использования детекторов, разрешающих число фотонов. Важной особенностью противонаправленного режима СПР является сужение спектра фотона, испускаемого в обратном по отношению к накачке направлении, и подавление спектральной корреляции между сигнальным и холостым фотоном, наличие которой снижает чистоту результирующего однофотонного состояния [3]. Таким образом, данный режим позволяет реализовать источник однофотонных состояний со степенью чистоты, близкой к единице, и спектральной шириной порядка ГГц при комнатной температуре. Увеличение эффективности данного режима СПР возможно при помещении нелинейного волновода в резонатор. При этом спектральную ширину генерируемого однофотонного состояния можно довести до единиц МГц без дополнительной спектральной фильтрации и понижения эффективности генерации. Наконец, внутрирезонаторный режим противонаправленного рассеяния позволит генерировать различные формы волнового пакета с использованием импульсной лазерной накачки [4].

Основные результаты

Волновод KaTiOPO4 с периодической модуляцией доменной структуры (PP KTP производства AdvR Inc.) создан из кристалла KTP методом ионной имплантации. Область, легированная атомами Рубидия (Rb) вблизи поверхности кристалла, имеет больший показатель преломления по сравнению с чистым кристаллом KTP и поэтому формирует планарный волновод. Профиль показателя преломления вдоль оси z можно описать следующим образом:

$$n_j(z) = n_j^{\mathrm{KTP}} + \Delta n_j \ \mathrm{erfc}(-z/z_0), \qquad (1)$$

где $j = Y, Z$, $\Delta n_j = n_j^{\mathrm{RTP}} - n_j^{\mathrm{KTP}}$. На рис. 1 представлено изображение сечения волноводов, полученное с помощью оптического микроскопа. Яркость белого цвета пропорциональна концентрации примесных атомов Rb, т.е. соответствует фактической структуре волновода. Измеренные профили хорошо описываются формулой (1) с параметром $z_0 \approx 8.9$ мкм. Длина волновода составляла 7 мм. Эффективный показатель преломления $n_{nm}^{\mathrm{eff}}(\omega)$ и пространственный профиль $u_{nm}(\rho)$, $\rho = (y, z)$ различных мод были рассчитаны с помощью коммерческого программного обеспечения Comsol Multiphysics. Уравнения Сельмейера для $n_j^{\mathrm{KTP}}(\lambda)$ и $\Delta n_j(\lambda)$ были взяты из [5] и [6], соответственно. На рис. 2 представлен результат моделирования фундаментальных мод на различных длинах волн. Область моделирования выбрана таким образом,

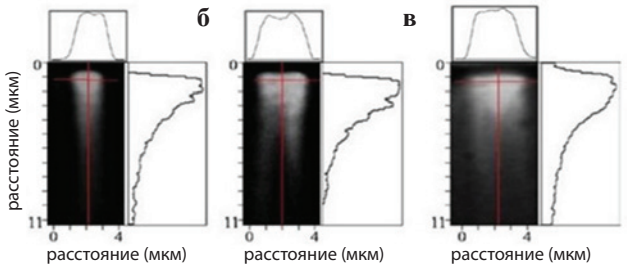


Рис. 1. Изображение сечения волновода, полученное с помощью оптического микроскопа. Белый цвет иллюстрирует структуру волновода (показывает концентрацию атомов Рубидия). Ширина волноводов составляет 2 мкм (**а**), 3 мкм (**б**) мкм и 4 мкм (**в**).

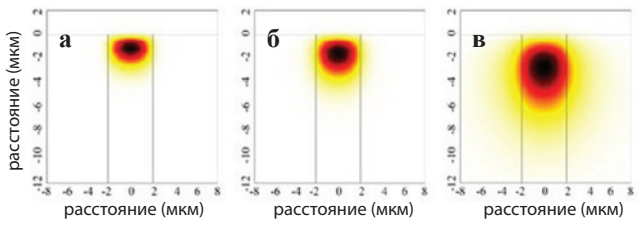


Рис. 2. Профиль интенсивности фундаментальных мод волновода **а** для накачки (532 нм), **б** сигнального (810 нм) и **в** холостого (1550 нм) поля, поляризованного вдоль оси *Z*. Ширина волновода составляла 4 мкм. Моделируемые материалы: середина – Rb:KTP, правая и левая часть – KTP, верхняя часть – воздух.

чтобы граничные эффекты были пренебрежимо малы. Закономерности противонаправленного режима спонтанного параметрического рассеяния в рассматриваемом волноводе PP KTP были теоретически исследованы в работе [7].

Общая схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Для накачки волновода PP KTP использовался импульсный волоконный лазер на длине волны 1064 нм, состоящий из задающего генератора Fianium и иттербиевого волоконного усилителя. Средняя мощность генерации составляла 5 мВт, частота повторения импульсов 18 МГц. Для получения накачки на длине волны 532 нм использовалась параметрическая генерация второй гармоники в нелинейном кристалле NC. Пучок накачки фокусировался на переднюю поверхность волновода с помощью 10-кратного оптического объектива (числовая апертура 0.25), размеры которого были подобраны для наиболее эффективного согласования с фундаментальной модой волновода. Кристалл помещался в термостабильную печку при температуре 32 °C, при которой достигалась максимальная эффективность СПР. Излучение сигнального поля в прямом направлении собиралось 40-кратным объективом (числовая апертура 0.39) и проходило через дихроичное зеркало DM2 (диапазон пропускания 700–1600 нм) и отражательную дифракционную решётку (дисперсия 3.2 нм/мрад) для тонкой спектральной фильтрации. Далее, с помощью одномодового волоконного каплера излучение направлялось на диодный лавинный фотодетектор SPCM-AQRH, работающий в режиме счёта одиночных фотонов (квантовая эффективность на длине волны 800 нм порядка 15%). Излучение накачки гасилось примерно на 90 дБ с помощью дихроичного зеркала DM2 и дифракционной решётки DG. В противоположном к накачке направлении инфракрасное излучение проходило через дихроичное зеркало DM2 и с помощью одномодового волоконного каплера направлялось на однофотонный детектор Scontel. Данный детектор основан на сверхпроводящих наноструктурах, помещённых в криостат при температуре 2 К, и имеет квантовую эффективность на длине волны 1550 нм порядка 30%, при этом уровень темновых отсчётов составляет порядка 200 Гц. Для измерения временных корреляций между прямым и обратным каналом использовался 8-канальный время-цифровой преобразователь ID800 с временем разрешения 81 пс.

Бифотонное излучение, генерируемое в процессе СПР, обладает крайне низкой интенсивностью по отношению к излучению лазерной накачки (вероятность

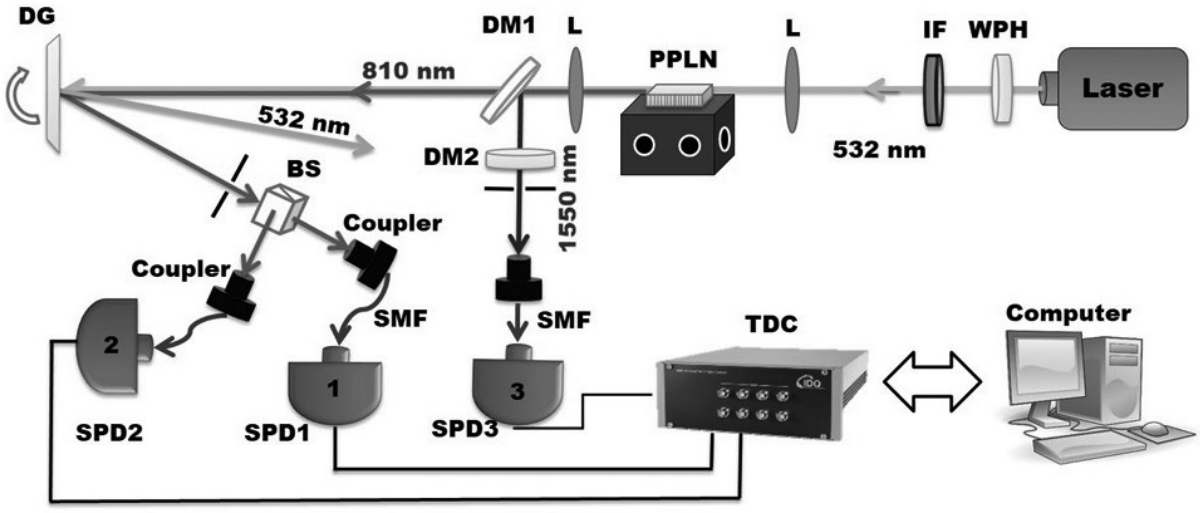


Рис. 3. Блок схема экспериментальной установки. Laser – волоконный импульсный лазер; Amplifier – волоконный усилитель; L – фокусирующие линзы; NC – нелинейный кристалл для генерации второй гармоники; DM1 – дихроичное зеркало с пропусканием 98% на 1064 нм и отражением 91% на 532 нм; IF – интерференционный фильтр для излучения накачки 532 нм; WHP – полуволновая фазовая пластинка для длины волны 532 нм; DM2 – дихроичное зеркало с пропусканием 95% на длине волны 1550 нм и отражением 91% на 532 нм; 10X – объектив с числовой апертурой NA = 0.25; PPKTP – нелинейный волновод KTP; Oven – термостабильная печка; DG – отражательная дифракционная решётка с разрешением 3.2 нм/мрад; BS – неполяризационный полупрозрачный светоделитель; Fiber coupler – система для заведения излучения в оптическое волокно; SMF – одномодовое оптическое волокно; SPD – однофотонный детектор APQRH; M –глухое зеркало; FP – сканирующий интерферометр с разрешением 67 МГц и свободным спектральным интервалом 12 ГГц; SSPD – сверхпроводящий однофотонный детектор; ID800 – 8-канальный время-цифровой преобразователь с временным разрешением 81 пс.

рождения бифотона 10^{-7}–10^{-12}). Поэтому, при наличии сильной флуоресценции кристалла, поиск сигнала СПР является сложной экспериментальной задачей. Для её решения требуется полное подавление излучения накачки, различных видов флуоресценции и других засветок. Решение данной задачи выполнялось с использованием дифракционной решётки, настроенной таким образом, что спектральный интервал, попадающий в апертуру волоконного каплера составлял 4.5 нм. Настройка на сигнал СПР осуществлялась в режиме счёта совпадений вращением дифракционной решётки, то есть сканированием по длине волны. Наиболее интенсивным режимом СПР оказался режим 0-типа (при котором все взаимодействующие поля поляризованы вертикально вдоль оптической оси доменов) соответствовал длине волны сигнального и холостого фотона λ_s = 833 нм и λ_s = 1470 нм, соответственно. Все последующие измерения выполнялись для данного режима.

Для анализа спектра противонаправленного режима СПР использовался сканирующий резонатор Фабри-Перо SA-210, имеющий спектральное разрешение 67 МГц и область дисперсии 10 ГГц. Последняя определяет максимальную ширину спектра, которую ещё можно разрешить с помощью данного прибора. Теоретическая оценка ширины спектра ИК фотона, распространяющегося в обратном направлении, для волновода длиной 7 мм составила 12 ГГц. При исследовании спектра с помощью сканирующего резонатора Фабри-Перо измерялась зависимость счёта фотонов от напряжения на пьезо элементах резонатора (напряжение прямо пропорционально резонансной частоте резонатора). В результате измерений был получен шумоподобный сигнал со слабой модуляцией. Следовательно, ширина спектра составляла более 10 ГГц. С другой стороны, ширина спектра ИК фотона была меньше ширины аппаратной функции дифракционной решётки, т.е. меньше 25 ГГц. Более точных измерений спектра на имеющемся оборудовании провести не удалось.

Для измерений корреляционных характеристик генерируемых бифотонных полей использовалась схема интерферометра Брауна-Твисса (рис. 3). Излучение в сигнальном канале делилось на полупрозрачном неполяризационном светоделительном кубике и направлялось на детекторы 1 и 2, соответственно. Временные метки электрических импульсов с детекторов 1, 2 и 3 сравнивались на время-цифровом преобразователе, который одновременно считал скорость совпадений между детекторами 1 и 2 (R_{12}), 1 и 3 (R_{13}), и 2 и 3 (R_{23}). Скорости совместного детектирования фотонов R_{13}, R_{23} соответствуют скорости генерации пар фотонов, а R_{12} соответствует скорости генерации многофотонных состояний. Для точного определения вклада многофотонных состояний необходимо вычислить функцию автокорреляции при нулевой задержке, которая определяется следующий образом:

$$g_2(0) = \frac{P_{ab}}{P_a P_b}, \quad P_{a,b} = \frac{N_{a,b}}{N_t}, \quad P_{ab} = \frac{N_{ab}}{N_t}, \qquad (2)$$

где P_{ab} – вероятность совместного детектирования на детекторах 1 и 2; P_a, P_b – вероятность детектирования на детекторах 1 и 2, соответственно; $N_{ab} = R_{12}$; $N_a = R_1$; $N_b = R_2$; N_t – общее нормированное число импульсов, попадающее в канал 1 и 2. Нормировка осуществлялась через определение суммарных потерь в каждом канале, включающих потери на каждом оптическом элементе, оптоволокне, квантовой эффективности детектора и потери в электрической системе. На получения оптимальных параметров генерируемых однофотонных состояний, т.е. достижения наибольшего количества генерируемых пар фотонов при наименьшей функции автокорреляции $g_2(0)$, была проведена настройка по параметрам мощности накачки и температуре волновода KTP. В результате, при средней мощности накачки 15 мВт и температуре 32 °C были получены следующие значения: $g_2(0) = 0.012 \pm 0.002$; $R_{13} = 170 \pm 3$ пар/с; $R_{12} = 5 \pm 1$ пар/с; $R_{rc} = 2 \pm 0.5$ пар/с (скорость случайных совпадений). Форму корреляционной функции в условиях эксперимента измерить было невозможно, т.к. теоретическая ширина корреляционной функции составляла менее 100 пс, в то время как время разрешения схемы совпадений составляло 81 пс. Скорость генерации пар фотонов с учётом потерь в оптической и электрической системах составила 63 кГц · мВт/с. Эффективность оповещения о наличии сигнального фотона на выходе составила 6 ± 0.5%.

Заключение

В данной работе был поставлен эксперимент по наблюдению противонаправленного режима спонтанного параметрического рассеяния в нелинейном волноводе KTP с периодической доменной структурой. Были проведены измерения спектральных и корреляционных характеристики генерируемых однофотонных состояний. Полученные результаты показывают перспективность режима противонаправленного спонтанного параметрического рассеяния для создания источника однофотонных состояний на его основе.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда №14-12-00806.

Литература

1. Eisaman M.D., Fan J., Migdall A., Polyakov S.V.: Rev. Sci. Instrum. **82**, 071101 (2011)
2. Sangouard N., Simon C., de Riedmatten H., Gisin N.: Rev. Mod. Phys. **83**, 33 (2011)
3. Booth M.C., Atatüre M., Di Giuseppe G., Saleh B.E.A., Sergienko A.V., Teich M.C.: Phys. Rev. A **66**, 023815 (2002)
4. Kalachev A.A.: Phys. Rev. A **81**, 043809 (2010)
5. König F., Wong F.N.C.: Appl. Phys. Lett. **84**, 1644 (2004)
6. Cheng L.K., Cheng L.T., Galperin J., Hotsenpiller P.A.M., Bierlein J.D.: J. Cryst. Growth **137**, 107 (1994)
7. Shukhin A.A., Akatiev D.O., Latypov I.Z., Shkalikov A.V., Kalachev A.A.: Journal of Physics. Conference series **613**, 012015 (2015)

Биения фотонного эха: наблюдение и применение

В. Н. Лисин, А. М. Шегеда, В. В. Самарцев

Лаборатория нелинейной оптики

В Греческой мифологии Эхо – прекрасная нимфа, которая была наказана Герой – женой Зевса: она не могла выражать свои мысли, но только повторяла слова за другими. Возможно ли научить Эхо говорить саму? Цель нашей работы состоит в том, чтобы на языке, понятном не только налогоплательщикам, но и их детям, рассказать о фотонном эхе, о том, как мы научили нимфу по имени Фотонное Эхо говорить, излагать свои мысли, используя для этого импульсы слабых магнитных и электрических полей, рассказать о наших последних результатах, опубликованных в 2016 году.

Что такое фотонное эхо

Если образец последовательно облучить двумя импульсами света, то на экране, размещённом за образцом, сначала появится световое пятно от первого импульса света, затем второго (изображено на рис. 1 прямоугольниками). Через определённое время после второго импульса, равное интервалу времени между первым и вторым импульсами, образец излучает свет в виде короткой вспышки. Это и есть фотонное эхо. Откуда берется эта вспышка света?

Индукция

Подсказку видно на рис. 1. Там синим цветом показано, что после окончания первого импульса света излучатели в образце некоторое время продолжают испускать свет. Если света не видно далее, то или излучатели перестают испускать свет, или излучаемые ими волны гасят друг друга из-за того, что частоты волн имеют разное значение. Мы далее покажем, что для существования эха важен второй факт.

Сложение двух световых волн. понятие фазы

Результат сложения двух волн с разными частотами ω_1 и ω_2, но имеющих одинаковые амплитуды в начальный момент времени, можно записать в следующем виде:

$$E = \cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t) = \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + \cos(\omega_0 t + \varphi_2),$$

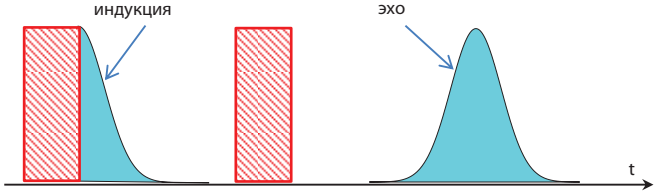


Рис. 1. Схема типичного эксперимента по наблюдению фотонного эха.

$$\varphi_1 = (\omega_1 - \omega_0)t, \quad \varphi_2 = (\omega_2 - \omega_0)t,$$
$$\omega_0 \gg |\omega_1 - \omega_0|, \quad |\omega_2 - \omega_0|, \qquad (1)$$

где мы ввели фазы φ_1 и φ_2, как произведение времени на разность частоты волны и некоторой частоты ω_0, значение которой выбирается из соображений удобства. Частоты имеют размерность радиан/сек, а фазы, соответственно, выражаются в радианах. Будем изображать фазы радиус-векторами, исходящими из центра окружности (рис. 2), углы которых с вертикальной осью равны значениям соответствующих фаз. Положение векторов на окружности будем дублировать маленькими кружочками. В начальный момент времени фазы волн имеют одинаковое значение, равное нулю (рис. 2.1). Затем фазы начинают различаться, так как частоты не совпадают (рис. 2.2) и в некоторый момент времени

$$\varphi_2 - \varphi_1 = (\omega_2 - \omega_1)t = \pi, \qquad (2)$$

кружочки находятся на противоположных концах диаметра (рис. 2.3), значения аргументов под знаком косинуса отличаются на π, поэтому косинусы равны, но противоположны по знаку, и результат сложения двух волн равен нулю. Волны гасят друг друга в этот момент времени.

Сложение многих волн с разными частотами: индукция

Пусть во время действия первого импульса света возбуждены все излучатели. Тогда все излучатели испускают свет на частоте световой волны лазера ω_0. Фазы равны нулю. По окончанию 1 лазерного импульса излучатели продолжают испускать световые волны, но каждый на своей собственной частоте. Обозначим через ω^{max} максимальное значение частоты световой волны, испускаемое излучателями, а через ω^{min} – минимальное значение. Тогда через некоторое время τ_{ind}

$$(\omega^{max} - \omega^{min})\tau_{ind} = 2\pi \qquad (3)$$

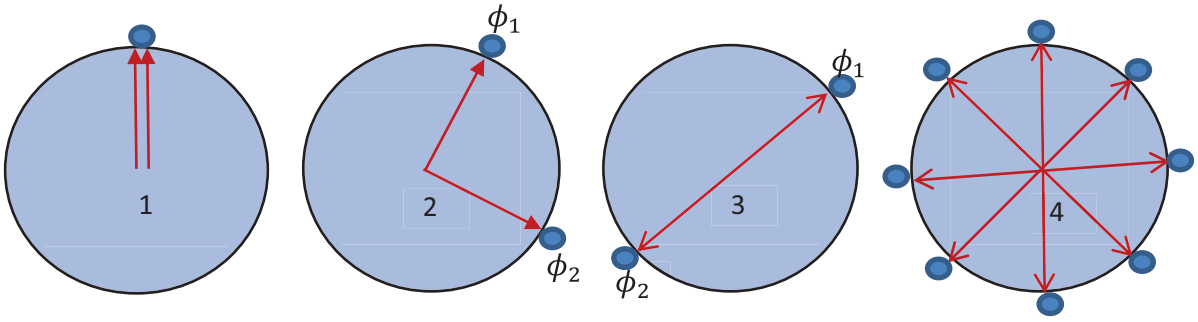


Рис. 2. Фазы двух (1, 2, 3) и многих (4) волн в зависимости от времени.

значения фаз испускаемых излучателями световых волн будет равномерно распределено от нуля до 2π (рис 2.4). Все излучатели можно разбить на пары, в которых фазы испускаемых ими световых волн отличаются на 180 градусов (рис. 2.4). Излучаемые всеми излучателями световые волны попарно полностью гасят друг друга в момент τ_{ind}. Начиная с этого момента времени, кружочки, соответствующие фазам световых волн, остаются равномерно распределёнными по кругу. В любой другой последующий момент времени излучатели тоже можно разбить уже на другие пары, но в которых фазы испускаемых ими световых волн отличаются на 180 градусов и испускаемые ими световые волны вновь попарно гасят друг друга. Излучатели продолжают испускать свет, но на экране за образцом света не видно. Так объясняется причина появления и длительность "послесвечения" ≡ индукции. Разность $\omega^{max} - \omega^{min}$ называют неоднородной шириной линии.

Нельзя ли фазы световых волн, испускаемых излучателями, вновь сделать одинаковыми? Например, обратив время. Тогда амплитуда результирующего света снова будет максимальна через промежуток времени, равный времени эволюции до обращения времени. Оказывается, можно. Далее процесс обращения времени будет показан на примере соревнования бегунов на стадионе.

Процесс образования эха: соревнования бегунов на стадионе

Пусть стадион имеет форму круга радиуса R. Каждому излучателю сопоставим бегуна. Скорость бегуна равна разнице частоты света, испускаемого излучателем, и частоты света лазера, умноженную на радиус стадиона

$$V = (\omega - \omega_0)R \qquad (4)$$

Положения бегунов на стадионе показывают значения фаз волн (с точностью до 2π), испускаемых излучателями в каждый момент времени (путь, деленный на радиус):

$$\varphi = Vt/R. \qquad (5)$$

Сигналы стартера обозначают окончание первого и начало, и конец второго лазерных импульсов.

До окончания 1 импульса света все излучатели испускают свет на частоте лазера ω_0. Скорости бегунов имеют нулевое значение. Фазы одинаковы и тоже равны нулю. Бегуны находятся на старте (рис. 3.1). По окончанию первого импульса света по сигналу стартера бегуны стартуют. Начиная с некоторого времени

$$(V^{max} - V^{min})\tau_{ind} = 2\pi R \qquad (6)$$

бегуны будут равномерно распределены по стадиону. Здесь V^{min} и V^{max} – обозначают минимальную и соответственно максимальную скорости бегунов. В каждый следующий момент времени спортсменов можно разделить на пары, бегуны которых находятся на противоположных сторонах стадиона. Разница фаз световых волн, испускаемых в данный момент времени излучателями, соответствующими каждой паре, будет равна 180 градусов. Световые волны гасят друг друга, суммарная амплитуда и интенсивность света от всех излучателей равны нулю. С учётом (4) условия (3) и (6) тождественны.

По второму сигналу стартера бегуны меняют направление движения без изменения величины скорости. И за время, равное времени, в течение которого они бежали в первоначальном направлении, бегуны пробегут тот же путь, только в обратном направлении и снова соберутся вместе на стартовой линии (рис. 3.6).

Фазы вновь одинаковы. Интенсивность эха максимальна. Форма эха сначала повторяет обращенную по времени форму индукции, а затем форму индукции. Поэтому длительность эха в два раза превышает длительность индукции.

Впервые придумал обращать время с помощью второго импульса электромагнитного излучения датский физик Эрвин Хан. Это было в 1950 году, когда он впервые наблюдал явление ЭХО [1]. Наблюдал эхо в радиочастотном диапазоне на ядерных магнитных моментах (ЯМР эхо).

Проиллюстрируем теперь действие импульсных возмущений, изменяющих собственную частоту испускаемых излучателями световых волн. Рассмотрим последовательно случаи, когда возмущение сдвигает собственные частоты

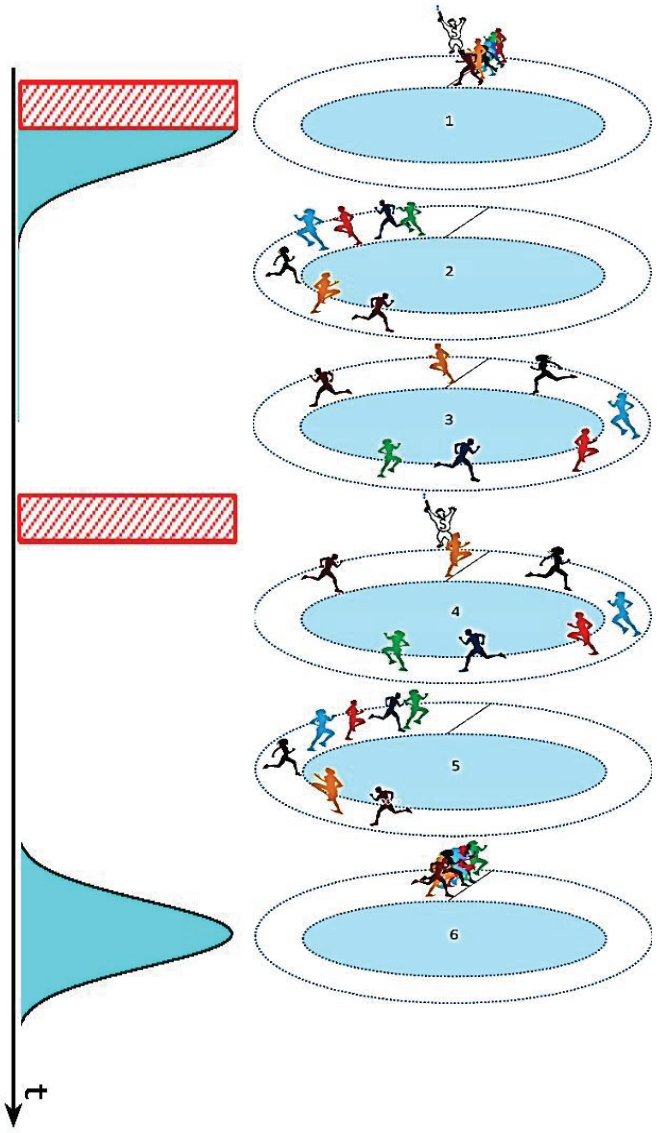


Рис. 3. Процесс обращения времени на примере соревнования бегунов на стадионе.

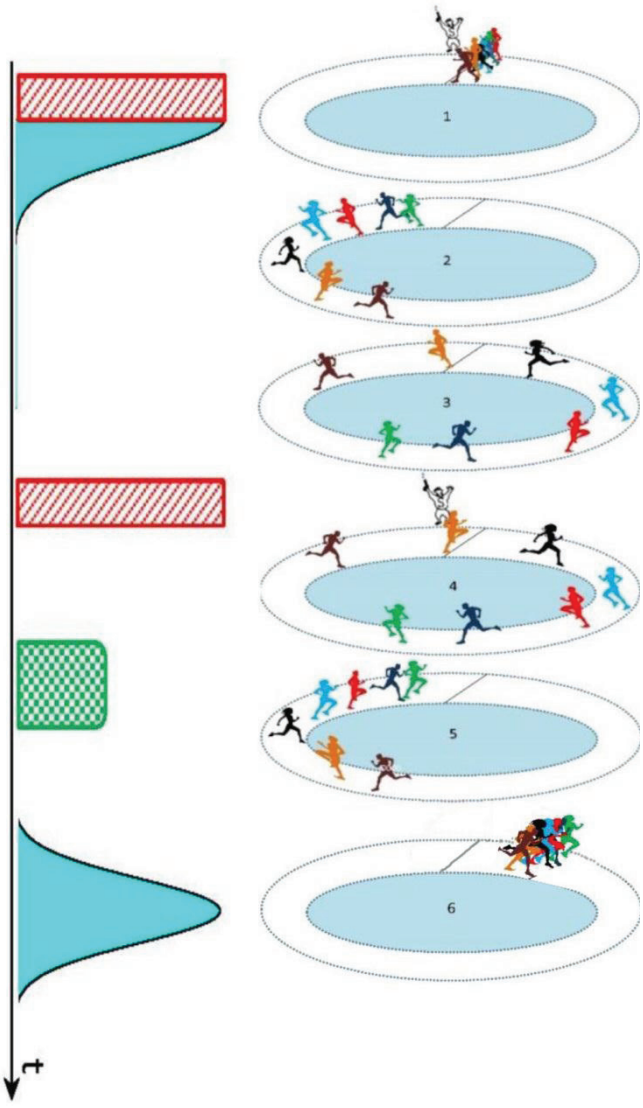


Рис. 4. Скорости у всех бегунов увеличиваются на одинаковое для всех значение в течение короткого отрезка времени между вторым импульсом света и вспышкой эха.

сначала у всех излучателей, затем у половины излучателей на одно и то же значение $\delta\omega$.

Импульсное возмущение сдвигает собственные частоты излучателей на одинаковое для всех значение $\delta\omega$

Переводя на язык спортсменов, это означает, что скорости бегунов изменяются на одинаковое для всех значение $\delta V = \delta\omega R$ в течение короткого времени τ (импульс зелёного цвета на рис. 4). Бегуны собираются вместе в то же самое время, как и раньше, но на некотором расстоянии от стартовой линии $s = \delta V\tau$. Фазы световых волн, испускаемых каждым излучателем, совпадают, но не равны нулю: $\varphi = s/R = \delta V\tau/R = \delta\omega\tau$. Интенсивность испускаемого света такая же, как в отсутствие возмущения.

Собственные частоты увеличиваются на одинаковое значение $\delta\omega$, но не у всех, а только у половины излучателей

На языке спортсменов это означает, что скорости у одной половины бегунов увеличиваются в течение короткого времени τ на одинаковое для этой группы значение $\delta V = \delta\omega R$. Обе группы бегуны собираются вместе в то же самое время, как и раньше, но бегуны с увеличенной скоростью пробегают стартовую линию и собираются на некотором расстоянии от стартовой линии $s = \delta V\tau$ (см. рис. 5). Если расстояние между ними равно половине длины окружности $s = \pi R$, то разность фаз между этими двумя группами излучателей

$$\varphi = s/R = \pi R/R = \pi = \delta\omega\tau \qquad (7)$$

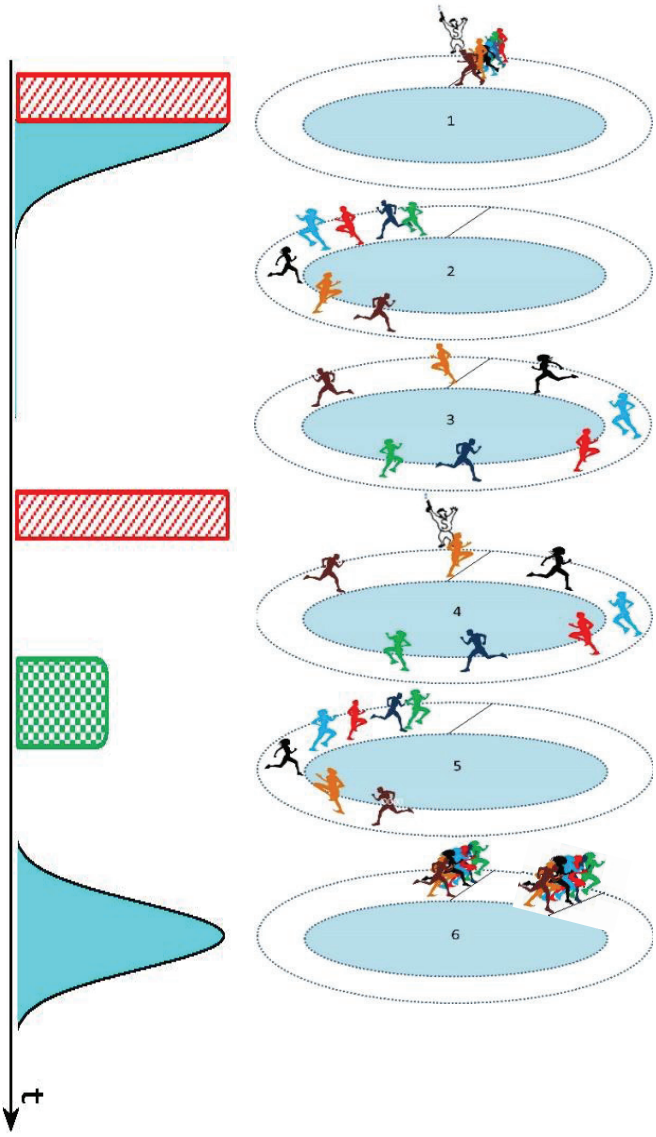


Рис. 5. Скорости увеличиваются только у половины спортсменов.

равна π и волны, излучаемые ими, гасят полностью друг друга. Значения интенсивности эха осциллируют в зависимости от длительности импульса внешнего возмущения τ с частотой δω

$$I(t) = I_0(t)\cos^2(\varphi/2) = I_0\cos^2(\delta\omega\tau/2) \qquad (8)$$

без изменения формы. По одной осциллограмме заметить эти осцилляции нельзя. Требуется много измерений для различных длительностей τ, чтобы определить частоту осцилляций δω, которая равна расщеплению оптической линии. В уравнении (8) $I_0(t)$ это интенсивность эха в отсутствие внешнего возмущения. Увеличивая длительность импульса возмущения, таким способом можно наблюдать очень маленькие расщепления оптических линий δω. Минимальное значение δω ограничено снизу тем, что длительность возмущения τ не может превышать временной интервал между лазерными импульсами t_{12}. В свою очередь интервал $2t_{12}$ не должен превышать время T_2, за которое случайный набег фазы из-за внутренних возмущений становится равным ±π:

$$\delta\omega_{oscil}^{min} = \pi/\tau \geq \pi/t_{12} \gg 2\pi/T_2. \qquad (9)$$

Отметим, что $\delta\omega_{oscil}^{min}$ не зависит от неоднородной ширины линии, т.е., от разброса частот осцилляторов. Это является основным преимуществом эха по сравнению с другими методами измерения расщепления оптической линии. В нашей работе [2] мы впервые наблюдали осцилляции интенсивности эха, вызванные внешним импульсным магнитным полем (рис. 6). При t_{12} = 33 нс и длительности магнитного импульса τ =30 нс достаточно было амплитуды магнитного импульса в 1.7 Гс, чтобы удовлетворить условию первого минимума (7), чтобы разность фаз φ = π. При этом Зеемановское расщепление линии равнялось δω/2π ≅ 10 МГц.

Увеличение собственных частот у половины излучателей происходит во время излучения эха. Значение δω намного превосходит разброс частот излучателей

Это означает, в переводе на язык бегунов, что скорости у половины бегунов увеличиваются на одинаковое для всех значение, когда бегуны находятся недалеко от финишной линии. Причём увеличение скорости во много раз больше, чем скорости бегунов.

Бегуны с увеличенной скоростью несколько раз окажутся против медленных бегунов на противоположной стороне стадиона. Разность фаз φ двух групп излучателей зависит от времени и много раз принимает значение π. В эти моменты времени световые волны, испускаемые обеими группами, полностью гасят друг друга. Временная форма интенсивности испытывает периодические изменения – биения с частотой δω (рис. 7):

$$I(t) = I_0(t)\cos^2(\varphi(t)/2),\ \varphi(t) = \delta Vt/R = \delta\omega t. \qquad (10)$$

Во время вспышки эха свет на экране за образцом становится то ярче, то слабее. На рис. 6 показан случай с четырьмя минимумами: δωτ > 7π. Период биений T равен расстоянию между ближайшими минимумами интенсивности и связан с δω соотношением

$$\delta\omega/2\pi = 1/T. \qquad (11)$$

Измеряя период, можно по одной осциллограмме определить δω/2π.

Биения давно известны в природе и применяются на практике, например, при настройке натяжения струны гитары с помощью камертона. Звуковые волны от струны и камертона складываются. Если частота звука, издаваемая струной, отличается от частоты звука, издаваемого

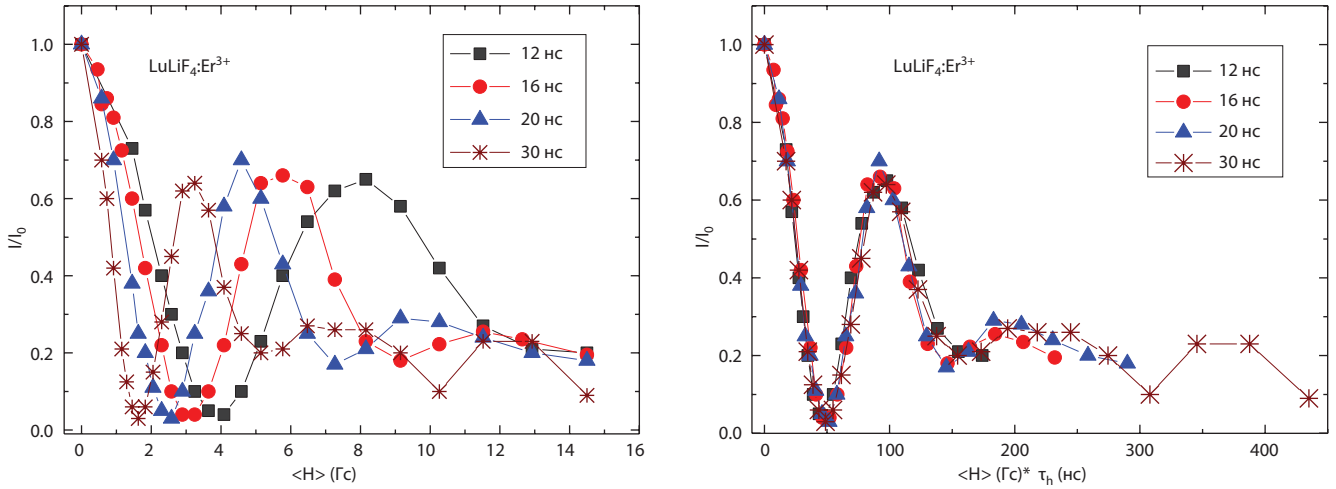
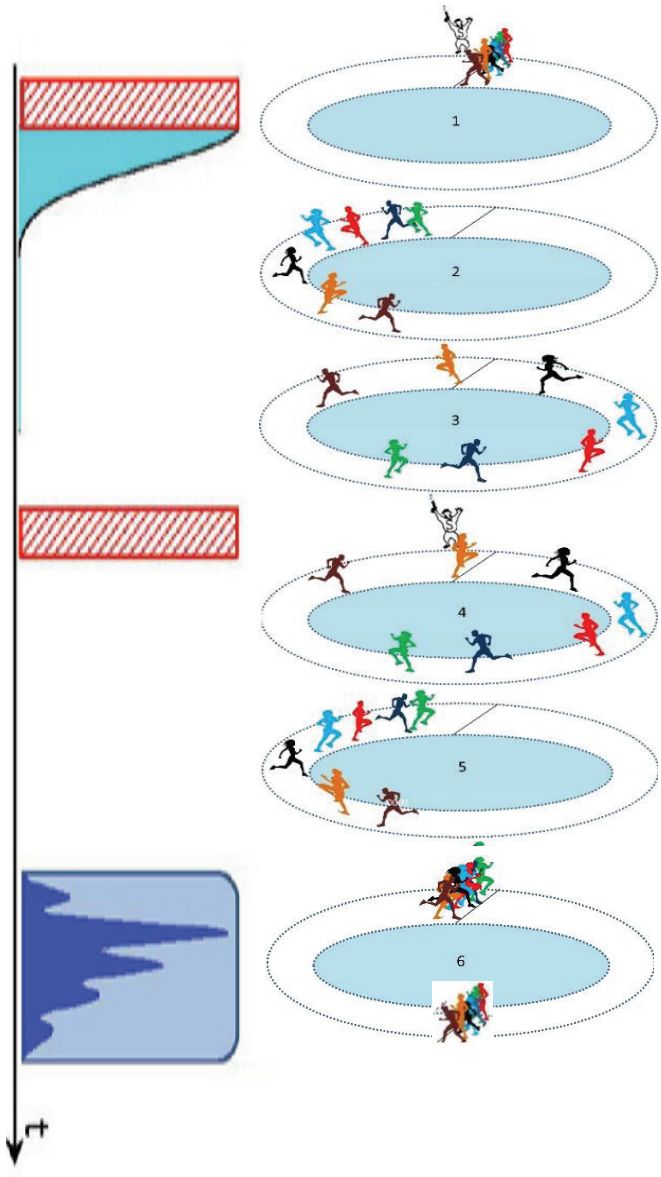


Рис. 6. Осцилляции интенсивности эха в зависимости от амплитуды импульсного магнитного поля $\langle H \rangle$ для различных длительностей импульсов (слева) и в зависимости от площади магнитного импульса (справа).



камертоном, то что суммарный звук, слышимый нами, становится то тише, то громче. В случае фотонного эха роль струны и камертона исполняют две группы излучателей с разностью собственных частот $\delta\omega$.

Условие наблюдения биений эха

Чтобы можно было наблюдать биения эха, расщепление частоты $\delta\omega$, как упоминалось выше, должно намного превосходить разброс частот излучателей $\omega^{max} - \omega^{min}$:

$$\delta\omega_{beat}{}^{min} \gg \omega^{max} - \omega^{min}. \qquad (12)$$

Условие (12) ничем не отличается от условия наблюдения расщепления оптической линии по линиям поглощения. В исторически значимом эксперименте Питера Зеемана [3] $\delta\omega$ было меньше разброса частот излучателей и Зееману не удалось определить $\delta\omega$. Он наблюдал лишь уширение линии в магнитном поле. Нужны очень большие магнитные поля для наблюдения расщепления линий. Кажется, что ничто не может нам помочь, чтобы ослабить ограничения снизу на минимальное значение расщепления $\delta\omega_{beat}{}^{min}$ собственных частот излучателей, которое может наблюдаться по биениям эха. Однако, не все так плохо, как кажется.

Учёт конечной длительности импульса

Известно, чтобы получить импульс света частоты ω_0 и длительности τ надо сложить световые волны в области частот шириной $2\pi/\tau$ с центральной частотой ω_0.

Рис. 7. Скорости у половины спортсменов увеличиваются, когда они находятся недалеко от финишной линии. Причём, увеличение скорости во много раз больше, чем сами скорости.

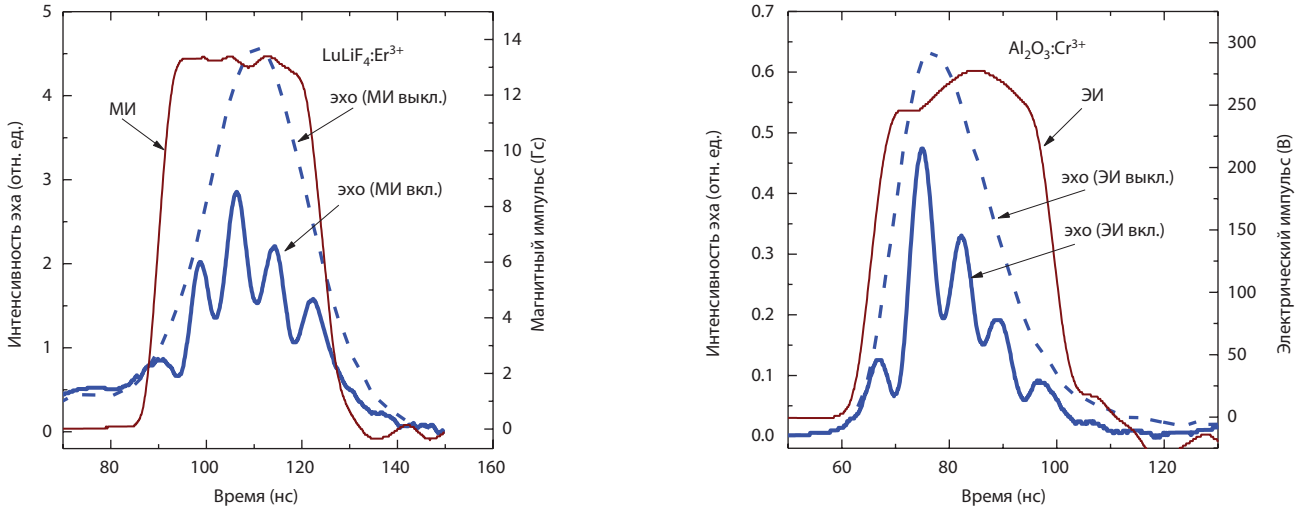


Рис. 8. Форма сигнала фотонного эха в случаях, когда импульс внешнего возмущения выключен (штриховые линии) и когда включен и перекрывается по времени со вспышками эха (сплошные линии). Тонкими сплошными линиями показаны импульсы возмущений МИ и ЭИ.

Если эта ширина превосходит разброс частот излучателей

$$2\pi/\tau \gg \omega^{max} - \omega^{min}. \qquad (13)$$

то все излучатели возбуждаются световым импульсом, все участвуют в гашении света после окончания светового импульса и поэтому длительность индукции определяется разбросом частот всех излучателей (3). Если длительность второго импульса так же удовлетворяет условию (13), то у всех бегунов изменяется направление скорости после второго сигнала стартера и все излучатели участвуют в образовании вспышки света. Для наблюдения биений эха необходимо выполнить условие (12).

В другом предельном случае, когда спектральная ширина импульса света $2\pi/\tau$ меньше разброса частот излучателей

$$2\pi/\tau \ll \omega^{max} - \omega^{min}, \qquad (14)$$

то только часть излучателей в области частот шириной $2\pi/\tau$ около ω_0 возбуждаются световым импульсом. Только эти излучатели участвуют в гашении света после окончания светового импульса и поэтому длительность индукции определяется разбросом частот этих излучателей. Подставляя в (3) $2\pi/\tau$ вместо $\omega^{max} - \omega^{min}$, имеем

$$\frac{2\pi}{\tau}\tau_{ind} = 2\pi\,. \qquad (15)$$

Видно, что длительность индукции равна длительности первого светового импульса, когда спектральная ширина импульса света меньше разброса частот излучателей (14). Обсудим роль длительности второго импульса света в уменьшении разброса скоростей бегунов, бегущих в противоположном направлении. Если его длительность намного короче длительности первого импульса, то у всех бегунов меняется направление скорости и длительность эха будет равна удвоенной длительности первого импульса. Если же длительность второго импульса света намного превышает длительность первого импульса, то спектральная ширина второго импульс намного меньше таковой для первого импульса света, и только небольшая часть бегунов меняет направление скорости по второму сигналу стартера. Разброс скоростей у бегунов, бегущих в противоположном направлении, уменьшается, а длительность эха увеличивается. И условие (12) на минимальное значение расщепления $\delta\omega_{beat}{}^{min}$ собственных частот излучателей, которое может наблюдаться по биениям эха заменяется на более слабое условие

$$\delta\omega_{beat}{}^{min} \gg 2\pi/(\tau_{echo}/2) = 4\pi/\tau_{echo}, \qquad (16)$$

где мы учли, что разброс частот определяет время подъёма (спада) эха, а длительность эха равна сумме времён подъёма и спада, т.е. удвоенной длительности подъёма. Если длительности световых импульсов равны, то

$$\tau_{echo} = 2\tau\sqrt{3}, \qquad (17)$$

и условие (16) можно записать в следующем виде

$$\delta\omega_{beat}{}^{min}/2\pi \gg 1/(\tau_{echo}/2) = 1/(\sqrt{3}\tau). \qquad (18)$$

Таким образом, учёт того, что длительность является не бесконечно малой величиной, а имеет конечное значение, позволило на несколько порядков величины

$$\frac{(\omega^{max} - \omega^{min})}{4\pi/\tau_{echo}} = \frac{(\omega^{max} - \omega^{min})/2\pi}{\tau\sqrt{3}} \simeq 10 \div 10^2 \gg 1 \qquad (19)$$

уменьшить значение расщепления $\delta\omega_{beat}{}^{min}$ собственных частот излучателей, которое может наблюдаться по биениям фотонного эха. Впервые, биения эха были наблюдены в нашей работе [4].

Биения света во время фотонного эха: наблюдение (частота биений около 100 МГц)

На рис. 8 приведены экспериментально наблюдаемые осциллограммы биения фотонного эха в импульсном магнитном [4–6] поле 14 Гс (слева) и импульсном электрическом [6–8] поле ≈ 600 В/см (справа). Для исследования биений эха были использованы эхо-активные ионы Er^{3+} в двух матрицах ($YLiF_4$ и $LuLiF_4$) и Cr^{3+} ионы в Al_2O_3. В первом случае для расщепления частот излучателей использовался импульс магнитного поля, во втором – импульс электрического поля. Импульсы возмущений (тонкие сплошные линии на рис. 8) перекрывались во времени с импульсами невозмущённого эха (изображены штриховыми линиями). Характерное значение измеренных расщеплений оптических линий $\delta\omega/2\pi \geq 60$ МГц. Разброс собственных частот всех излучателей при этом был 600 МГц.

Что говорит нам эхо, что пытается нам донести?

Эхо сообщает нам, как показано на рис. 8, что во время излучения эха, действует внешнее возмущение, которое расщепляет собственные частоты излучателей. Эхо говорит нам, что измерив период биений, можно определить расщепление линии $\delta\omega$ (расщепление частот излучателей), воспользовавшись соотношением (11). Далее Эхо советует нам, воспользоваться соотношением [7]

$$\delta\omega = \frac{\delta\omega}{\delta H}\langle H\rangle, \quad \delta\omega = \frac{\delta\omega}{\delta E}\langle E\rangle, \tag{20}$$

между $\delta\omega$ и средними по оптически возбуждаемому объёму значением амплитуды магнитного $\langle H\rangle$ или $\langle E\rangle$ электрического импульса. Затем Эхо предлагает выбор: можно определить или спектроскопические параметры $\delta\omega/\delta H$ и $\delta\omega/\delta E$, если амплитуды $\langle H\rangle$ и $\langle E\rangle$ полей импульсов известны, или найти амплитуды полей, если спектроскопические параметры известны.

Биения фотонного эха: применение

Мы в наших работах воспользовались пока только первым предложением Эха. Мы рассчитали численно амплитуды H и E, нашли средние значения $\langle H\rangle$ и $\langle E\rangle$ и по оптически возбуждаемому объёму и определили спектроскопические параметры

$$\begin{aligned}
&\frac{\delta\omega}{\delta E} = 2\pi\cdot 0.214\,\frac{\text{МГц}}{\text{В/см}}, \quad Cr^{3+}{:}Al_2O_3 \\
&\left.\begin{aligned}
&\frac{\delta\omega_\pi}{\delta H} = 2\pi\cdot 9.156\,\frac{\text{МГц}}{\text{Гс}}, \\
&\frac{\delta\omega_\sigma}{\delta H} = 2\pi\cdot 17.716\,\frac{\text{МГц}}{\text{Гс}},
\end{aligned}\right\} Er^{3+}{:}LuLiF_4
\end{aligned} \tag{21}$$

где $\delta\omega_\pi$ и $\delta\omega_\sigma$ – расщепления в магнитном поле импульса частот излучателей, возбуждённых π- и σ-поляризованным лазерным светом соответственно:

$$\begin{aligned}
&\frac{\delta\omega_\pi}{\delta H} = 2\pi\cdot(g'-g)\cdot 1.3996\,\frac{\text{МГц}}{\text{Гс}}, \\
&\frac{\delta\omega_\sigma}{\delta H} = 2\pi\cdot(g'+g)\cdot 1.3996\,\frac{\text{МГц}}{\text{Гс}}.
\end{aligned} \tag{22}$$

Здесь g и g' – параметры (g-факторы), которые определяют значения магнитного момента в основном ($^4I_{15/2}$) и возбуждённом ($^4F_{9/2}$) состояниях иона Er^{3+}. Таким образом, используя экспериментально определённые спектроскопические параметры (21) и их связь с g-факторами (22) были найдены не только разность или сумма g-факторов, но их значения по отдельности [4–6]

$$\left.\begin{aligned}
&g'(^4F_{9/2}) = 9.60, \\
&g(^4I_{15/2}) = 3.06.
\end{aligned}\right\} \; Er^{3+}{:}LuLiF_4\,. \tag{23}$$

Аналогичные результаты были получены для иона Er^{3+} в матрице $YLiF_4$:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\delta\omega_\pi}{\delta H} = 2\pi\cdot 9.274\,\frac{\text{МГц}}{\text{Гс}}, \\
&\frac{\delta\omega_\sigma}{\delta H} = 2\pi\cdot 18.069\,\frac{\text{МГц}}{\text{Гс}}, \\
&g'(^4F_{9/2}) = 9.77, \\
&g(^4I_{15/2}) = 3.14.
\end{aligned}\right\} Er^{3+}{:}YLiF_4 \tag{24}$$

Значения g-факторов в данном случае известны в литературе и можно сравнить точность использования биений фотонного эха при определении данных параметров.

Аккуратность и точность метода биений

Полученное нами [7, 8] значение параметра псевдо-Штарковского расщепления $(\delta\omega/\delta E)/2\pi = 0.214$ МГц/(В/см) хорошо согласуется с известными литературными данными: 0.176 [9], 0.228 [10], 0.220 ± 0.016 [11].

Значения $g(^4F_{9/2})$ и $g(^4I_{15/2})$ находятся в хорошем согласии с известными значениями

$YLiF_4{:}Er^{3+}$: $g(^4I_{15/2}) = 3.14$ [12], ЭПР,

$g'(^4F_{9/2}) = 9.84 \pm 0.25$ [13], 9.61 [14],

$LuLiF_4{:}Er^{3+}$: $g(^4I_{15/2}) = 3.09$ [15], ЭПР.

Подчеркнём полное совпадение значений измеренных нами g-факторов основного состояния $g(^4I_{15/2})$ для $YLiF_4{:}Er^{3+}$ и с точностью до 1% для $LuLiF_4{:}Er^{3+}$ со значениями, полученными методом ЭПР. g-фактор в возбуждённом состоянии в $LuLiF_4{:}Er^{3+}$ измерен впервые [4–6]:

$$g'(^4F_{9/2}) = 9.60. \tag{25}$$



Рис. 9. Семинар отдела квантовой акустики КФТИ (зав. отделом Копвиллем У. Х.). В первом ряду, слева направо: Г. П. Чугунова, Р. В. Сабурова, Ф. В. Валеева, В. В. Самарцев, У. Х. Копвиллем, В. Р. Нагибаров, В. А. Пирожков и В. Г. Торопов. 1970 год.

Следует отметить, что отношение расщеплений σ- и π-линий в одном и том же магнитном поле

$$\frac{\delta\omega_\sigma}{\delta\omega_\pi} = \frac{\delta\omega_\sigma/\delta H}{\delta\omega_\pi/\delta H} = \frac{g'+g}{g'-g} \qquad (26)$$

не зависит от вычисленных значений поля, т.е., не зависит от возможных погрешностей вычислений. И если взять для g-факторов основного состояния g значения, найденные методом ЭПР, а для спектроскопических параметров экспериментально полученные значения (21) и (24), то получим следующие значения g-факторов для возбуждённого состояния

$$g'(^4F_{9/2}) = 9.61 \quad Er^{3+}:LuLiF_4,$$
$$g'(^4F_{9/2}) = 9.76 \quad Er^{3+}:YLiF_4. \qquad (27)$$

Таким образом полученные значения g-факторов почти тождественны значениям, приведённым в (23) и (24). Это подтверждает аккуратность вычислений магнитного поля в оптически возбуждаемом объёме и высокую точность метода биений фотонного эха.

Заключение

Кажется, что мы впервые частично сняли проклятие Геры с нимфы Эхо и научили её говорить в мегагерцовом диапазоне.

Отметим, что биения эха были наблюдены и использованы нами (для определения g-факторов возбуждённых состояний) впервые, причём в оптическом диапазоне. Биения эха ещё не наблюдены ни в ЯМР (ядерный магнитный резонанс) ни в ЭПР (электронный парамагнитный резонанс) диапазонах. Обычно новые результаты сначала получали в ЯМР, затем распространялись на ЭПР и после этого на оптический диапазон. А в нашем случае наоборот сначала в фотонном эхе.

Можно сказать, что фотонное эхо, предсказанное более 50 лет назад [16] сотрудниками нашего института Копвиллемом У. Х. и Нагибаровым В. Р. (см. рис. 9), все более и более раскрывает свой потенциал и используется в различных областях физики.

Литература

1. Hahn E.L.: Phys. Rev. **80**, 580 (1950)
2. Лисин В.Н., Шегеда А.М., Герасимов К.И.: Письма в ЖЭТФ **95**, 67 (2012); Lisin V.N., Shegeda A.M., Gerasimov K.I.: JETP Lett. **95**, 61 (2012)
3. Zeeman P.: Nature **55**, 347 (1897)
4. Лисин В.Н., Шегеда А.М.: Письма в ЖЭТФ **96**, 328 (2012); Lisin V.N., Shegeda A.M.: JETP Lett. **96**, 298–302 (2012)
5. Lisin V.N., Shegeda A.M., Samartsev V.V.: Laser Phys. Lett. **12**, 025701 (2015)
6. Lisin V.N., Shegeda A.M., Samartsev V.V.: EPJ Web of Conferences **103**, 07004 (2015)
7. Lisin V.N., Shegeda A.M., Samartsev V.V.: Laser Phys. Lett. **13**, 075202 (2016)
8. Lisin V.N., Shegeda A.M., Samartsev V.V.: arXiv:submit/1577384 [cond-mat. other] 2 June (2016)
9. Kaiser W.: Phys. Rev. Lett. **6**, 605 (1961)
10. Cohen M., Bloembergen N.: Phys. Rev. **135**, A950 (1964)
11. Szabo A., Kroll M.: Opt. Lett. **2**, 10 (1978)
12. Sattler J., Nemarich J.: Phys. Rev. B **4**, 1 (1971)
13. Kulpa S.: J. Phys. Chem. Solids **36**, 1317 (1975)
14. Macfarlane R.M., Cassanho A., Meltzer R.S.: Phys. Rev. Lett. **69**, 542 (1992)
15. Abdulsabirov R. et. al.: Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Fiz. **2**, 24 (1988)
16. Копвиллем У.Х., Нагибаров В.Р.: Физ. Метал. и Металловед. **15**, 313 (1963)

Теоретическое исследование спонтанного четырёхволнового смешения в суженных оптических волокнах

А. А. Шухин, А. А. Калачёв

Лаборатория нелинейной оптики

Теоретически исследован процесс генерации двухфотонных и однофотонных состояний света в режиме спонтанного четырёхволнового смешения в оптических нановолокнах. Проанализированы спектральные особенности спонтанного четырёхволнового смешения с учётом нерегулярного профиля суженных волокон, который естественным образом получается при их изготовлении. Показано, что используя суженные оптические волокна можно реализовать однофотонный источник с высокой степенью чистоты генерируемых однофотонных состояний.

Введение

В настоящее время много внимания уделяется развитию квантовых оптических технологий [1]. Актуальной задачей является разработка методов генерации, передачи и хранения квантовых состояний света, которые являются основным ресурсом при создании, например, квантового интернета [2]. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка источников двухфотонных и однофотонных состояний света на основе разнообразных когерентных и нелинейных оптических явлений, таких как спонтанное параметрическое рассеяние (СПР) и спонтанное четырёхволновое смешение (СЧВС) [3]. Последнее, в частности, может наблюдаться в широком классе центросимметричных материалов, обладающих ненулевой кубичной восприимчивостью, к которым относятся широко используемый диоксид кремния (SiO_2) и обладающий высокой нелинейностью селенид мышьяка (As_2Se_3) [4]. Перспективной системой для наблюдения СЧВС является нановолокно – оптическое волокно диаметром от десятков до сотен нанометров [5], что связано с рядом его особенностей. Во-первых, поскольку нановолокна изготавливаются из стандартных оптических волокон, они идеальным образом встраиваются в существующие телекоммуникационные сети для передачи тех квантовых состояний света, которые в них генерируются. Во-вторых, благодаря малому диаметру нановолокон, в них существенно возрастает эффективность параметрического преобразования за счёт малого поперечного размера взаимодействующих мод электромагнитного поля [6]. В-третьих, поскольку в области перетяжки нановолокна образуется эванесцентное поле, которое эффективно взаимодействует с окружающей средой, то появляется возможность использовать нановолокна в качестве сенсоров [7] и управлять свойствами генерируемых квантовых состояний света, меняя окружение нановолокна.

Нерегулярное нановолокно

Нерегулярное нановолокно является суженным оптическим волокном, которое получается методом нагрева и растяжения [8] и характеризуется неоднородным диаметром вдоль продольной координаты (рис. 1). Такие волокна изготавливаются из стандартных одномодовых кварцевых оптических волокон, имеющих характерные диаметры сердцевины и оболочки 10 мкм и 125 мкм, соответственно. При нагревании и растяжении соотно-

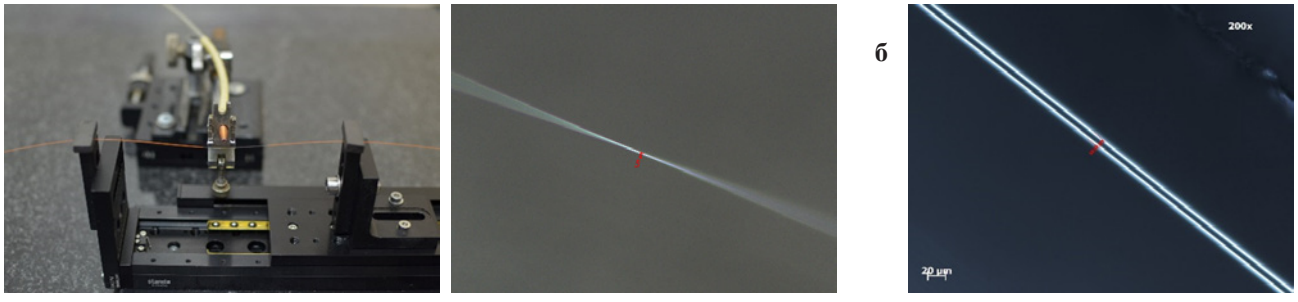


Рис. 1. а Центральный узел установки для изготовления нановолокон методом нагрева и растяжения (Институт перспективных исследований АН РТ). Стандартное оптоволокно закрепляется в держателях и растягивается в присутствии пламени водородной горелки, так чтобы получался требуемый профиль. **б** Изготовленные образцы нановолокон для наблюдения в них спонтанного четырёхволнового смешения.

шение диаметров (125 мкм/10 мкм = 12.5) сохраняется на всём протяжении оптоволокна. В адиабатическом приближении [9] профиль суженного волокна, который обычно описывается экспоненциальной функцией, должен изменяться достаточно медленно. В нашем случае рассматривается суженное волокно длиной 10 см, имеющее наименьший диаметр в центре (около 1 мкм) и зеркально симметричный профиль относительно центральной точки.

Спектральные особенности СЧВС в нерегулярных нановолокнах

Для исследования спектральных характеристик бифотонного поля, генерируемого в нерегулярном нановолокне, рассмотрим вектор состояния поля, который в первом порядке теории возмущений квантовой механики может быть рассчитан следующим образом [10]:

$$\left|\psi\right\rangle = \left|0\right\rangle + A\iint d\omega_s d\omega_i F(\omega_s,\omega_i) a^{+}_{m_s n_s}(\omega_s) a^{+}_{m_i n_i}(\omega_i)\left|0\right\rangle, \qquad (1)$$

где $F(\omega_S, \omega_i)$ – спектральная амплитуда бифотонного поля, $|0\rangle$ – вакуумное состояние, $a^{+}_{mn}(\omega)$ – оператор рождения фотона на частоте ω в пространственную моду, характеризуемую поперечными индексами m, n и модовой функцией $u_{mn}(\rho)$, $\rho = (x, y)$, $\int d^2\rho |u(\rho)|^2 = 1$. Для вычисления спектра сигнального и холостого фотонов, необходимо рассчитать функцию спектральной амплитуды. В соответствии с методом поперечных сечений [11], нерегулярное волокно разбивается на участки вдоль продольной координаты, каждый из которых обладает однородным диаметром. Тогда расчёт спектральной амплитуды нерегулярного суженного волокна сводится к расчёту спектральных амплитуд полей, рожденных в каждом сечении, и последующем сложении их с определёнными фазами. В соответствии с этим, результирующая спектральная амплитуда выглядит следующим образом [12]:

$$F(\omega_s,\omega_i) = f(\omega_s,\omega_i)\Phi(\omega_s,\omega_i) \qquad (2)$$

– совместная спектральная амплитуда, $f(\omega_i, \omega_s)\int d\omega_p E_p(\omega_p) E_p(\omega_s + \omega_s - \omega_p)$ – свёртка двух функций $E_p(\omega)$, описывающих спектральную амплитуду импульсов накачки,

$$\Phi(\omega_s,\omega_i) = \sum_{q=1}^{N}\left(l_q \,\mathrm{sinc}\left[\frac{\Delta k_q(\omega_s,\omega_i) l_q}{2}\right]\exp\left[\frac{-\mathrm{i}\,\Delta k_q(\omega_s,\omega_i) l_q}{2}\right]\right)$$

$$\times \exp\left(\sum_{i=q+1}^{N} -\mathrm{i}\,\Delta k_i (L - l_i)\right)\cdot \eta^{q}_{m_p n_p m_p n_p m_s n_s m_i n_i} \qquad (3)$$

– функция фазового синхронизма, $N = L/l_q$ – число сечений волокна, l_q – длина сечения с индексом q (в нашем случае считалось l_q = 200 мкм), L – общая длина волокна с переменным сечением,

$$\Delta k_q(\omega_s,\omega_i) = \frac{2\omega_p n^{\mathrm{eff}}_{m_p n_p}(\omega_p)}{c} - \frac{\omega_s n^{\mathrm{eff}}_{m_s n_s}(\omega_s)}{c} - \frac{\omega_i n^{\mathrm{eff}}_{m_i n_i}(\omega_i)}{c} \qquad (4)$$

– расстройка волновых векторов,

$$\eta^{q}_{m_p n_p m_p n_p m_s n_s m_i n_i} = \int d^2\rho\, u_{m_p n_p}(\rho) u_{m_p n_p}(\rho) u^{*}_{m_s n_s}(\rho) u^{*}_{m_i n_i}(\rho) \qquad (5)$$

– интеграл перекрытия взаимодействующих мод в сечении с индексом q, n^{eff}_{nm} – эффективный показатель преломления моды, характеризуемой поперечными индексами m и n.

В итоге, спектр как сигнального, так и холостого поля образуется за счёт интерференции фотонов, рожденных в различных сечениях нерегулярного волокна. Результат этой интерференции можно видеть на графике спектральной амплитуды бифотонного поля. В случае нерегулярного нановолокна, спектральная амплитуда имеет характерные интерференционные полосы (рис. 2а), в то время как для однородного нановолокна и однородного стандартного волокна, спектральная амплитуда имеет вид единичных максимумов (рис. 2б). Широкий спектр генерируемых фотонов можно использовать для получения квантовых

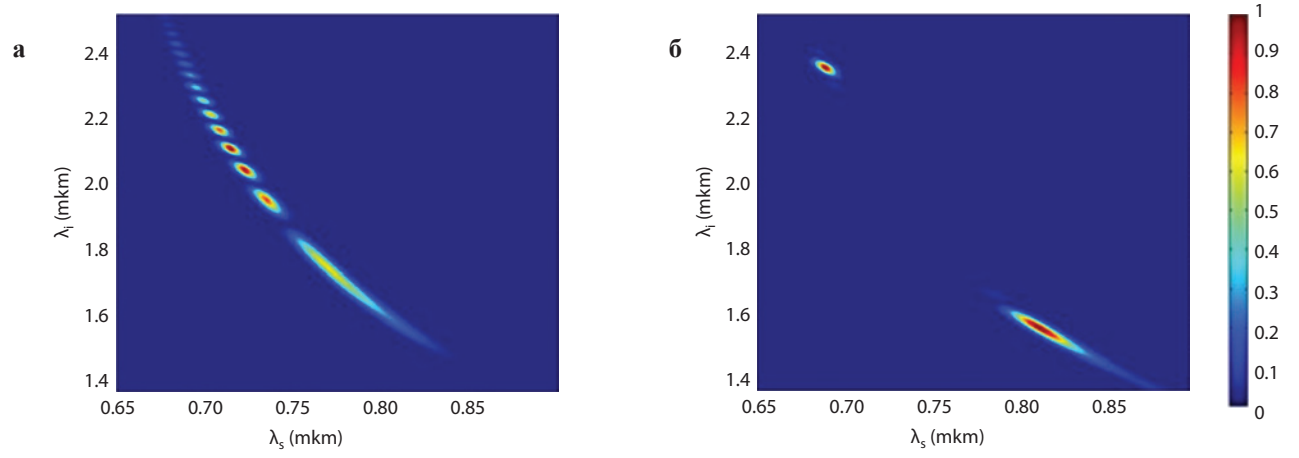


Рис. 2. Спектральная амплитуда поля СЧВС $|F(\lambda_s, \lambda_i)|^2$ в нерегулярном нановолокне (**а**), в однородном стандартном волокне (**б** – верхний максимум), в однородном нановолокне диаметром 900 нм (**б** – нижний максимум) при накачке на длине волны 1064 нм.

состояний света в широком диапазоне длин волн, начиная от видимой области и заканчивая дальней ИК, путём выделения необходимого максимума в широком спектре излучения СЧВС в нерегулярном волокне.

Однофотонный источник на основе СЧВС в нановолокне

Коррелированные пары фотонов (бифотоны), генерируемые в процессе СЧВС, могут быть использованы для создания однофотонного источника с оповещением (рис. 3) аналогично тому, как это делается в схемах, основанных на СПР [10]. При использовании такой схемы, один фотон из коррелированной пары попадет на детектор, по сигналу с которого, в случае детектирования, открывается затвор. Таким образом, на выходе устройства получается однофотонное состояние с оповещением. Одной из основных характеристик однофотонного состояния является его чистота (purity). В идеальном случае чистого состояния, поле на выходе из источника описывается вектором состояния: $\rho = |\psi_j\rangle\langle\psi_j|$. В противном случае, поле находится в смешанном состоянии и описывается набором векторов состояний с различными амплитудами: $\rho = \sum_j p_j|\psi_j\rangle\langle\psi_j|$. При этом, чтобы однофотонное состояние было чистым, первоначальное двухфотонное состояние должно быть факторизованным по частоте. Это означает, что спектральная амплитуда, описывающая бифотонное поле на выходе из нановолокна, должна иметь вид эллипса, вытянутого вдоль одной из осей графика, либо иметь вид круга [13, 14]. Как показано в работе [15], в суженных волокнах имеется возможность генерации чистых состояний путём подбора длины волны накачки при заданном диаметре перетяжки. Соответствующий пример показан на рис. 4б. В рассматриваемом случае фотоны будут излучаться на длинах волн 1550 нм, что соответствует длине волны телекоммуникаций и 810 нм, что соответствует высокой вероятности оповещения благодаря хорошей чувствительности фотоприёмников в данном диапазоне длин волн. Характерной особенностью такого источника является то, что излучение происходит в невырожденном режиме, при котором шумы рамановского рассеяния поля накачки малы.

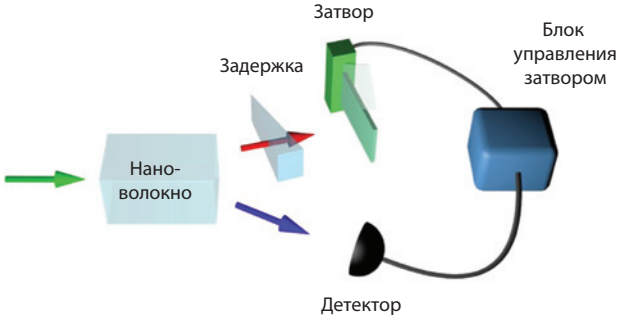


Рис. 3. Принципиальная схема однофотонного источника с оповещением.

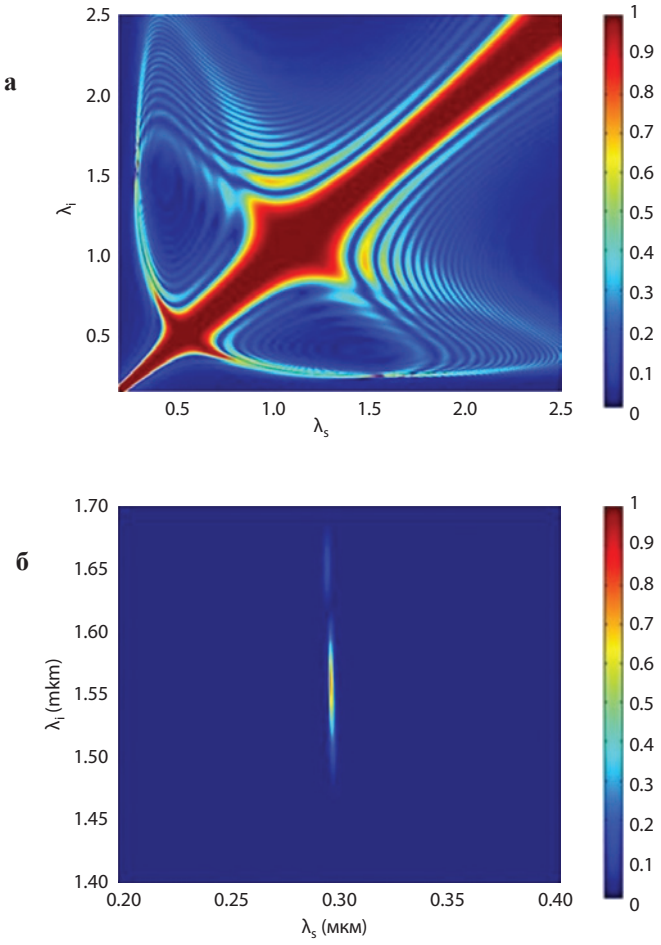


Рис. 4. а Функция фазового синхронизма $f(\lambda_s, \lambda_i)$, описывающая поле СЧВС в суженном нановолокне при накачке широкополосным полем. **б** Спектральная амплитуда поля $|F(\lambda_s, \lambda_i)|^2$, находящегося в близком к чистому состоянии при накачке узкополосным импульсом и наличии фильтра. Результат расчёта по формуле (2) при следующих значениях параметров: диаметр перетяжки нановолокна 812 нм, длина волны накачки 290 нм, спектральная ширина накачки 5 нм, и при наличии фильтра для сигнального поля, имеющего полосу пропускания 5 нм на длине волны 290 нм.

Заключение

Проанализирован процесс спонтанного четырёхволнового смешения в суженных оптических волокнах с нерегулярным профилем. Рассчитаны эффективные показатели преломления и модовые функции для различных диаметров оптоволокна, а также построены функции спектральной амплитуды бифотонного поля, рождающегося в различных нановолокнах. Подобраны параметры суженного волокна и излучения накачки для генерации чистых однофотонных состояний.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 14-29-07192-офи-м, 15-02-05478)

Литература

1. O'Brien J.L.: Nature Photonics **3**, 687–695 (2009)
2. Kimble H. J.: Nature **453**, 1023–1030 (2008)
3. Eisaman M.D.: Rev. Sci. Instrum. **82**, 071101 (2011)
4. Xiong C. et al.: Applied Physics Letters **98**, 051101 (2011)
5. Brambilla G.: Journal of Optics **12**, 043001 (2010)
6. Wu X., Tong L.: Nanophotonics **2**, 407–428 (2013)
7. Polynkin P. et al.: Optics letters **30**, 1273–1275 (2005)
8. Tong L.: Optics Communications **285**, 4641–4647 (2012)
9. Hartung A., Brueckner S., Bartelt H.: Optics express **18**, 3754–3761 (2010)
10. Калачев А.А.: Казан. ун-т (2012)
11. Katsenelenbaum B.Z.: Ed by USSR Academy of Sciences. Moscow (1961) [In Russian]
12. Shukhin A.A., Kalachev A.A.: Computer optics **40**, 141–146 (2016)
13. Laudenbach F. et al.: Optics express **24**, 2712–2727 (2016)
14. Christ A. et al.: Optics express **17**, 3441–3446 (2009)
15. Шухин А.А., Калачев А.А.: Известия РАН. Серия физическая **80**, 861–864 (2016)

Комбинационное рассеяние света красителя метилового оранжевого, осаждённого на кремнии с наночастицами серебра

В. В. Воробьев, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Ю. Н. Осин, А. Л. Степанов

Группа нанооптики и наноплазмоники; отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной физики

Проведено апробирование применения нового, синтезированного по оригинальной нанотехнологии с применением метода ионной имплантации, композиционного материала на основе пористого кремния с наночастицами серебра в качестве чувствительного элемента химического сенсора. На примере красителя метиловый оранжевый показана возможность регистрации малых количеств анализируемого вещества за счёт проявления гигантского комбинационного рассеяния света органических молекул в ближнем поле металлических наночастиц.

Введение

В оптической спектроскопии поверхностей и границ раздела сред привлекает к себе все большее внимание явление, называемое в отечественной литературе гигантским комбинационным рассеянием света (ГКР) молекулами [1], находящимися вблизи наноструктур (в частности, наночастиц) благородных металлов, в которых проявляются эффекты плазмонного резонанса и вызванные ими усиления локальных электромагнитных полей [2]. В зарубежной литературе усиленное наноструктурированной поверхностью комбинационное (КР) рассеяние света молекулами принято называть SERS (Surface Enhanced Raman Scattering). Это название, как полагает В. М. Агронович [1], более точно, чем ГКР, передаёт сущность явления, поскольку на ряде наноструктур и для определённых молекул усиление КР не слишком велико. Хотя в настоящее время уже можно, по-видимому, считать качественно понятными основные физические и химические факторы, приводящие к ГКР, интерес к различным задачам, решаемым с помощью ГКР не ослабевает. Одно из направлений развиваемых в области ГКР заключается в расширении класса органических соединений, способных эффективно быть детектируемым и исследованными данным методом. Другой, не менее важный подход материаловедения заключается в поиске и разработке новых технологий создания плазмонных наноструктурированных материалов (ГКР-среды) существенно облегчающих регистрацию КР малого количества органических молекул, как показано в обзоре [3]. Как показывает анализ литературных данных в настоящее время наиболее часто используются ГКР-среды с наночастицами серебра. Для этого используются как химические, так и физические способы получения ГКР-сред. К первым методам в большей степени можно отнести, например, способ получения металлических наночастиц восстановлением из раствора нитрата серебра цитратом натрия [4] или иммерсионное осаждение серебра [3]. Недостатками химического подхода являются нестабильность и не достаточная воспроизводимость синтеза. Помимо этого, поверхность восстановленного или осаждённого серебра часто загрязняется неорганическими остатками, что приводит к появлению дополнительных линий в КР спектре. Физическими методами формирования ГКР-подложек с наночастиц серебра являются лазерная абляция [5], электронно-лучевая литография [6], вакуумное осаждение [7] и др.

В качестве субстратов для осаждения металлических наночастиц в ряде работ было предложено использовать пористый кремний, синтезированный методом анодного травления, с наночастицами серебра на его поверхности (Ag:PSi). При этом для формирования наночастиц серебра использовались методы термальной декомпозиции солей серебра [8], иммерсионное осаждение [9], способ струйной печати [10], электроосаждение из раствора [11] и др. Целью данной работы является наблюдение ГКР от органического соединения – красителя метилового оранжевого (МО), нанесённого на подложки пористого кремния с наночастицами серебра (Ag:PSi), изготовленных по оригинальной технологии с привлечением высокодозовой низкоэнергетической ионной имплантации [12–14]. Приводятся результаты спектров ГКР МО красителя на образцах Ag:PSi, сформированных при различных значения плотности тока в ионном пучке.

Эксперимент

В настоящем исследовании в качестве подложки были использованы пластины c-Si с полированной поверхностью *p*-типа проводимости с кристаллографической ориентацией (100) толщиной 0.5 мм. Имплантация c-Si проводилась однозарядными ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ при дозе облучения $D = 1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 и при различных значениях плотности тока в ионном пучке J = 2, 8, 15, 50 мкА/см^2 на ионном ускорителе ИЛУ-3. Спектры оптического отражения были измерены на спектрометре AvaSpec 2048 (Avantes) при нормальном угле падении зондирующего и отражённого светового луча к поверхности образца через спаренный волновод

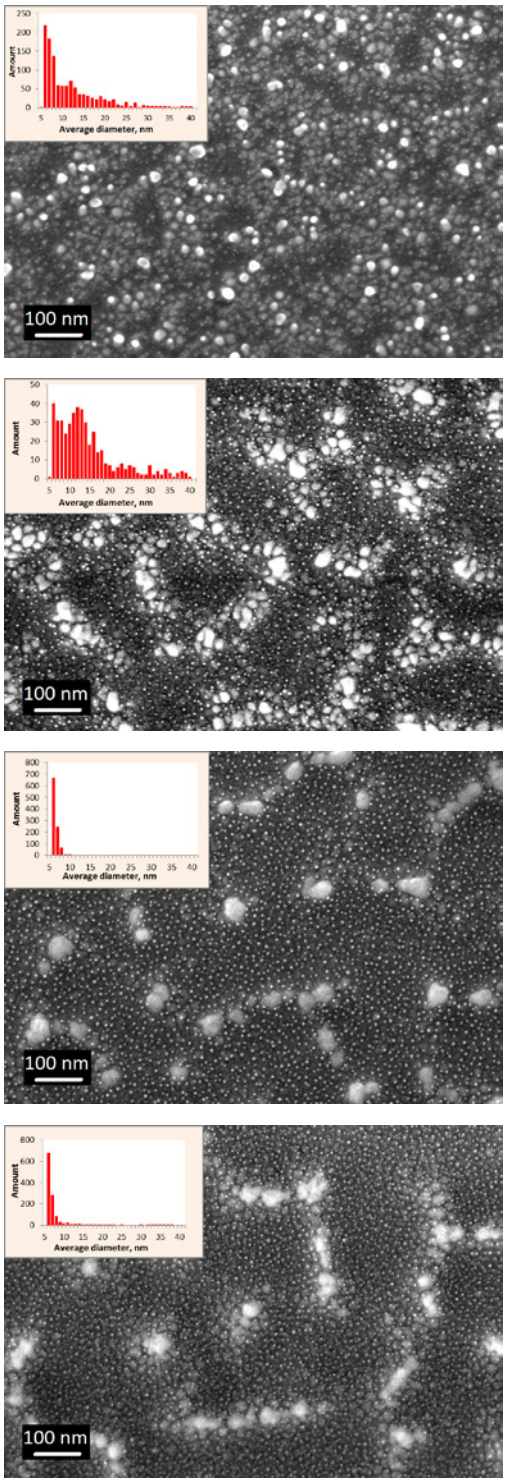


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхностей Ag:PSi, сформированных имплантацией ионами Ag^+ при различных значениях плотностях тока в ионном пучке: 2 (**а**), 8 (**б**), 15 (**в**) и 50 (**г**) мкА/см^2. На вставках показаны диаграммы распределения наночастиц серебра по размерам.

в спектральном диапазоне от 220 и до 1100 нм при комнатной температуре. Локальная морфология и структура поверхности имплантированного Si были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на СЭМ-микроскопе Merlin (Carl Zeiss), оснащенном детектором дифракции отражённых электронов HKL NordLys (Oxford Instruments).

Регистрация спектров КР света выполнялась на конфокальном КР-микроскопе DXR Raman Microscope (Thermo Scientific). В качестве источника возбуждения был использован лазер с длиной волны возбуждения 780 нм. Максимальная мощность излучения на образце составляла 10 мВт. Спектральный диапазон измерений составил 400–1650 см$^{-1}$. Спектры КР регистрировались для раствора красителя МО, разведенного в бидистиллированной воде в концентрации 10^{-2} М. Капля (100 мкл) раствора МО наносилась на подложку пористого кремния с наночастицами серебра (Ag:PSi). Высота капли составляла порядка 500 мкм. Для сравнения чистого красителя и красителя в присутствии наночастиц серебра измерялись КР спектры в конфокальном режиме при фокусировке лазерного излучения на горизонтальные границы раздела капля-воздух и капля-подложка (вставка на рис. 1). Во втором случае, благодаря плазмонному резонансу в наночастицах серебра наблюдается усиленный КР сигнал (ГКР).

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены СЭМ-микрофотографии образцов Ag:PSi, сформированных при различных значениях плотности тока в ионном пучке. Яркие светлые пятна, как это были показано ранее [12, 13], являются наночастицами серебра. Как видно из рисунка, для всех образцов характерно наличие двух типов размеров наночастиц, мелких (менее 20 нм) и крупных. На вставках к микрофотографиям приведены соответствующие диаграммы распределения наночастиц по размерам первой группы. При плотности тока в ионном пучке 2, 15 и 50 мкА/см^2 (рис. 1а, в, г) средний диаметр малых наночастиц, практически не изменяется и составляет примерно 7 нм.

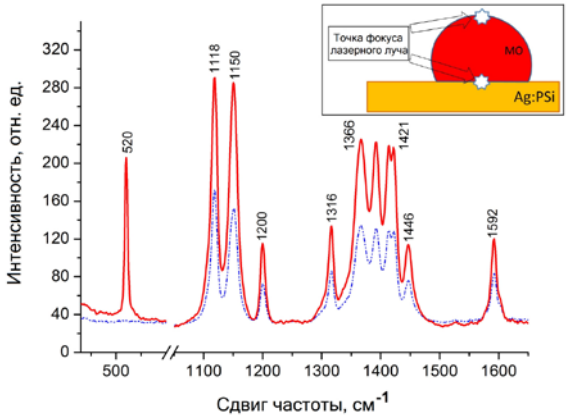


Рис. 2. ГКР спектр раствора МО на границах раздела (пунктирная линия) воздух-раствор и (сплошная линия) раствор-подложка с наночастицами серебра. На вставке схематически показан образец Ag:PSi с нанесённой каплей МО в поперечном сечении и точки фокусировки лазерного излучения при возбуждении КР спектров.

Таблица 1. Частоты, интенсивности и коэффициенты усиления линий в КР спектре МО при нанесении на поверхность Ag:PSi.

Параметр									
ν (см$^{-1}$)	1118	1150	1200	1316	1366	1392	1421	1446	1592
$I_{кр}$ (отн.ед.)	172	152	72	85	134	131	128	76	83
$I_{гкр}$ (отн.ед.)	290	285	114	133	225	222	216	114	120
K	1.68	1.88	1.58	1.56	1.68	1.69	1.69	1.5	1.45

При плотности тока в ионном пучке 8 мкА/см^2 (рис. 1б) на поверхности кремния большинство мелких наночастиц оказываются в пределах от 10 до 15 нм.

На рис. 2 представлены КР-спектры капли красителя МО, измеренные на границах раздела капля-воздух (пунктирная линия) и капля подложка (сплошная линия). На вставке к рисунку показаны точки фокусировки возбуждающего излучения. Для данного эксперимента ГКР-подложка Ag:PSi была сформирована при J = 8 мкА/см^2. На обоих КР спектрах присутствуют узкие линии КР на частотах 1118, 1150, 1200, 1316, 1366, 1392, 1421, 1446 и 1592 см$^{-1}$, соответствующие колебаниям молекул МО согласно литературным данным [15]. Как видно из рисунка спектр, измеренный для МО в присутствии наночастиц серебра, характеризуется большей интенсивностью КР-линий (примерно в 2 раза) по отношению к спектру красителя МО, т.е. наблюдается усиление сигнала КР. Отметим также, что на спектре для молекул МО на имплантированном образце Ag:PSi дополнительно проявляется хорошо известная линия на частоте 520 см$^{-1}$, относящаяся к кремниевой подложке. Наличие в спектре одновременно линий подложки и красителя указывает на достаточно точную фокусировку лазерного пучка на границе капли МО и Ag:PSi, как изображено на вставке рис. 2.

Коэффициент усиления КР сигнала можно оценить с помощью соотношения [16]:

$$K = (I_{ГКР}/I_{КР})\cdot(C_{КР}/C_{ГКР}),$$

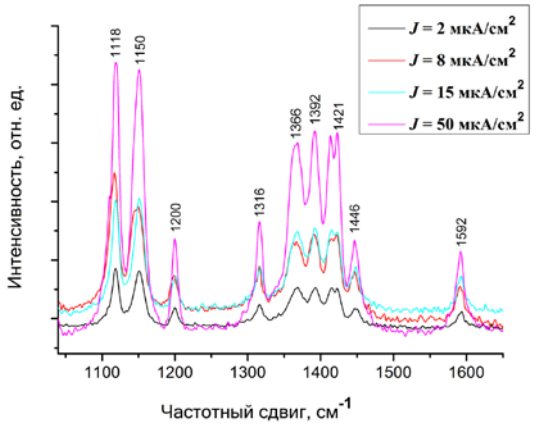


Рис. 3. ГКР спектры раствора МО в присутствии наночастиц серебра на подложках, полученных при $D = 1.5\cdot10^{17}$ ион/см^2 и J = 2, 8, 15, 50 мкА/см^2.

где $I_{ГКР}$ и $I_{КР}$ – интенсивность линий в ГКР и КР спектрах, $C_{ГКР}$ и $C_{КР}$ – соответствующие концентрации молекул. Интенсивности линии для КР и ГКР с соответствующими коэффициентами усиления линий представлены в таблице 1.

Для сравнения эффекта усиления от подложек Ag:PSi, изготовленных при различных значениях плотности тока в ионном пучке при имплантации (J = 2, 8, 15, 50 мкА/см^2), были проведены аналогичные измерения КР спектров (рис. 3). Видно, что при увеличении плотности тока в ионном пучке интенсивности линий МО возрастают. Максимальное усиление среди измеренных образцов наблюдается для подложки, изготовленной при $D = 1.5\cdot10^{17}$ ион/см^2 и J = 50 мкА/см^2.

Заключение

Проведены наблюдения эффекта усиления КР красителя МО на новых типах ГКР-подложках на основе пористого кремния с наночастицами серебра, изготовленных при различных параметрах ионной имплантации (E = 30 кэВ, $D = 1.5\cdot10^{17}$ ион/см^2 и J = 2, 8, 15, 50 мкА/см^2). КР спектроскопия растворов МО показала усиление интенсивности сигнала рассеяния. Наибольшее усиление сигнала КР наблюдается для подложки, изготовленной при максимальном значении J = 50 мкА/см^2. Предполагаемые дальнейшие исследования будут связаны с установлением связи между гранулометрическими характеристиками наночастиц серебра на поверхности кремния и эффективность проявления сигнала ГКР для различных органических соединений. Однако уже сейчас полученные экспериментальные результаты показывают принципиальную возможность и перспективы использования подложек пористого кремния с наночастицами серебра, изготовленных ионной имплантацией в качестве сенсора химических соединений.

Отдельные результаты работы были представлены на конференциях: 1st International Symposium Advanced Photonics Materials (APM 2016) в Ст. Петербурге, II-ой Международной школе-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Материалы и технологии XX века” и Двадцатой юбилейной международной молодежной научной школе “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” в Казане.

Результаты по микроскопии был получены на оборудовании Междисциплинарного центра “Аналитическая микроскопия” Казанского (Приволжского) федерального

университета. Авторы выражают благодарность Н. Н. Брандту (Физический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва) за помощь в проведении КР измерений. Данные исследования проведены при финансировании проектом РФФИ № 16-29-06137_офи_м и программой УМНИК (В. В. Воробьев).

Литература

1. Ченга Р., Фуртака Т., Агранович А.М. (ред.): Гигантское комбинационное рассеяние света. М.: Мир 1984. 408 с.
2. Kreibig U., Volmer M.: Optical properstes of metal clusters. Springer: Berlin 1995. 533 p.
3. Ouyang L., Ren W., Zhu L., Irudayaraj J.: Rev. Anal. Chem. **12**, 1–23 (2016)
4. Lee P.C., Meisel D.: J. Phys. Chem. **86**, 3391–3395 (1982)
5. Koleva M.E., Nedyalkov N.N., Atanasov P.A., Gerlach J.W., Hirsch D., Prager A., Rauschenbach N.A., Fukata N., Jevasuwan W.: J. Alloys Comp. **665**, 282–287 (2016)
6. Abu Hatab N.A., Oran J.M., Sepanial M.J.: ACS Nano **2**, 377–385 (2008)
7. Vo-Dinh T., Stokes D.L., Griffin G.D., Volkan M., Kim U.J., Simon M.I.: J. Raman Spectr. **30**, 785–793 (1999)
8. Chan S., Kwon S., Koo T.-W., Lee L.P., Berlin A.A.: Adv. Mater. **15**, 1595–1598 (2003)
9. Lin H., Mock J., Smith D., Gao T., Sailor M.: J. Phys. Chem. B **108**, 11654–11659 (2004)
10. Novara C., Petracca F., Virga A., Rivolo P., Ferrero S., Chiolerio A., Geobaldo F., Porro S., Giorgis F.: Nano Express **9**, 527-1–527-7 (2014)
11. Dao T.C., Luong T.Q.N., Cao T.A., Kieu N.M., Le V.V.: Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol. **7**, 15007-1–15007-7 (2016)
12. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Осин Ю.Н.: Способ изготовления пористого кремния. Патент РФ на изобретение № 2577515. 2015.
13. Stepanov A.L., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Vorobev V.V., Kavetskyy T.S., Osin Y.N.: Rev. Adv. Mater. Sci. **40**, 155–164 (2015)
14. Степанов А.Л.: Фотонные среды с наночастицами, синтезированными ионной имплантацией. Саарбрюккен: Lambert Acad. Publ. 2014. 353 с.
15. Zhang A., Fang Y.: J. Colloid Interf. Sci. **305**b, 270–280 (2007)
16. Шабуня-Клячковская Е.В., Гапоненко С.В., Ващенко С.В., Станкевич В.В., Степина Н.П., Мацукович А.С.: ЖПС **81**, 378–383 (2014)

Оптическое отражение для кремния с ионно-синтезированными наночастицами серебра

В. В. Воробьев, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, Ю. Н. Осин, А. Л. Степанов

Группа нанооптики и наноплазмоники; отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной физики

Исследовано оптического отражения поверхности слоёв Si, имплантированного ионами Ag^+ при низкой энергии 30 кэВ в широком интервале доз $5.0 \cdot 10^{14}$–$1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2. Установлено, что с ростом ионной дозы облучения происходит монотонное снижение интенсивности отражения в ультрафиолетовой области спектра Si, обусловленное аморфизацией и макроструктурированием приповерхностного слоя полупроводника. В длинноволновой области отражения наблюдается появление селективной полосы с максимумом вблизи 830 нм вследствие проявления плазмонного резонанса ионно-синтезируемых наночастиц Ag. Структурные изменения слоёв Si и формирование наночастиц Ag контролировалось на сканирующем электронном и атомно-силовом микроскопах.

Введение

С целью повышения поглощательной способности Si солнечных элементов относительно недавно был предложен подход, заключающийся в использовании в структуре Si наночастиц серебра малых размеров (<30 нм) [1, 2], в которых под действием света возникает локализованный плазмонный резонанс. Плазмонный резонанс проявляется в интенсивном поглощении света металлическими наночастицами в области видимого спектрального диапазона [3, 4], что и обеспечивает суммарный вклад в повышенное поглощение тонкого полупроводникового слоя, содержащего наночастицы [5]. Более того, возникающее вблизи наночастиц вследствие плазмонного резонанса локальное электромагнитное поле способно генерировать появление электронно-дырочных пар в полупроводниках [1].

В настоящее время для формирования композиционных слоёв с наночастицами Ag используются методы вакуумного осаждения, электронной литографии, различные химические подходы и т.д. Особый интерес вызывает технология ионной имплантации, которая активно используется в промышленной Si микроэлектронике. Недавно нами была предложена новая технология формирования тонких слоёв пористого Si с наночастицами Ag (Ag:PSi) при низкоэнергетической высокодозовой (>10^{16} ион/см^2) имплантации c-Si ионами Ag^+ (Ag:Si) [6, 7]. С целью определения оптических характеристик слоёв Ag:Si впервые были проведены и представлены в данном сообщении исследования спектров отражения видимого спектрального диапазона для композитов, полученных в широком интервале ионных доз $5.0 \cdot 10^{14}$–$1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2.

Эксперимент

В настоящем исследовании в качестве подложки были использованы пластины c-Si с полированной поверхностью *p*-типа проводимости с кристаллографической ориентацией (100) толщиной 0.5 мм, не прозрачные в видимом диапазоне спектра. Имплантация c-Si проводилась однозарядными ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ при плотности тока в ионном пучке 8 мкА/см^2 при различных значениях доз $5.0 \cdot 10^{14}$–$1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2 на ионном ускорителе ИЛУ-3 при комнатной температуре.

Спектры оптического отражения были измерены на спектрометре AvaSpec 2048 (Avantes) при нормальном угле падении зондирующего и отражённого светового луча к поверхности образцов через спаренный волновод в спектральном диапазоне от 220 и до 1100 нм при комнатной температуре. Локальная морфология и структура поверхности имплантированного Si были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на СЭМ-микроскопе Merlin (Carl Zeiss), оснащенном детектором дифракции отражённых электронов HKL NordLys (Oxford Instruments).

Результаты и обсуждение

Ранее было показано, что толщина имплантированного слоя в образце Ag:Si, сформированного при облучении 30 кэВ, составляет порядка 40 нм [7]. При этом глубина проникновения света в ближнем ультрафиолетовом диапазоне в Si, как указано в работе [8], составляет величину ~25 нм, что оказывается в пределах толщины имплантированного слоя.

Единственные экспериментальные данные найденные нами в литературе по спектрам отражения Si, имплантированного ионами Ag^+, были получены при относительно низкой энергии 70 кэВ и только для малых дозах $5.0 \cdot 10^{12}$–$5.0 \cdot 10^{14}$ ион/см^2 (<10^{15} ион/см^2). При этом сами измерения ограничиваются узким спектральным интервалом от 210 до 387 нм [5]. Спектры отражения слоёв Ag:Si, сформированных в настоящей работе при более высоких дозах $5.0 \cdot 10^{14}$–$1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2, и для неимплантированной поверхности c-Si приведены на рис. 1.

На коротковолновом участке спектра отражения исходного c-Si (рис. 1, кривая 1) находятся известные

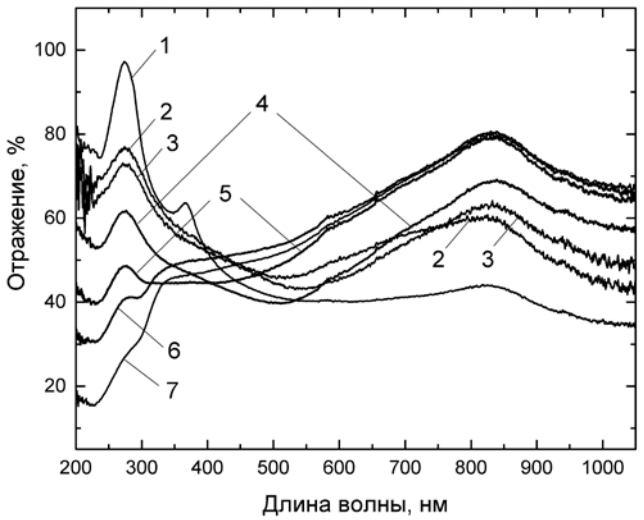


Рис. 1. Спектры отражения поверхности неимплантированного c-Si (1) и слоёв Ag:Si, сформированных имплантацией ионами Ag^+ при различных дозах: $5.0 \cdot 10^{14}$ (2), $5.0 \cdot 10^{15}$ (3), $2.5 \cdot 10^{16}$ (4), $5.0 \cdot 10^{16}$ (5), $6.2 \cdot 10^{16}$ (6) и $1.5 \cdot 10^{17}$ (7) ион/см^2.

полосы с максимумами 268 нм (4.56 эВ) и 366 нм (3.39 эВ), обусловленные межзонными переходами вблизи L и X точек зоны Брюллиена [9]. Кроме того, для c-Si в длинноволновой области спектра наблюдается низкоинтенсивная широкая полоса отражения с максимумом вблизи 850 нм (1.45 эВ). Данная полоса присутствует в спектрах c-Si, приведённых в различных публикациях, например [10, 11], однако, природа этой полосы не объясняется. В некоторых частных сообщениях упоминается, что полоса с максимумом 850 нм может проявляться в случае различных механических обработок поверхности Si, но, в любом случае, данное обстоятельство требует отдельного изучения.

Как следует из рис. 1 для образца Ag:Si, имплантированного при наименьшей дозе $5.0 \cdot 10^{14}$ ион/см^2, наблюдается снижение интенсивности полосы отражения с максимумом 268 нм до 75% и полное пропадание полосы при 366 нм относительно спектра c-Si (рис. 1, кривая 2). Происходящие изменения в оптическом спектре имплантированного c-Si объясняются аморфизацией его поверхностного слоя (a-Si). Качественно-подобные закономерности в изменениях на коротковолновом диапазоне оптических спектров были зарегистрированы ранее после имплантации c-Si тяжелыми ионами (Ag^+, Sb^+, As^+, Xe^+) в интервале энергий облучения от 40 до 100 кэВ для низких доз $<10^{15}$ ион/см^2 [8, 10, 12]. Для данных образцов в работах было сделано заключение, что спектральные изменения вызваны именно аморфизацией Si. При этом они не были обусловлены возможными морфологическими микроразрушениями поверхности Si при его имплантации малыми дозами, которые бы приводили к Релеевскому рассеянию света на микроструктурах и, как следствие,

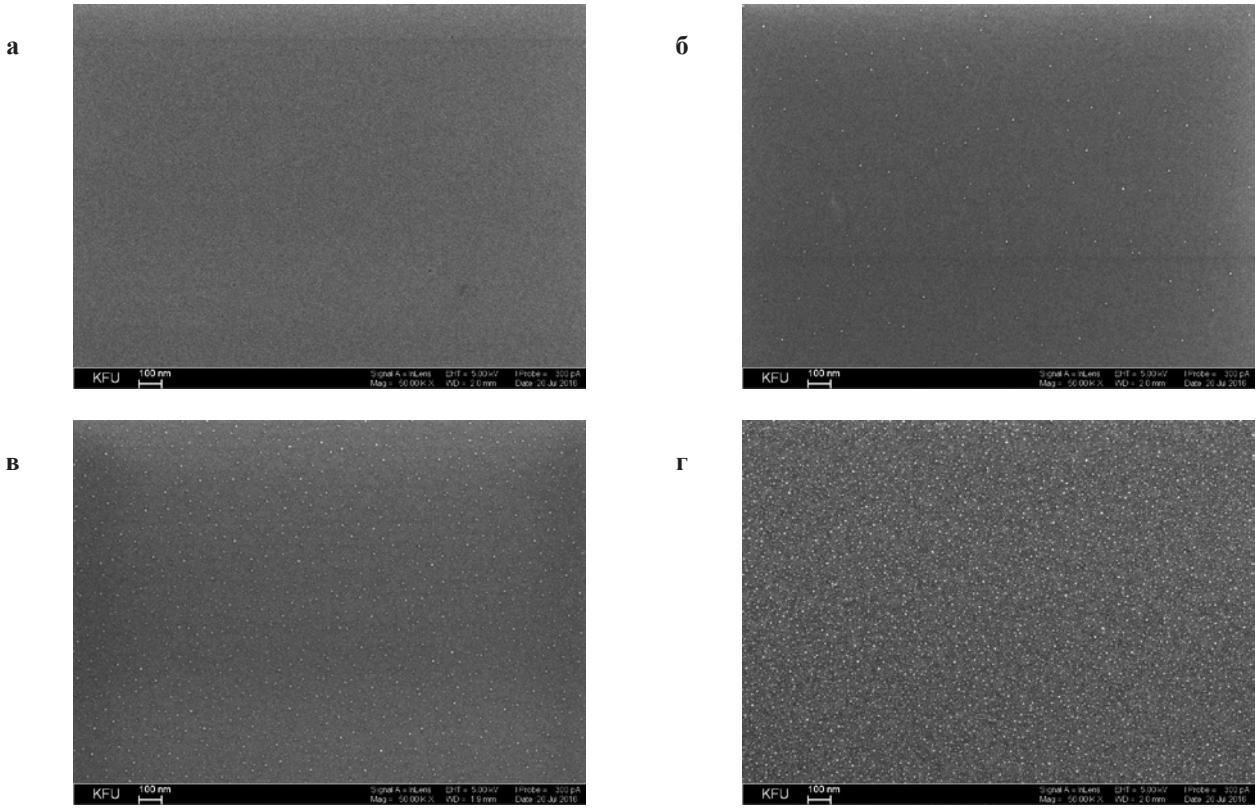


Рис. 2. СЭМ-изображения поверхностей неимплантированного c-Si (**а**) и Ag:Si, сформированных имплантацией ионами Ag^+ при различных дозах: $5.0 \cdot 10^{15}$ (**б**), $2.5 \cdot 10^{16}$ (**в**) и $5.0 \cdot 10^{16}$ (**г**) ион/см^2.

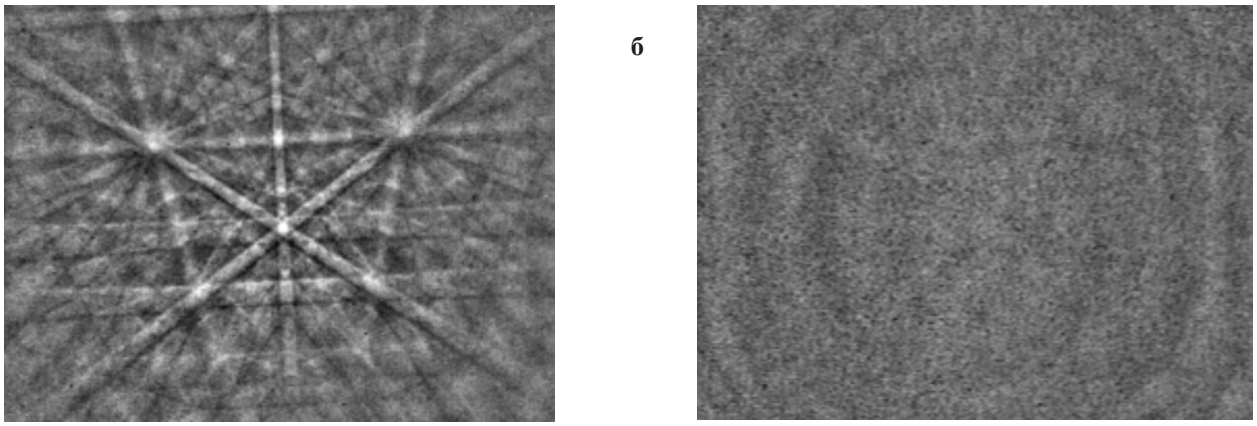


Рис. 3. ДОЭ-картины приповерхностных областей для неимплантированного c-Si (**а**) и Ag:Si, сформированной имплантацией ионами Ag^+ при дозе $5.0 \cdot 10^{14}$ ион/см^2 (**б**).

к снижению оптического отражения в ультрафиолетовой области спектра. Также и в нашем случае, как следует из проведённых СЭМ-наблюдений, морфология поверхности для образца Ag:Si ($5.0 \cdot 10^{14}$ ион/см^2) остается гладкой и неизменной, как у исходной пластины c-Si (рис. 2а). Формирование аморфного слоя подтверждается наблюдениями дифракции отражённых электронов. В результате ионной имплантации кристаллографическая картина из линий Кикучи для исходного c-Si (рис. 3а) трансформируется в изображение, состоящее из аморфных колец a-Si (рис. 3б).

В отличие от ранних измерений спектров отражения имплантированного Si, проводимых в области ультрафиолета [8, 10, 12], в настоящей работе для всех образцов Ag:Si на длинноволновом участке спектра от 500 до 1050 нм (на том же спектральном интервале, где находится собственная слабовыраженная полоса отражения c-Si) зарегистрирована новая широкая полоса, интенсивность которой увеличивается от 60 до 80%, а максимум смещается от 820 до 850 нм с ростом ионной дозы до $5.0 \cdot 10^{16}$ ион/см^2 (рис. 1, кривые 2–5). Зарождение и развитие данной полосы отражения сопровождается появлением на СЭМ-изображениях сопутствующих образцов (рис. 2б, в, г) светлых пятен на фоне однородной серой поверхности Si, которые в работе [7] ранее были интерпретированы как ионно-синтезированные наночастицы Ag. Средний размер наночастиц составляет порядка 5–10 нм, и как видно из рис. 2, с ростом ионной дозы их количество увеличивается. Поэтому длинноволновые полосы отражения с максимумами 820–850 нм в образцах Ag:Si следует соотнести с отражением, обусловленным плазмонным резонансом в наночастицах Ag [3, 4]. Подобное плазмонное отражение ранее наблюдалось в соответствующих спектральных областях видимого диапазона и подробно исследовалось для наночастиц Ag, синтезированных ионной имплантацией в силикатных стеклах и полимерах [4].

Для подтверждения соответствия экспериментально-наблюдаемых длинноволновых полос отражения для образцов Ag:Si с металлическими наночастицами были проведены моделирования спектров экстинкции наночастиц Ag, помещённых в матрицу Si, в рамках электромагнитной теории Ми по методике, приведённой в работе [13]. На рис. 4 приведены полученные спектры экстинкции Ми-резонансов наночастиц Ag различных размеров от 6 до 20 нм. Как следует из расчётов, в спектральной области от 700 до 950 нм присутствуют полосы экстинкции, максимум которых смещается в длинноволновую сторону с увеличением размеров наночастиц Ag. Данные полосы Ми-резонансного поглощения проявляются в том же спектральном видимом диапазоне, как и длинноволновые полосы в спектрах образцов Ag:Si (рис. 1), что позволяет заключить об их качественном согласии. Отметим, что экспериментальные спектры выглядят несколько шире расчётных, поэтому можно предполагать, что экспериментально-регистрируемые спектры отражения состоят из суперпозиции спектров отдельных наборов наночастиц Ag различного размера. Оценки разброса наночастиц по размерам нами не проводились вследствие

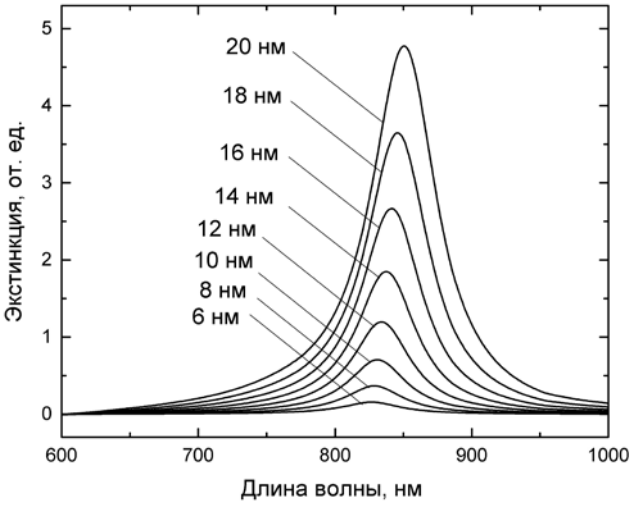


Рис. 4. Расчётные спектры оптической экстинкции наночастиц Ag, находящихся в матрице Si, в зависимости от их размера, указанных для каждого спектра.

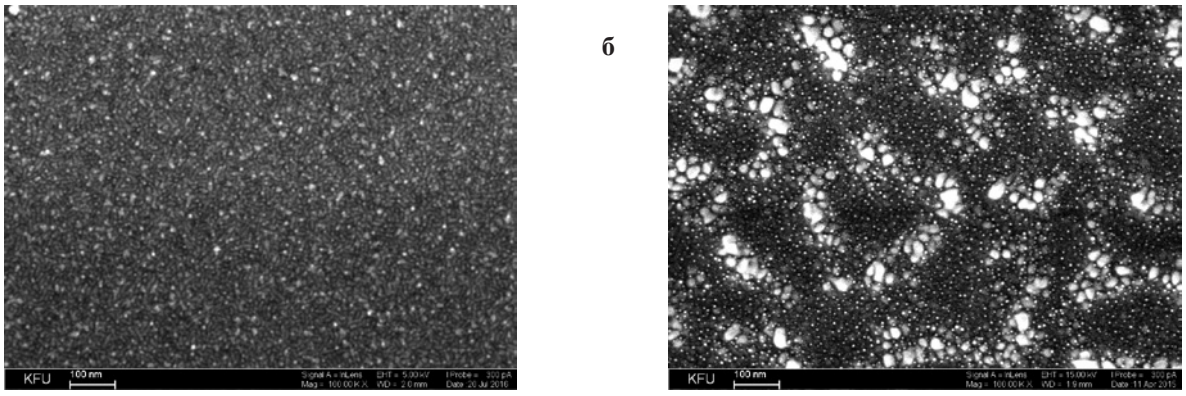


Рис. 5. СЭМ-изображения поверхности Si, имплантированного ионами Ag^+ при дозах: $6.2 \cdot 10^{16}$ (**а**) и $1.5 \cdot 10^{17}$ (**б**) ион/см^2. Изображения приведены в увеличенном масштабе, по сравнению с рис. 2.

их малости (рис. 2). Об увеличении поглощения тонкого слоя Si после его имплантации ионами Ag^- с энергиями 58–78 кэВ и дозами $1.0 \cdot 10^{16}$–$1.75 \cdot 10^{16}$ ион/см^2 сообщается и в работе [14]. Авторы этой работы в дискуссии также связывают данный эффект с образованием в облучаемом слое Si наночастиц Ag размерами до 20 нм, хотя и не обсуждают их плазмонное поглощение.

Другой отличительной особенностью дозовой зависимости оптического отражения образцов Ag:Si в длинноволновой области спектра (рис. 1) является неизменность формы и интенсивности плазмонной полосы отражения наночастиц Ag в интервале доз $5.0 \cdot 10^{16}$–$1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2. Данное обстоятельство, по-видимому, объясняется ранее рассматриваемым эффектом [15], заключающемся в том, что при достижении определённой дозы и при активном распылении поверхности профиль распределения имплантированных ионов по глубине образца не изменяется. Условно говоря, количество имплантированных ионов, в данном случае Ag^+, сопоставимо с долей этих же ионов, распыленных из облучаемого Si. Аналогично этому количество ионно-синтезированных наночастиц, начиная с определённой дозы (~$5.0 \cdot 10^{16}$ ион/см^2) имплантации в слое Ag:Si, также не изменяется. Экспериментально распыление поверхности Si при высокодозовой имплантации ионами Ag^+ было продемонстрировано в работе [7].

В отличие от длинноволновой полосы отражения наночастиц Ag на коротковолновом участке спектра (220–420 нм) образца Ag:Si наблюдается монотонное интегральное снижение интенсивности отражения Si с ростом ионной дозы от $5.0 \cdot 10^{14}$ до $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2. Если, как это здесь уже обсуждалось, данная закономерность для полосы с максимумом 268 нм при малых дозах имплантации объясняется аморфизацией Si, то для интегрального понижения интенсивности отражения следует рассматривать эффект структурирования облучаемой поверхности Si, как это предсказывалось в работах [8, 10]. Действительно, как следует из электронно-микроскопических наблюдений имплантированных образцов (рис. 5а), начиная примерно с дозы облучения $6.2 \cdot 10^{16}$ ион/см^2, на СЭМ-изображениях помимо образования наночастиц Ag отчётливо просматривается разрушение гладкой поверхности Si. Имплантация Si более высокими дозами приводит к формированию на её поверхности пористой структуры (рис. 5б), как результат интенсивного распыления поверхности при облучении ионами серебра [7]. Размерные параметры поверхностных структур сопоставимы с длинами волн света ультрафиолетового диапазона. Поэтому такие структуры приводят к Релеевскому рассеянию света по всем возможным направлениям (не только по зеркальному), что вызывает интегральное снижение интенсивности в коротковолновой области спектра отражения. Известно, что пористые и волокнистые материалы на основе Si с близкими по размеру микроструктурами, как и в настоящей работе, демонстрируют интенсивное диффузное Релеевское рассеяние в данной области спектра [16, 17].

Заключение

Проведено изучение спектров оптического отражения поверхности слоёв Si, имплантированного ионами Ag^+ при низких энергиях в широком интервале доз от $5.0 \cdot 10^{14}$ до $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см^2. Характерными особенностями спектров отражения образцов Ag:Si являются низкий уровень интенсивности в спектральной ультрафиолетовой области ($\lambda < 400$ нм), обусловленный аморфизацией и макроструктурированием поверхности Si, а так же наличие селективной полосы плазмонного резонанса наночастиц Ag с максимумом около 830 нм. Показано, что при имплантации Si ионами Ag^+ высокими дозами наблюдается формирование наночастиц Ag. Экспериментальная демонстрация потенциальной возможности применения ионной имплантации для синтеза наночастиц Ag в тонком слое Si предполагает перспективы применения данной технологии при создании солнечных элементов.

Результаты по микроскопии был получены на оборудовании Междисциплинарного центра “Аналитическая микроскопия” Казанского (Приволжского) федерального университета. Данные исследования проведены при финансировании проектом РФФИ № 16-29-06137_офи_м и программой УМНИК (В. В. Воробьев).

Литература

1. Atwater H., Polman A.: Nature Mat. **9**, 205–213 (2010)
2. Polman A.: Science **352**, 307-1–307-13 (2016)
3. Kreibig U., Volmer M.: Optical properstes of metal clusters. Springer: Berlin 1995. 533 p.
4. Степанов А.Л.: Фотонные среды с наночастицами, синтезированные ионной имплантацией. Саарбрюккен: Lambert Acad. Publ. 2014. 353 с.
5. Rockstuhl C., Fahr S., Lederer F.: J. App. Phys. **104**, 123102-1–123102-7 (2008)
6. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Осин Ю.Н.: Способ изготовления пористого кремния. Патент РФ на изобретение № 2577515. 2015.
7. Stepanov A.L., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Vorobev V.V., Kavetskyy T.S., Osin Y.N.: Rev. Adv. Mater. Sci. **40**, 155–164 (2015)
8. Czarnecka-Such E., Kisiel. A.: Sur. Sci. **193**, 221 (1988)
9. Chelikowsky J.R., Cohen M.L.: Phys. Rev. B **14**, 556–582 (1976)
10. Kurtin S., Shifrin G.A., McGill T.C.: Appl. Phys. Lett. **14**, 223–225 (1969)
11. Магунов А.Н., Лукин О.В.: Микроэлектроника **25**, 97–111 (1996)
12. Borghesi A., Guizzetti G., Nosenzo L., Campisano S.U.: Solid Sate Phenom. **1**, 1–9 (1988)
13. Степанов А.Л.: ЖТФ **74**, 1–9 (2004)
14. Dhoubhadel M.S., Rout B., Lakshantha W.J., Das S.K., D'Souza F., Glass G.A., McDaniel F.D.: AIP Conf. Proc. **1607**, 16–23 (2014)
15. Степанов А.Л., Жихарев В.И., Хайбуллин И.Б.: ФТТ **43**, 733–739 (2001)
16. Kanamori Y., Hane K., Sai H., Yugami H.: Appl. Phys. Lett. **78**, 142–143 (2001)
17. Liu X., Coxon P.R., Peters M., Hoex B., Cole J.M.: D.J. Fray. Energy Environ. Sci. **7**, 3223–3229 (2014)

Способ получения алмазных дифракционных элементов методом ионной имплантации

А. Л. Степанов, М. Ф. Галяутдинов, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, В. В. Воробьев, Ю. Н. Осин, Н. В. Курбатова

Группа нанооптики и наноплазмоники; отдел химической физики, лаборатория квантовой оптики и информатики, лаборатория быстропротекающих молекулярных процессов; отдел радиационных воздействий на материалы, лаборатория радиационной физики

Тематика исследования относится к алмазной интегральной оптике, в частности, к способам изготовления оптических дифракционных элементов (дифракционных решёток). В настоящей работе показан принципиально новый способ формирования дифракционной структуры на поверхности алмаза при его имплантации ионами бора через наложенную маску. Установлено, что в процессе ионного облучения в немаскированных областях имплантируемого алмаза в его приповерхностной области происходит графитизация, приводящая к распуханию поверхностного слоя. Формирование периодических графитизированных микроструктур на поверхности алмаза контролировалось методами оптической, конфокальной, электронной и атомно-силовой микроскопии. Рамановская спектроскопия была использована для идентификации графита. Эффективность функционирования алмазного оптического дифракционного элемента продемонстрирована при его зондировании излучением гелий-неонового лазера на длине волны 632.8 нм.

Введение

Интегральная оптика относится к направлению прикладных исследований, связанному со взаимодействием электромагнитного излучения с веществом [1]. Решение задач современной интегральной оптики требует использования новых специальных материалов, а также разработки особых технологий изготовления рабочих компонентов и устройств на их основе. Как правило, при этом имеют дело с электромагнитными волнами в диапазоне от ультрафиолетового (~0.2 мкм) до длинноволнового инфракрасного излучения (~10 мкм). Таким образом, к собственно интегральной оптике относятся вопросы распространения света по плёночным световодам, ввода и вывода излучения, генерирования света в субминиатюрных интегральнооптических элементах, преобразования излучения нелинейно-оптическими элементами. К ним относятся интерференционные и дифракционные эффекты, возникающие при функционировании детекторов, модуляторов, умножителей, смесителей и т.п.

В девяностые годы в России по инициативе лауреата Нобелевской премии Александра Михайловича Прохорова на основе интегральной оптики сформировалась самостоятельная область прикладных исследований – алмазная оптика [2]. Использование в качестве оптических материалов именно алмаза обусловлено его уникальной радиационной (лучевой) стойкостью и высокой теплопроводностью. Алмазные оптические элементы, обладая широким окном прозрачности от 0.2 до более 20 мкм, могут работать при резких перепадах температуры и в агрессивных химических средах. В настоящее время на практике алмазы используются для изготовления различных дифракционных оптических элементов (ДОЭ): решёток, киноформов, фокусаторов, корректоров и др. [2, 3]. Алмазные ДОЭ могут применяться для преобразования излучения высокомощного CO_2-лазера с плотностью мощности до 20 кВт/см^2 [4, 5], для создания фотонно-кристаллических резонаторов с целью реализации квантовых механизмов хранения и накопления информации [6], а также в рентгеновской оптике для управления потоками излучения, например, при использовании алмазных Брэгговских зеркал (отражающих дифракционных решёток) с коэффициентом отражения ~100% [7] и т.д.

Для получения периодических ДОЭ на алмазных подложках используются различные технологические способы, такие, как воздействие мощными импульсами эксимерного лазера [8], травление в газовом потоке транспортного газа [9] и др. В настоящей работе представлен новый подход, разработанный и апробированный авторами сообщения. Конкретная задача заключалась в изучении потенциальной возможности получения ДОЭ на алмазной подложке методом имплантации иона бора через поверхностную металлическую маску. Ранее данная технология была нами успешно использована для получения ДОЭ на диэлектрических, полимерных пористых полупроводниковых подложках при их имплантации ионами благородных металлов [10–12]. Выбор иона бора обусловлен тем обстоятельством, что он наиболее часто в микроэлектронной промышленности при легировании алмаза [13].

Эксперимент

Для формирования ДОЭ полированная поверхность искусственного оптически прозрачного бесцветного алмаза имплантировалась ионами бора с энергией E = 40 кэВ, дозой облучения $D = 1.3 \cdot 10^{18}$ ион/см^2 при плотности тока в ионном пучке J = 15 мкА/см^2 на ускорителе ИЛУ-3 через поверхностную маску – никелевую сетку с размером квадратных ячеек 40 мкм. Локальная морфология

и структура поверхности имплантированного алмаза были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на СЭМ-микроскопе Merlin (Carl Zeiss), оснащенном детектором дифракции отражённых электронов HKL NordLys (Oxford Instruments), а также атомно-силовой микроскопии (АСМ) в полуконтактной моде с помощью АСМ-микроскопа FastScan (Brucker). Детальные подробности методики измерения дифракции отражённых электронов приведены в работе [14].

Оптическая характеризация ДОЭ проводилась на оптическом поляризационном микроскопе Полар-1 (Микромед) в режиме отражения и на конфокальном микроскопе LSM 780 (Carl Zeiss), а также при измерении спектров рамановского рассеяния по методике, описанной в работе [15]. Анализ оптических дифракционных картин от ДОЭ осуществлялся при их зондировании гелий-неоновым лазером на длине волны 632.8 нм.

Моделирование концентрационных профилей распределения имплантированного бора с энергией 40 кэВ в алмазе по глубине с помощью алгоритма SRIM-2013 показало, что атомы бора накапливаются в приповерхностном слое алмаза толщиной ~100 нм, не проникая в его объём на большую глубину.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены изображения решётки, сформированной на поверхности алмаза имплантацией ионами бора через поверхностную маску, наблюдаемые на оптическом (рис. 1а) и под углом 70° на СЭМ (рис. 1б) микроскопах. Как видно из приведённых изображений, периодическая микроструктура состоит из чередующихся тёмных квадратных ячеек, относящихся к имплантированным участкам поверхности образца, разделённых стенками (светлые области) неимплантированного алмаза. Размер имплантированных участков 40×40 мкм соответствует размеру ячеек используемой маски.

Структурная характеризация исходного и имплантированных участков алмаза проводилась по наблюдению

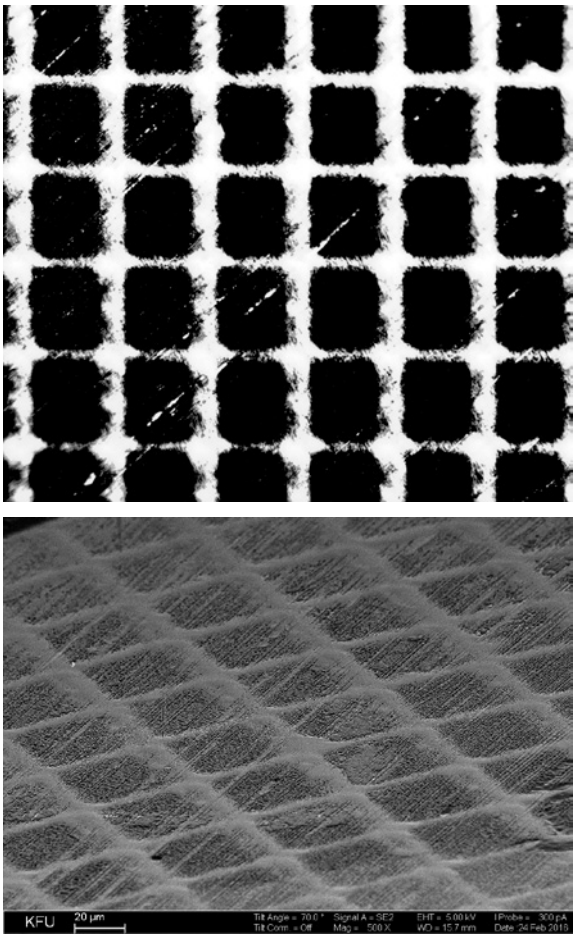


Рис. 1. Изображения алмаза, имплантированного через маску ионами бора, наблюдаемые на оптическом (**а**) и электронном (**б**) микроскопах.

картин дифракции отражённых электронов при зондировании приповерхностной области образца (рис. 2). В отличие от дифракции Кикучи в виде полос, параллельных плоскостям кристаллической решётки исходного алмаза (рис. 2а), для областей, облучённых ионами бора, в картине дифракции наблюдаются только широкие диффузные кольца (рис. 2б), указывающие на разрушение кристаллической

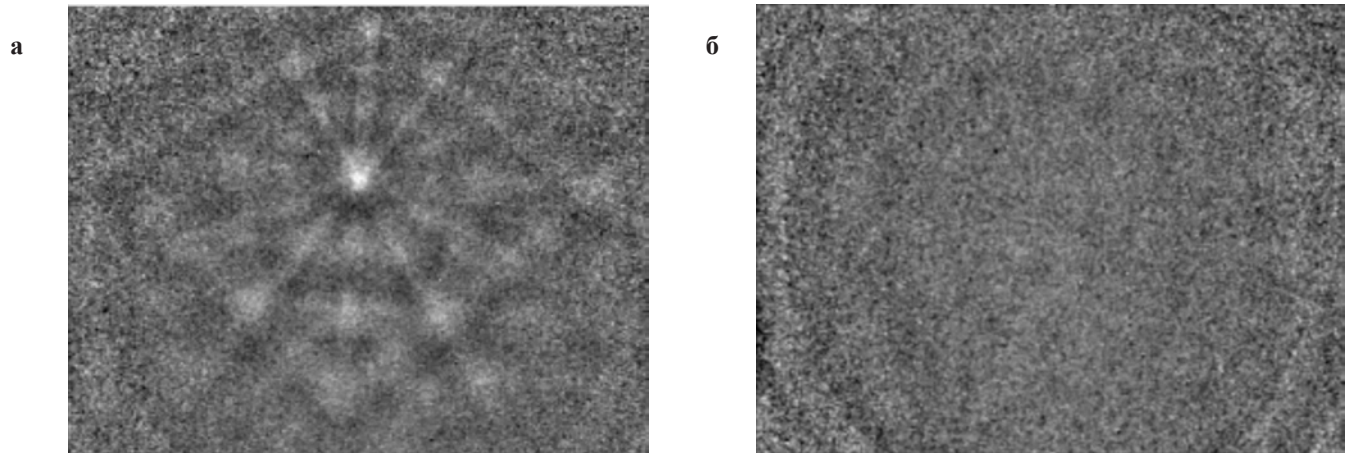


Рис. 2. Изображения картин дифракции отражённых электронов от исходного (**а**) и имплантированного ионами бора (**б**) алмаза.

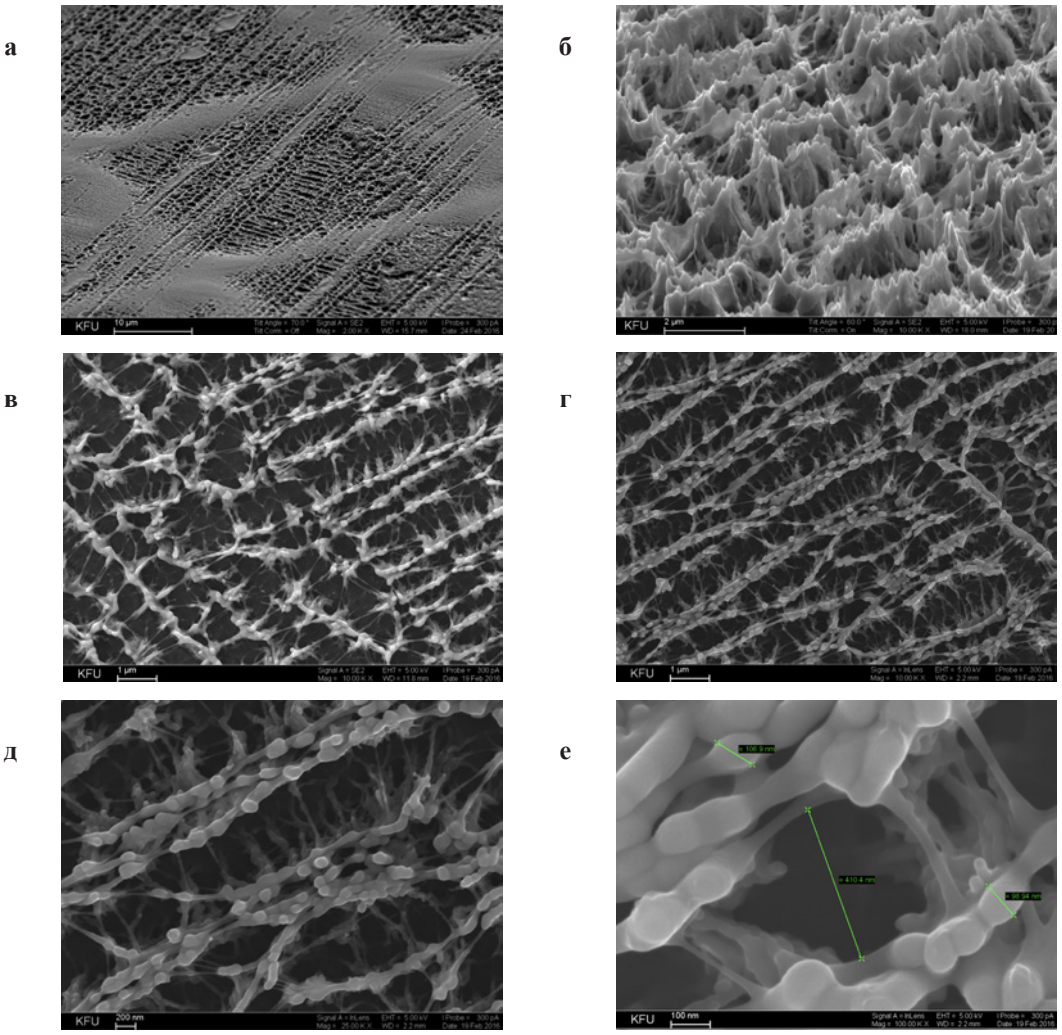


Рис. 3. СЭМ-изображения поверхности алмаза, имплантированного ионами бора. Микрофотографии **а**–**е** приведены в различных масштабах, который указан на изображениях.

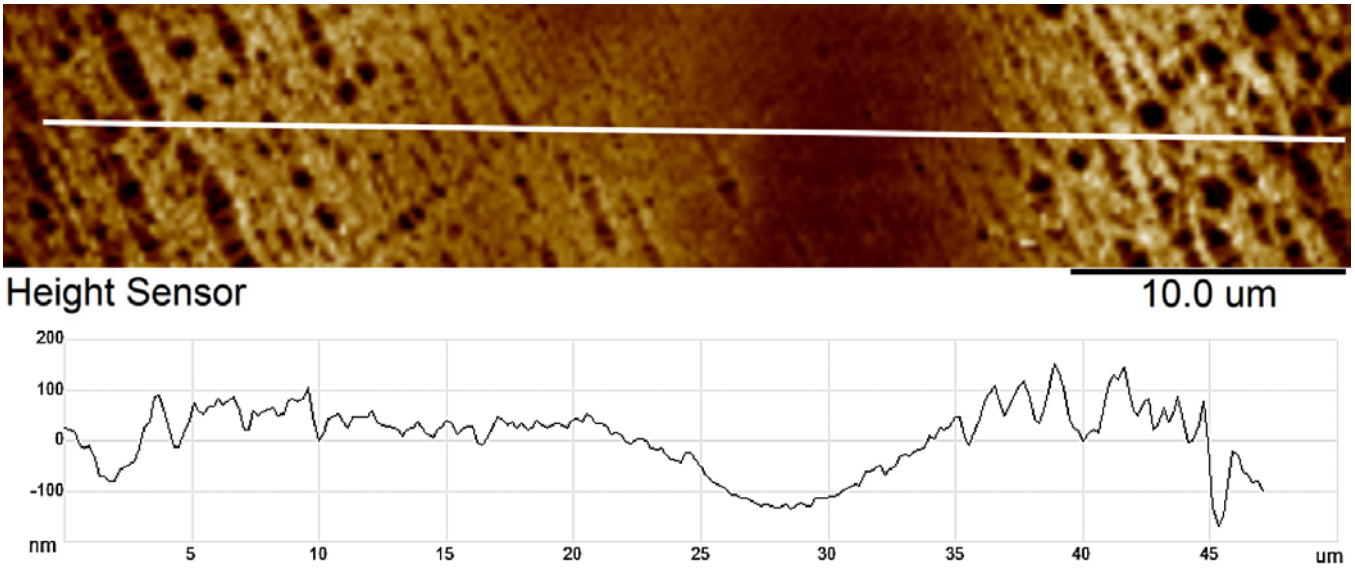


Рис. 4. АСМ-изображение поверхности фрагмента алмазной дифракционной решётки, в областях необлучённой перегородки алмаза (тёмная часть рисунка) и имплантированных ячеек (светлые части рисунка). Светлой линией указано направление измерения поперечного сечения.

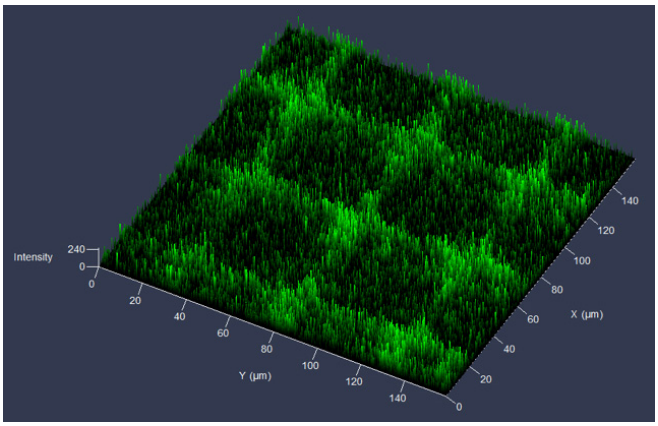


Рис. 5. 3D-изображение фрагмента алмазной решётки, наблюдаемое на оптическом конфокальном микроскопе.

решётки в приповерхностном слое имплантированного алмаза и вероятное формирование аморфных углеродных (графитизированных) участков [16].

СЭМ-изображения в различных масштабах поверхности отдельной ячейки решётки в области алмаза, имплантированного ионами бора, показаны на рис. 3. Из приведённых микрофотографий видно, как гладкая поверхность неимплантированного алмаза, наблюдаемая на элементах поверхности между ячейками решётки, после облучения её ионами бора трансформируется в сильнопористую паутиноподобную сетчатую наноструктуру с размером пор порядка 400 нм, разделённых стенками толщиной около 100 нм (рис. 3е).

На рис. 4а приведено АСМ-изображение фрагмента алмазного ДОЭ вблизи стенки (тёмная область) между имплантированными ячейками (светлые шероховатые области). На рис. 4б, показан профиль поперечного сечения, измеренный по направлению, указанному на рис. 4а. Из рис. 4 следует, что имплантированные ионами бора участки поверхности алмаза (ячейки) возвышаются над

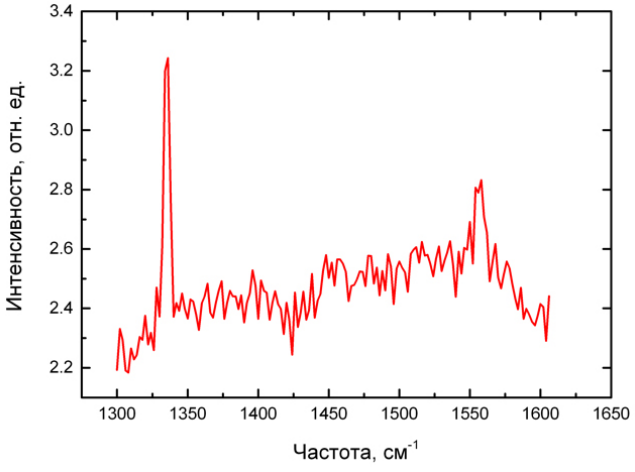


Рис. 6. Рамановский спектр алмаза, имплантированного ионами бора, измеренный в условиях комнатной температуры при возбуждении лазерным излучением на длине волны 514 нм.

поверхностью алмаза на величину ~100 нм. Такой эффект можно объяснить распуханием облучённых участков алмаза в результате графитизации, характеризуемых меньшей плотностью ($\rho_{графит}$ = 2.09–2.23 г/см^3) по сравнению с алмазом ($\rho_{алмаз}$ = 3.47–3.55 г/см^3) [16].

Формирование решётки на поверхности алмаза при его имплантации ионами бора через поверхностную маску подтверждается при наблюдении образца на оптическом конфокальном микроскопе. В качестве зондирующего сигнала использовалось излучение полупроводникового лазера на длине волны 488 нм, а регистрация оптического изображения образца осуществлялась в спектральной области 508–526 нм через отсекающие фильтры. Воздействие изучения на длине волны 488 нм приводит к возбуждению люминесценции алмаза в видимом зелёном диапазоне спектра [17]. На рис. 5 показано оптическое 3D-изображение, полученное в результате люминесценции алмаза на участках поверхности, закрытых во время имплантации маской. Области алмаза, подвергнутые имплантации (квадратные ячейки), практически не люминесцируют и поэтому выглядят на фигуре тёмными.

Измерение рамановских спектров при возбуждении аргоновым лазером на длине волны 514 нм также подтверждает разрушение алмаза (рис. 6), поскольку в спектре наряду с хорошо известной для алмаза интенсивной линией 1336 см$^{-1}$ [18], после имплантации появляются более слабые линии в области 1560 см$^{-1}$, указывающие на его графитизацию [16]. В результате имплантации алмаза ионами бора и разрушения его решётки следовало бы ожидать образование карбида бора при связывании атомов углерода и бора. Однако, соответствующих кристаллитам карбида бора характерных линий в рамановском спектре в определённой области от 200 и до 1200 см$^{-1}$ [19], обнаружено не было. Тем не менее, как следует из работы [20], отдельные химические связи или малые фрагменты, состоящие из атомов бора и углерода, напрямую не распознаваемые рамановской спектроскопией, могут присутствовать в графитизированных областях имплантированного ионами бора алмаза.

Имплантация алмаза ионами бора ведёт как к изменению химического состава (накопление бора в образце), так и к модификации его фазовой углеродной структуры, т.е. образованию графитизированного материла. В результате имплантации алмаза через поверхностную маску формируется микроструктура с периодически изменяемым распределением оптических констант материала, т.е. между стенками решётки из алмаза с показателем преломления $n_{алмаз}$ = 2.42 и графитизированными ячейками ($n_{графит}$ = 2.1–2.23). Поэтому сформированная на алмазе периодическая микроструктура с графитизированными областями может быть использована на практике в качестве двумерного фотонного кристалла [6] или ДОЭ [2].

В качестве иллюстрации на рис. 7 приведено дифракционное изображение, регистрируемое при зондировании алмазной решётки гелий-неоновым лазером на длине волны 632.8 нм в геометрии “на отражение”. Очевидно, что, манипулируя режимами ионной имплантации, можно

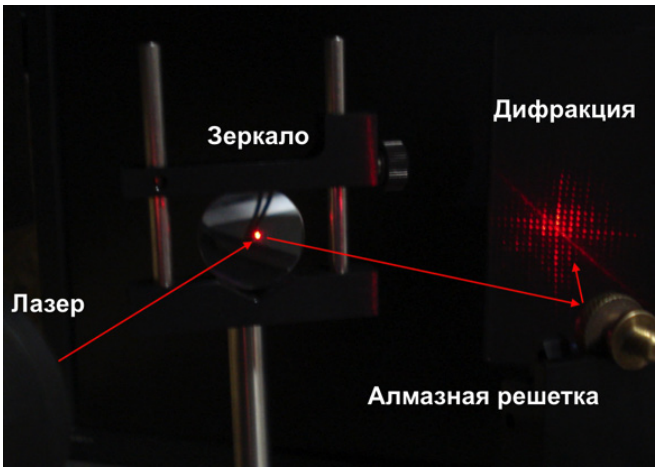


Рис. 7. Изображение картины дифракционного рассеяния на экране, полученное от алмазной решётки при зондировании гелий-неоновым лазером в геометрии "на отражение". Образец с алмазной решёткой закреплён на металлическом держателе.

менять тем самым эффективный показатель преломления отдельных областей в ДОЭ, т.е. управлять его оптическими и дифракционными характеристиками.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе рассмотрен процесс низкоэнергетической высокодозовой имплантации алмаза ионами бора через поверхностную маску и создана новая методика получения ДОЭ. В результате на поверхности алмаза получена дифракционная микроструктура, фазовый контраст в которой обеспечивается графитизированными областями алмаза. Основным практическим применением предлагаемой методики формирования ДОЭ является развитие перспективной технологии и создание новых эффективных элементов алмазной оптики.

Отдельные результаты работы докладывались на пленарном выступлении А. Л. Степанова на IX Международной конференции "Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах" ФНСКС-2016 в г. Минске (Беларусь), защищены патентом РФ [21] и опубликованы в сборнике научных статей [22]. Дополнительно материалы работы были представлены на Республиканской конференции, проводимой АН РТ в 2016 г. "Развитие научных исследований в рамках взаимодействия Российского фонда фундаментальных исследований и Академии наук Республики Татарстан, посвящённой 25-летию образования Академии наук Республики Татарстан".

Основные результаты по микроскопии был получены на оборудовании Междисциплинарного центра "Аналитическая микроскопия" Казанского (Приволжского) федерального университета. Данные исследования проведены при финансировании проектом РФФИ № 15-48-02525_поволжье и программой УМНИК (В. В. Воробьев).

Литература

1. Введение в интегральную оптику. (под редакцией Барноски М., Шмаонова Т.А.) М.: Мир 1977. 367 с.
2. Сойфер В.А.: Метод компьютерной оптики. М.: Физматлит 2003. 688 с.
3. Раткин Л.: Фотоника **4**, 18–23 (2011)
4. Коненко В.В., Конов В.И., Пименов С.М., Прохоров А.М., Павельев В.С., Сойфер В.А.: Квантовая электроника **26**, 9–10 (1999)
5. Karlsson M., Nikolajeff F.: Opt. Express **11**, 502–507 (2003)
6. Тукмаков К.Н., Володин Б.О., Павельев В.С., Комленок М.С., Хомич А.А.: Вестник Самарского аэрокосмического госуниверситета **7**, 112–116 (2012)
7. Shvydko Y., Stopin S., Blank V., Terentev S.: Nature Photonincs **5**, 539–542 (2011)
8. Веревкин Ю.К., Бронникова Н.Г., Королихин В.В., Гущина Ю.Ю., Петряков В.Н., Филатов Д.О., Битюрин Н.М., Круглов А.В., Левичев В.В.: ЖТФ **73**, 99–102 (2003)
9. Волков А.В., Казанский Н.Л., Моисеев О.Ю. Сойфер В.А.: Способ изготовления дифракционных оптических элементов на алмазных и алмазноподобных подложках: Патент РФ № 2197006, 2003.
10. Stepanov A.L., Galyautdinov M.F., Evlyukhin A.B., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Osin Y.N., Evlyukhin E.A., Kiyan R., Kavetskyy T.S., Chichkov B.N.: Appl. Phys. A **111**, 261–264 (2013)
11. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Галяутдинов М.Ф., Осин Ю.Н.: Дифракционная решётка: Патент РФ на изобретение № 2541495, 2015.
12. Степанов А.Л.: Фотонные среды с наночастицами, синтезированными ионной имплантацией. Саарбрюккен: Lambert Acad. Publ. 2014. 353 с.
13. Van Beveren L.H.W., Liu R., Bowers H., Ganesan K., Johnson B.C., McCallum J.C.: J. Appl. Phys. **119**, 223902-1–223902-9 (2016)
14. Курбатова Н.В., Галяутдинов М.Ф., Иванов Н.А., Колесников С.С., Паперный В.Л., Осин Ю.Н., Степанов А.Л.: ФТТ **55**, 1784–1787 (2013)
15. Воробьев В.В., Осин Ю.Н., Ермаков М.А., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Степанов А.Л.: Нанотехнологии: наука и производство **1**, 42–52 (2015)
16. Хмельницкий Р.А.: Радиационное повреждение и графитизация алмаза при ионной имплантации. Диссертация. Москва 2008, 97 с.
17. Collins A.T.: Diamond and related materials **1**, 457–469 (1992)
18. Deslandes A., Guenette M.C., Belay K., Elliman R.G., Karatchevtseva I., Thomsen L., Riley D.P., Lumpkin G.R.: Nucl. Instr. Metn. Phys. Res. B **365**, 331–335 (2015)
19. Hushur A., Manghnani M., Werheit H., Dera P., Williams Q.: J. Phys.: Condens. Matter **28**, 045403-1–045403-5 (2016)
20. Domnich V., Reynaud S., Haber R.A., Chhowalla M.: J. Am. Ceram. Soc. **94**, 3605–3628 (2011)
21. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Галяутдинов М.Ф., Курбатова Н.В., Воробьев В.В., Осин Ю.Н.: Алмазная дифракционная решётка: Патент РФ № 166144, 2016.
22. Наноструктуры в конденсированных средах. Сб. Науч. статей. Минск: ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси 2016. 524 с.

АСПИРАНТЫ И МОЛОДЫЕ УЧЁНЫЕ

Аспирантура

В 2016 году аспирантуру закончили 3 человека:

1. Гоенко Илья Александрович
2. Камашев Андрей Андреевич
3. Ханипов Тимур Фаритович

В 2016 году в аспирантуру поступили 4 человека:

1. Гарипов Ранис Рамисович
   01.04.11 “Физика магнитных явлений”,
   руководитель д.ф.-м.н. Сулейманов Н.М.
2. Фатыхов Ранис Радикович
   01.04.11 “Физика магнитных явлений”,
   руководитель д.ф.-м.н. Сулейманов Н.М.
3. Павлов Дмитрий Павлович
   01.04.11 “Физика магнитных явлений”,
   руководитель д.ф.-м.н. Мамин Р.Ф.
4. Акатьев Дмитрий Олегович
   01.04.05 “Оптика”,
   руководитель д.ф.-м.н. Калачёв А.А.

На 31.12.2016 число аспирантов института с очной формой обучения составило 11 человек (аспирантов заочного обучения нет).

Премии и награждения

– Лядов Н.М., н.с., стал лауреатом стипендии КФТИ им. Б. М. Козырева среди молодых учёных 2016 года.
– Салихов Т.М., аспирант/м.н.с., стал лауреатом стипендии КФТИ им. Н. С. Гарифьянова среди аспирантов 2016 года.
– Суханов А.А., с.н.с., стал лауреатом премии и награждён дипломом за 1-е место в городском конкурсе среди молодых учёных и специалистов на соискание казанской премии им. Е. К. Завойского в области физики.

Победители конкурса научных проектов, выполняемых молодыми учёными (“Мой первый грант”), проводимого РФФИ

1. Шмелёв А.Г., к.ф.-м.н.: Создание и исследование новых композитных материалов на основе нанокристаллитов халькогенидов кадмия для оптоэлектроники и фотоники (16-32-00397)
2. Леонтьев А.В.: Исследование динамики возбуждённых состояний ионов Ce^{3+} в кристаллах $LiY_xLu_{(1-x)}F_4$ (x = 0.1) для создания твёрдотельного генератора ультракоротких импульсов УФ диапазона спектра (16-32-00406)
3. Гаврилова Т.П., к.ф.-м.н.: Создание и исследование наногранулированных композитных материалов на основе $CaCu_3Ti_4O_{12}$ и гексаферрита стронция или лантан-стронциевых манганитов с необычными магнитоэлектрическими свойствами (16-32-00660)

Победители инновационной образовательной программы “Участник молодёжного научно-инновационного конкурса” (“У.М.Н.И.К.”)

– Акатьев Д.О., аспирант/м.н.с.: Разработка метода высокоскоростной стабилизации спектральных характеристик однофотонного источника, основанного на спонтанных параметрических процессах
– Турайханов Д.А., аспирант/м.н.с.: Разработка способа генерации однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом

Победители конкурса для молодых учёных и аспирантов “Гранты КФТИ”

– Салихов Т.М., аспирант/м.н.с.: “Влияние дефектов на основное состояние магнетиков”
– Камашев А.А., м.н.с.: “Эффект близости в системе сверхпроводник/полуметалл”
– Ханипов Т.Ф., м.н.с.: “Изучение магнитоупругих эффектов в микрочастицах пермаллоя, расположенных на поверхности полимера (PVDF) с высоким коэффициентом термического сжатия”
– Алексеев А.В., м.н.с.: “Механизм возникновения наведённой магнитной анизотропии в ионно-синтезированных плёнках силицида железа Fe_3Si”

80-летие К. М. Салихова

Кев Минуллинович Салихов. К 80-летию со дня рождения*



Кев Минуллинович Салихов

3 ноября 2016 г. исполняется 80 лет выдающемуся учёному и научному руководителю Казанского физико-технического института Казанского научного центра Российской академии наук (КазНЦ РАН) академику Кеву Минуллиновичу Салихову.

К. М. Салихов является одним из лидеров теоретической химической физики. Он внёс основополагающий вклад в становление и развитие новой области науки – спиновой химии, в создание теоретических основ магнитных эффектов в химических реакциях и эффектов гиперполяризации электронных и ядерных спинов в ходе спин-зависимых процессов. Его результаты в теории спиновой химии были удостоены в коллективе авторов Ленинской премии (1986).

Кев Минуллинович (К.М.) заложил теоретические основы современных импульсных методов спектроскопии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Им получены фундаментальные результаты по теории релаксации спиновой когерентности (фазовой релаксации) в парамагнетиках, вызванной диполь-дипольным взаимодействием между парамагнитными центрами, а также по теории модуляции сигналов спинового эха, обусловленных сверхтонким взаимодействием электронов с магнитными ядрами и спин-спиновым взаимодействием между парамагнитными центрами в спиновых кластерах (парах, тройках и т.д.). Работы К.М. в теории спинового эха создали теоретическую базу для изучения пространственного распределения парамагнитных центров, которые образуются при облучении веществ, а также для развития нанометрологии, основанной на измерении величины диполь-дипольного взаимодействия между парамагнитными центрами (спиновыми метками). В настоящее время в молекулярной биологии импульсные методы ЭПР широко применяются для исследования структуры и молекулярной подвижности путём адресного присоединения спиновых меток к изучаемым молекулам и анализа сигналов электронного спинового эха.

К.М. внёс выдающийся вклад в теорию переноса электронной спиновой когерентности и релаксации спиновой когерентности, вызванной обменным взаимодействием в ходе бимолекулярных столкновений парамагнитных частиц (спиновых зондов). Им предложены кинетические уравнения для спиновой матрицы парамагнитных частиц с учётом бимолекулярных столкновений. Кинетические уравнения получены как для нейтральных частиц, так и заряженных частиц. В случае заряженных частиц рассмотрены растворы электролитов. Кинетические уравнения получены для произвольной кинематики прохождения сталкивающимися частицами области их эффективного обменного взаимодействия. С помощью этих уравнений рассчитаны скорости бимолекулярного спинового обмена при столкновениях свободных радикалов, парамагнитных комплексов ионов переходных элементов, триплетных экситонов, атомов позитрония. Спиновый обмен нередко служит модельным процессом для определения частоты двойных столкновений молекул в растворах. Поэтому развитая К.М. детальная теория спинового обмена оказалась весьма востребованной, особенно в молекулярной биофизике и биохимии, например,

* Статья опубликована в журнале “УФН”, т. 186, № 12 и приводится с любезного разрешения редакции.

для изучения доступности активных участков фермента низкомолекулярными субстратами.

Ярким направлением в научной деятельности К. М. Салихова является исследование с помощью ЭПР спин-коррелированных систем типа пар Эйнштейна-Подольского-Розена-Бома (ЭПРБ). Примером могут служить электрон-дырочные пары (ион-радикальные пары), которые образуются на первичной стадии ассимиляции солнечной энергии в реакционных центрах фотосинтетических систем. Эти пары разделенных зарядов рождаются в синглетном спиновом состоянии. К.М. теоретически предсказал, что во времяразрешённых экспериментах интенсивности линий ЭПР должны осциллировать и что сигналы спинового эха должны иметь аномальную фазу. Эти замечательные особенности спектров ЭПР обязаны спиновой когерентности начального состояния разделенных зарядов и последующей спиновой динамике. К.М. обнаружил ещё одно удивительное проявление спиновой когерентности ЭПРБ пар в эксперименте. В спин-коррелированных парах при косвенном наблюдении эффекта ЭПР, например, при оптическом детектировании ЭПР, могут регистрироваться чрезвычайно узкие линии двухквантовых переходов даже в отсутствие взаимодействия между спинами пары. Работы К.М. продемонстрировали значительный потенциал ЭПР в исследовании когерентных состояний спиновых систем. Эти результаты имеют большое значение для реализации квантовых вычислений с использованием неспаренных электронов парамагнитных центров в качестве кубитов.

В настоящее время научные интересы К.М. Салихова сконцентрированы на развитии новых методов исследования и их приложениях к системам, перспективным для квантовой информатики, спинтроники, оптоэлектроники. Особенно большое внимание он уделяет развитию квантовых вычислений с использованием спинов электронов в качестве кубитов. К.М. Салихов предложил протокол квантовой телепортации в системе электронных спинов. Главной особенностью этого протокола является использование спин-зависимых элементарных химических актов в качестве логических элементов в реализации алгоритма квантового вычисления. Под его руководством реализуется программа работ по практической реализации квантовых алгоритмов с помощью спинов. Впервые предложен протокол для реализации квантовой операции контролируемый-НЕ (CNOT) при использовании электронных спинов в качестве кубитов. Теоретически и экспериментально показано, что в экспериментах ЭПР с применением многоимпульсных последовательностей проявляется известный в квантовой информатике эффект (парадокс) Зенона.

Пионерские работы К. М. Салихова принесли ему широкое признание. Ему присуждена Государственная премия Республики Татарстан в области науки и техники, ряд международных премий, он награждён орденами “За заслуги перед Отечеством” IV степени, “Знак Почёта”, “За заслуги перед Республикой Татарстан”, он избран почётным гражданином г. Казани, почётным членом международного общества ЭПР (International EPR/ESR Society, 2014) и международного общества магнитного резонанса (ISMAR, 2015).

Полёт творческой мысли юбиляра, его потрясающая креативность, неиссякаемый оптимизм и заразительный энтузиазм вызывают искреннее восхищение и вдохновляют всех, кому посчастливилось знать и сотрудничать с ним. Его творческая молодость – залог новых открытий и свершений.

Друзья, коллеги и ученики от всего сердца поздравляют Кева Минуллиновича и желают ему крепкого здоровья, счастья и новых достижений.

А. Ф. Андреев, С. Н. Багаев, В. К. Воронкова, А. А. Калачёв, Ю. Н. Молин, Л. В. Мосина, И. В. Овчинников, Р. З. Сагдеев, В. Ф. Тарасов, В. В. Устинов, Ю. Д. Цветков, И. А. Щербаков

Репортаж с торжественного заседания, посвящённого 80-летию К. М. Салихова

3 ноября в Национальном культурном центре “Казань” состоялось торжественное заседание, посвящённое 80-летию Кева Минуллиновича Салихова.

В зале присутствовали представители руководства Республики Татарстан во главе с премьер-министром РТ Ильдаром Шафкатовичем Халиковым, сотрудники института и Академии наук РТ, гости из различных университетов, вузов, научно-исследовательских институтов и организаций Казани, Калининграда, Красноярска, Москвы, Н. Новгорода, Новосибирска, Санкт-Петербурга, а так же Австрии, Англии, Бельгии, Германии, Израиля, Новой Зеландии, США, Турции, Франции и Японии.

Ведущими торжественного собрания по просьбе юбиляра были сотрудники КФТИ Ляйля Васильевна Мосина и Валерий Фёдорович Тарасов. Прозвучали произведения классической музыки в исполнении струнного квартета под управлением народной артистки РТ Ларисы Владимировны Масловой, и ведущие предоставили



Торжественное заседание в Национальном культурном центре “Казань”.

слово юбиляру, Кеву Миннулиновичу Салихову (текст с небольшим сокращением приведён ниже). Слова благодарности, которые Кев Миннуллинович произнёс в своём выступлении учителям, родителям, семье, руководству РТ, коллегам, друзьям, чередовались с видеозаписями присланных поздравлений. Поздравления были эмоциональными, песня в исполнении академика Ренада Зиннуровича Сагдеева подчеркнула праздничную атмосферу вечера. В завершении выступления, юбиляр предоставил слово своей внучке, которая поздравила его от имени семьи.

С поздравлением от имени Президента и правительства Республики Татарстан выступил премьер-министр Ильдар Шафкатович Халиков и вручил Кеву Минуллиновичу награду РТ – медаль “За доблестный труд”.





Юбиляра поздравляют заместитель председателя Государственного Совета РТ Римма Атласовна Ратникова и академик, директор ФТИ им. А. Ф. Иоффе Андрей Георгиевич Забродский.



К. М. Салихова поздравляет Академия наук РТ.

Член Бюро Отделения физических наук Российской академии наук, акад., директор ФТИ им. А. Ф. Иоффе Забродский Андрей Георгиевич поздравил юбиляра от имени Российской академии наук. Очень тёплые пожелания и поздравления прозвучали в выступлении заместителя председателя Государственного Совета РТ Риммы Атласовны Ратниковой.

Затем для поздравления на сцену поднялись представители Академии наук Республики Татарстан – Президент АН РТ, акад. АН РТ Мякзюм Халимуллович



К. М. Салихов принимает поздравления от родного физтеха.

Салахов, Советник Президиума АН РТ акад. АН РТ Ахмет Мазгарович Мазгаров и канд. исторических наук, представитель Института энциклопедии и регионоведения АН РТ Гумер Салихович Сабирзянов.

От Сибирского отделения Российской академии наук поздравления передал член-корр. РАН Анатолий Васильевич Двуреченский, от имени Казанского федерального университета выступил директор института физики, проф. Сергей Иванович Никитин.

От имени Международного общества ЭПР выступил президент общества, проф. Хитоши Ота (Япония), от Международного комитета AMPERE – президент комитета в 2002–2006 гг., проф. Ханс Вольфганг Шписс (Германия), от Тихоокеанского общества ЭПР (APES) и Российского общества ЭПР – действующий президент этих организаций, проф. Елена Григорьевна Багрянская (Россия). И в заключение торжественного заседания на сцену поднялись представители Казанского физико-технического института, чтобы выразить свои признательность и благодарность Кеву Минуллиновичу Салихову, который 28 лет руководил институтом. Текст поздравления зачитал врио директора КФТИ, проф. РАН Алексей Алексеевич Калачёв (текст приводится ниже). Праздник продолжался в менее формальной обстановке на фуршете, где всем желающим была предоставлена возможность высказать свои чувства и эмоции.

Специальный выпуск журнала “Zeitschrift für Physikalische Chemie”, посвящённый 80-летнему юбилею профессора К. М. Салихова

В этот выпуск представили статьи ведущие учёные в области магнитного резонанса, коллеги, ученики и друзья юбиляра. Спецвыпуск вышел в трёх номерах и содержит около 40 статей. Тематика спецвыпуска отразила многогранную научную деятельность Кева Минуллиновича Салихова на протяжении полувека. Мы приводим выдержки из предисловия к этому спецвыпуску, в часности, поздравления лауреата Нобелевской премии, иностранного члена Российской академии наук профессора Рихарда Р. Эрнста, Президента международного общества ЭПР Хитоши Охта, профессора Клауса Мёбиуса, ближайшего друга и соратника юбиляра, а также профессора Ханса Вольфганга Шписса. Выдержки из спецвыпуска даны в переводе Л. В. Мосиной.

Дорогой Друг,
Дорогой Кев,
Дорогой профессор Кев Минуллинович Салихов!

Мои искренние поздравления по поводу Вашего 80-летия. Я горд, что у меня есть такой дорогой друг и великий учёный в Республике Татарстан, кто достиг мировой славы своими бесподобными достижениями в электронном спиновом резонансе. Для меня Ваш блеск похож на сияние утренней звезды, которое служит просвещению и науке России и даёт надежду на новые важные достижения в науке России и Республики Татарстан. Я надеюсь, что ещё долго Ваша творческая сила и Ваша дружба будут приносить пользу науке.

Мои наилучшие пожелания Вам и Вашей семье и успешного будущего в науке,

Ваш Рихард Р. Эрнст,
ВТШ Цюрих,
лаборатория физической химии

* * *

Мы очень взволнованы возможностью представить статью в специальный выпуск журнала “Zeitschrift für Physikalische Chemie” в честь профессора Кева М. Салихова. Это – замечательная идея опубликовать такой специальный выпуск, посвящённый тому, что Кев М. Салихов сделал для сообщества ЭПР своей многолетней вдохновенной научной деятельностью. Позвольте мне отметить с точки зрения Президента международного общества ЭПР, каковым я являюсь, некоторые замечательные достижения, которые он достиг.

В 1991 году Кев М. Салихов был инициатором Международной премии им. Завойского. Эта премия отмечает истинно выдающиеся приложения или разработки ЭПР в любой области науки. Вручение проходит ежегодно в Казани в конце сентября. Дата привязана ко дню рождения Е. К. Завойского, первооткрывателя ЭПР в 1944 году. Высокий научный уровень лауреатов премии несомненно означает, что Международная премия им. Завойского признана мировой научной общественностью в качестве одной из основных наград научных достижений.

Она также признана Международным обществом ЭПР и Амперовским обществом.

В 1990 году Кев М. Салихов инициировал журнал "Приложения магнитного резонанса". Журнал является международным форумом для приложений магнитного резонанса, включая ЭПР, в различных областях науки. Редакция располагается в Казани. Благодаря Кеву М. Салихову, оригинальные статьи конференции Азиатско-Тихоокеанского симпозиума ЭПР, который проводится каждые два года, были опубликованы как специальный выпуск журнала "Приложения магнитного резонанса".

Мы ощущаем, что эта деятельность действительно служит признанию Казани, места рождения открытия Е. К. Завойским электронного парамагнитного резонанса. Мы очень счастливы участвовать в таких конференциях в Казани как, например, ежегодная международная конференция "Современное развитие магнитного резонанса". Неутомимая деятельность юбиляра продвигает международное сотрудничество и связи, и сообщество хотело бы выразить нашу благодарность Кеву М. Салихову.

Кев М. Салихов много раз посещал мою группу и Японию, например, конференции APES2001 (Кобе), APES2014 (Нара), ISESS-SEST2007 (Шизуока) и Симпозиум Кобе 2007. Он всегда полон энтузиазма и активно обсуждал с другими науку ЭПР. Я помню ясно, что он был очень счастлив осуществить свою мечту: видеть Тихий океан и в то же самое время интенсивно обсуждать квантовые вычисления на горячих источниках в японском стиле в Шизуоке. Я уверен, что Кев М. Салихов продолжит свою самоотверженную деятельность в науке на благо сообщества ЭПР.

Хитоши Охта,
Президент международного общества ЭПР,
Университет Кобе, Япония

Малые взаимодействия с большими последствиями

Это – выдающаяся честь и большое удовольствие обратиться к Кеву М. Салихову в этом специальном выпуске журнала "Zeitschrift für Physikalische Chemie", посвящённом ему по случаю его 80-летия (3 ноября, 2016). Этот праздничный выпуск продолжает многолетнюю университетскую традицию чествования учёных, которые оказали фундаментальное влияние в какой-либо важной области науки. И Кев Салихов – исключительный пример выдающихся качеств в многогранных дисциплинах магнитного резонанса, где он оставил так много новаторских следов – и продолжает свою деятельность.

С 1963 года до середины 2016 Кев Салихов является (со)автором более чем 220 публикаций в первоклассных научных журналах, и он опубликовал девять книг. Он заложил теоретическое обоснование для нескольких передовых методов импульсного ЭПР, которые теперь используются повседневно. Кев Салихов внёс фундаментальные теоретические вклады в спиновую химию для понимания магнитно-полевых и магнитно-изотопных эффектов в химических реакциях, электронной спиновой и химической динамики в сложных жидкостях и твёрдых системах, и электронной и ядерной спиновой неравновесной гиперполяризации. Он сделал большой вклад в усилия всего мира, чтобы объяснить потенциал методов импульсного ЭПР для изучения пространственной структуры парамагнитных пар в разупорядоченных системах. Позднее его научно-исследовательские интересы распространились на ЭПР томографию в медицине, на фемтосекундную спектроскопию и фемтохимию, на спиновую технологию, так же как на квантовые вычисления и квантовую информатику. Для этого он использует электронные спины как кубиты и спин-зависимые элементарные химические акты как квантовые логические операции.

Далее, мы кратко упомянем несколько выдающихся примеров научно-исследовательской деятельности Кева Салихова на протяжении многих лет: определение структуры парамагнитных центров в разупорядоченных твёрдых веществах – важный момент. Кев использует эффект модуляции огибающей спада сигнала электронного спинового эха (ESEEM), чтобы детектировать слабое спин-спиновое взаимодействие. В то время как Larry Rowan, Erwin Hahn и Bill Mims были первыми, в 1965 году, кто наблюдал и проанализировал ESEEM парамагнитных центров в монокристаллах, три года спустя в сотрудничестве со своим новосибирским коллегой Георгием М. Жидомировым, Кев Салихов был пионером наблюдения ESEEM парамагнитных центров в разупорядоченных твёрдых веществах и замороженных растворах. В 1968 году они опубликовали свои результаты на русском языке, но только через несколько лет их работа получила заслуженную оценку обществом ЭПР на западе. В этой статье впервые была введена концепция селективного возбуждения спинов в электронных системах, которая в настоящее время широко используется в современной спектроскопии импульсного ЭПР в твёрдом теле.

Одной из основных целей спектроскопии импульсного ЭПР с самого начала было измерить слабое диполь-дипольное взаимодействие между парамагнитными центрами или спиновыми метками для того, чтобы извлечь точную информацию о расстоянии. В 1960–1980 годах Кев Салихов как теоретик содействовал решению этой проблемы. Его исследования возможных проявлений слабого магнитного диполь-дипольного взаимодействия между локализованными спиновыми метками создали основу для современных приложений спектроскопии импульсного электронного двойного резонанса (PELDOR) (или DEER, двойной электрон-электронный резонанс). Статья "Применение метода двойного резонанса в электронном спиновом эхо для изучения пространственного распределения парамагнитных центров в твёрдых телах" (А. Д. Милов, К. М. Салихов, М. Д. Щиров, ФТТ **23**, 975 (1981)), дала начало многочисленным приложениям

методологии PELDOR, чтобы изучать структуру белков, лекарств, комплексов переходных металлов, биомолекул, и т.п. Среди "горячих" научных тем Кева Салихова – фотосинтез, особенно индуцированные светом реакции переноса электрона в реакционных центрах фотосинтеза (РЦФ). Он сделал несколько фундаментальных вкладов в спектроскопию ЭПР состояний разделённых зарядом радикальных пар донорных и акцепторных кофакторов в цепи передачи электрона бактериального РЦФ. Он теоретически предсказал такие новые спиновые явления как, например, квантовые биения интенсивности линии ЭПР и несинфазные спиновые эхо спин-коррелированных радикальных пар в РЦФ. Эти спиновые явления были экспериментально наблюдены в нескольких лабораториях вскоре после того, как они были предсказаны. Детектирование несинфазного спинового эхо спин-коррелированных радикальных пар оказалось чрезвычайно полезным для характеризации короткоживущих промежуточных продуктов реакции в естественном и искусственном фотосинтезе и установления путей фотореакции. В сотрудничестве с Dietmar Stehlik (Берлин) была разработана новая стратегия, чтобы изучать радикальные пары переноса электрона в РЦФ фотосинтеза посредством введения дополнительного стабильного электронного спина, используя сайт-специфические спиновые метки (K. M. Salikhov, A. van der Est, D. Stehlik, "The transient EPR spectra and spin dynamics of coupled three-spin systems in photosynthetic reaction centres", Appl. Magn. Reson. **16**, 101 (1999)]. В течение последующих лет этого сотрудничества, Кев Салихов предложил протокол квантовых вычислений для квантовой телепортации через биологическую мембрану в РЦФ фотосинтеза (K. Salikhov, J. H. Golbeck, D. Stehlik. "Quantum teleportation across a biological membrane by means of correlated spin pair dynamics in photosynthetic reaction centers", Appl. Magn. Reson. **31**, 237–252 (2007)). В настоящее время, несколько научно-исследовательских групп в России, Германии, Канаде, и США работают над реализацией этого протокола.

В 1990 годах Кев Салихов заинтересовался перспективной областью ЭПР томографии. В то время как ЯМР томография стала хорошо разработанным методом для медицинской диагностики, ЭПР томография значительно менее разработана. Очевидной проблемой является скин-эффект проводящих веществ или микроволнового (МВ) поглощения диэлектриков с большими потерями, когда высокочастотные МВ поля приложены как в ЭПР. Кев Салихов и его коллеги в Казани установили теоретически алгоритмы ЭПР томографии для проводящих и диэлектрических материалов с большими потерями (M. P. Tseitliun, K. L. Aminov, K. M. Salikhov, "Magnetic resonance spectrum of localized spins in conductive materials in linear field gradient", Appl. Magn. Reson. **16**, 325 (1999); K. L. Aminov, M. P. Tseitliun, K. M. Salikhov, "I-D EPR imaging of conducting and lossy-dielectric samples" Appl. Magn. Reson. 1**6**, 341 (1999)). Идея состоит в том, чтобы записать спектры при отрицательных и положительных градиентах магнитного поля, чтобы получить комплексное значение проекции. Полученные результаты могут быть применены также в высокополевой ЯМР томографии.

С начала 2000 годов, Кев Салихов был активно вовлечён в квантовые вычисления. Миниатюризация компьютерных узлов до нанометровой шкалы приводит не только к гораздо большему пространству для памяти компьютеров. Даже ещё более важно то, что квантовые свойства позволяют выполнять определённые вычислительные задачи более эффективно, чем любой классический суперкомпьютер когда-либо сможет сделать. Кроме того, эти квантовые свойства допускают выполнять такие беспрецедентные задачи как, например, квантовая телепортация, генерация истинно случайных чисел, и т.п. Передовые методы импульсного ЭПР являются перспективными, чтобы давать необходимые инструментальные средства для манипулирования состояниями электронных спинов в молекулярных системах согласно алгоритмам квантовых вычислений. Кев Салихов предложил протоколы, основанные на методологии импульсного ЭПР, чтобы использовать электронные спины как кубиты для квантовых вычислений и квантовой информатики, обеспечивающих основные логические операторы Not (NOT) и Controlled Not (CNOT). CNOT – операция с двумя кубитами (двумя спинами) и, для того, чтобы выполнить логическую операцию, два спина должны взаимодействовать. Но только слабо, конечно, чтобы сохранить достаточно длинное время спиновой декогерентности (фазовой релаксации) для управляемой манипуляции спинами СВЧ импульсами. Вместе с своим учеником Михаилом Волковым, Кев Салихов решил эту проблему (M. Yu. Volkov, K. M. Салихов, "Pulse protocols for quantum computing with electron spins as кубиты", Appl. Magn. Reson. **41**, 145 (2011)). Оказалось, что протоколу CNOT нужно более чем 20 микроволновых импульсов. Это означает, что для реализации логической операции CNOT с электронными спинами как кубитами нужно 200 нс. Таким образом, электронные спины должны обладать временами фазовой релаксация дольше чем 1 мкс. Нужно приложить необходимые импульсы, чтобы манипулировать электронными спиновыми состояниями. Такие требования могут быть вероятно выполнены и, на самом деле, значительное количество научно-исследовательских групп пытается реализовать квантовый компьютер с электронными спинами как кубитами.

С ранних этапов своей университетской карьеры, то есть в начале 1960 и 1970 годов при работе над своими диссертациями кандидата и доктора физико-математических наук, Кев Салихов сделал важные вклады в теоретическое описание бимолекулярных столкновений и спинового обмена между парамагнитными центрами в разбавленных растворах. Спиновый обмен является постоянной темой для него с тех пор. В 2014 году, например, Кев Салихов опубликовал вместе с коллегами обширные

исследования спинового обмена в электролитах между заряженными частицами. Совсем недавно, в августе 2016, Кев Салихов опубликовал основополагающую статью, в которой он разработал теоретические инструменты, чтобы исчерпывающе проанализировать проявления спинового обмена и процессов передачи когерентности в спектрах ЭПР ("Consistent paradigm of the spectra decomposition into independent resonance lines", Appl. Magn. Reson. **47** (2016), DOI: 10.1007/s00723-016-0823-3). Формы спектров спинового резонанса в присутствии передачи когерентности были проанализированы теоретически. Описан последовательный подход для разложения многокомпонентных спектров на индивидуальные резонансные линии, который основан на нахождении независимых коллективных мод для эволюции квантовых когерентностей. В присутствии переноса когерентности, формы резонансных линий, соответствующих этим модам, могут быть смесью кривых поглощения и дисперсии. В пределе быстрого переноса когерентности – соответствующего эффекту обменного сужения – одна коллективная мода даёт доминирующий вклад в экспериментальный спектр. Полученные теоретические результаты создали надёжную базу для приложений слабого спин-спинового взаимодействия между спиновыми зондами как мощное аналитическое средство в химической кинетике и молекулярной биологии.

Прежде, чем закончить этот раздел о широком диапазоне научно-исследовательских интересов Кева Салихова, надо упомянуть его фундаментальные вклады в увлекательную область спиновой химии (см. книжную классику: K. M. Salikhov, Yu. N. Molin, R. Z. Sagdeev, A. L. Buchachenko, Spin Polarization and Magnetic Effects in Radical Reactions, Elsevier Amsterdam (1984)]. Он оказал сильное влияние на теорию явлений CIDNP и CIDEP. Он определил максимальный возможный вклад электронного ядерного сверхтонкого взаимодействия с магнитными ядрами на скорость рекомбинации свободных радикалов. Максимальные вероятности рекомбинации радикальной пары при замещении магнитными изотопами немагнитных ядер были найдены на основе сохранения общего спина неспаренных электронов и магнитных ядер в радикальной паре.

Кев Салихов предсказал и, вместе с коллегами, разработал первую теорию эффекта стимулированной ядерной спиновой поляризации (SNP) в высоких магнитных полях (K. M. Salikhov, S. A. Mikhailov, M. Plato, Chem. Phys. **117**, 197 (1987)). Эффект SNP используется как очень чувствительный новый метод для обнаружения линий ЭПР короткоживущих радикальных пар. Наконец, в 2004 году Кев Салихов предложил новый механизм электронной спиновой поляризации возбуждённых триплетных состояний, вызванной взаимной аннигиляцией триплетных состояний, который был быстро (2005) подтверждён экспериментально. Это триплетная спиновая гиперполяризация имеет перспективу быть использованной в устройствах спинтроники.

Учитывая его фундаментальные вклады в столь обширную область исследований, неудивительно, что список его почётных званий и наград впечатляюще длинен:

2015 Fellow Международного общества магнитного резонанса (ISMAR);
2014 Fellow Международного общества ЭПР/ЭСР (IES);
2014 Международная премия им. Воеводского;
2012 Брукеровская премия Королевского химического общества Великобритании;
2011 Почётный гражданин Казани;
2007 Орден "За заслуги перед Отечеством" IV степени РФ;
2006 Орден "За заслуги перед Республикой Татарстан";
2004 Международная премии им. Завойского;
2000 Награда лектора общества магнитного резонанса Австралии & Новой Зеландии;
2001 Награда Alexander-von-Humboldt-Foundation;
1998 Государственная премия Республики Татарстан;
1996 Премия "Выдающийся учёный" института RIKEN, Япония;
1996 Золотая медаль Международного общества ЭПР/ЭСР (IES);
1992 Fellow Wissenschaftskolleg в Берлине (академический год 1992/93);
1986 Ленинская премия (наука и техника).

Служение Кева Салихова международному научному сообществу образцово. Некоторые примеры включают:

2015 Со-организатор второй международной конференции "Спиновая физика, спиновая химия, и спиновая технология" в Санкт-Петербурге, Россия;
2011 Основатель и организатор первой международной конференции "Спиновая физика, спиновая химия и спиновая технология" в Казани, Республика Татарстан, Россия;
1994 Организатор 27-го Амперовского конгресса в Казани, Россия;
с 1992 Член Амперовского комитета;
с 1991 Председатель Международного комитета по присуждению Международной премии им. Завойского;
1991 Инициатор создания Международной премии им. Завойского за выдающиеся достижения в разработке или приложения ЭПР в любой области науки;
с 1990 Основатель и главный редактор журнала "Applied Magnetic Resonance", Шпрингер;
с 1991 Организатор ежегодной Международной конференции в Казани "Modern Development of Magnetic Resonance";
1989–2001 Член редакции журнала "Химическая физика".

Вкратце описание профессионального опыта и научной карьеры Кева Салихова:

Настоящее время: Научный руководитель Казанского физико-технического института, Российская академия наук, Казань, Республика Татарстан, Россия

1988–2015 Директор Казанского физико-технического института, Российская академия наук, Казань, Республика Татарстан, Россия;
с 2011 Академик Российской академии наук;
с 1997 Член-корреспондент Российской академии наук;
с 1992 Академик и вице-президент Академии наук Республики Татарстан, Россия;
с 1989 Профессор химической физики Казанского государственного университета (теперь Казанский федеральный университет), Казань, Республика Татарстан, Россия;
с 1989 Заведующий отделом химической физики Казанского физико-технического института, Российская академия наук, Казань, Республика Татарстан, Россия;
с 1980 Приглашённый исследователь в ведущих лабораториях ЭПР, включая Свободный университет Берлина, Германия, в группах Д. Штелика и К. Мёбиуса; Институт физических и химических исследований (RIKEN), Япония, в группе Х. Хаяши; Университет Корнелла, США, в группе Дж. Фрида;
1979–1988 Профессор теоретической физики в Новосибирском государственном университете, Новосибирск, СССР;
1967–1979 Доцент в Новосибирском государственном университете, Новосибирск, СССР;
1963–1988 От младшего научного сотрудника до научного сотрудника и старшего научного сотрудника и с 1986 ведущий научный сотрудник в Институте химической кинетики и горения Сибирского Отделения Академии наук СССР, Новосибирск, СССР;
1973 Доктор физических-математических наук, защита в Казанском государственном университете, оппоненты: С. А. Альтшулер, Г. Р. Хуцишвили, В. А. Ацаркин, Б. Н. Провоторов, Б. И. Кочелаев;
1962–1963 Ассистент в Карагандинском политехническом университете, Караганда, СССР;
1959–1962 Аспирант и кандидат физико-математических наук (1963), работал с М. В. Волькенштейном и Ю. Я. Готлибом, Институт высокомолекулярных соединений Академии наук СССР, Ленинград, СССР.

В итоге хотел бы подчеркнуть: характерной чертой творческой деятельности Кева Салихова является его тесное взаимодействие с экспериментаторами во всём мире. Связь и сотрудничество – ключевые компоненты его научного успеха и личного счастья. Его теоретические предсказания были практически все подтверждены в экспериментах во многих лабораториях. Довольно часто они стимулировали новые эксперименты и приложения. Специфическое преимущество спектроскопии импульсного ЭПР – это то, что оно обнаруживает такие чрезвычайно слабые магнитные взаимодействия как, например, сверхтонкое взаимодействие электронных спинов с магнитными ядрами или диполь-дипольное спин-спиновое взаимодействие между спиновыми метками. Эти взаимодействия могут быть в миллион раз слабее, чем тепловая энергия kT при комнатной температуре. Тем не менее, эти слабые спиновые взаимодействия могут иметь большие последствия в химии и биологии в целом. Например, они могут решающим образом влиять на каналы фотоиндуцированной химической реакции переноса электрона.

Кев, Ваша работа стимулировала научное мышление многих коллег, партнёров и друзей в мировом сообществе магнитного резонанса. Кев, мы желаем Вам и Вашей семье самого наилучшего на многие грядущие годы. Кев, мы ждём с нетерпением Ваших вкладов в науку и дружбу. Кев, на протяжении многих лет Ваша дружба обогатила нашу жизнь. Благодарим Вас!

Клаус Мёбиус,
Свободный университет Берлина & Институт конверсии химической энергии им. Макса Планка

* * *

Дорогой Кев!

Самые тёплые поздравления по поводу Вашего 80-летия. Я истинно наслаждался участием в этом празднике в Казани в этот день. Память возвращает меня к дням XXVII Амперовского конгресса, в Казани, 21–28 августа, 1994 на праздник 50-й годовщины открытия ЭПР Е. К. Завойским. Я вспоминаю трудные дискуссии в Бюро Амперовского общества в Цюрихе где Вы обещали решить все проблемы, о которых говорили участники Бюро. Это было трудное время после краха Советского Союза, но с Вашей помощью был организован чартерный полёт из Франкфурта в Казань, который привёз более чем 100 участников из западных стран на это событие. Вместе с теми, которые организовали своё путешествия самостоятельно, более чем 150 коллег из западных стран приехали в Казань, и этот факт произвёл большое впечатление на правительство Республики Татарстан, сам президент открыл конгресс.

Эта небольшая история должна напомнить нам о том, чем мы все так восхищаемся в Вас. Ваш энтузиазм на благо ваших исследований и мирового научного сообщества беспрецедентен. Вы сделали Казанский физико-технический институт Е. К. Завойского центром спектроскопии ЭПР, признанным во всех странах, и его сотрудники работают по всему земному шару.

Вы всё ещё полны идей, и я желаю Вам продолжающегося хорошего здоровья, чтобы Вы могли бы реализовать их как в науке, так и вместе с Вашей большой семьёй.

С наилучшими пожеланиями,

Ханс Вольфганг Шписс,
Институт исследования полимеров им. Макса Планка, Майнц, Германия

В 80 лет жизнь только начинается!

Выступление К. М. Салихова в НКЦ Казань 3 ноября 2016 года

Дорогие коллеги, друзья!

Я очень рад видеть вас. Всем большое спасибо.

Юбилей – это хороший повод подвести промежуточные итоги в жизни, работе, удобная возможность для юбиляра воздать должное родителям и семье, учителям, друзьям, коллегам.

Я очень благодарен своим родителям. Они научили меня работать. Семья меня всегда поддерживала и помогала. Я очень счастлив, что сегодня здесь моя младшая сестра Галия, дочь Асия со всей своей семьёй прилетели из Новой Зеландии. Спасибо им. Дружная семья сына прислала видео поздравление, они планируют приехать во время школьных каникул.

Словами невозможно выразить, как многим я обязан своим учителям в школе. Особенно многому меня научила учительница истории Татьяна Константиновна Максимова. Когда она ушла на пенсию, она приезжала к нам в гости. Наши дети написали про неё, когда надо было сочинить на свободную тему. Моими любимыми учителями были также Вера Ивановна Юсупова (математика) и Иван Яковлевич Фризен (немецкий язык). Вспоминая про них, я думаю, что в каждой школе должно быть несколько выдающихся учителей. Тогда и вся школа станет выдающейся. Мне повезло, в нашей школе были такие учителя.



Родители К. М. Салихова – Минулла Салихович и Фархизихан Давлетгареевна Салиховы.

Конечно, незабываемы годы учёбы в КГУ. Я рад, что сегодня здесь есть мои однокурсники, университетские друзья. Самые яркие воспоминания об университете связаны с читальным залом. Каждый день после лекций я приходил в читальный зал и оставался там до закрытия, по-моему, это было до 21.00. Это было идеальное место для общения, решения задач, и т.д.

В аспирантуре я учился в Институте высокомолекулярных соединений АН СССР в Ленинграде. Моими научными руководителями были Михаил Владимирович Волькенштейн и Юлий Яковлевич Готлиб. Там я получил уроки научной работы.

25 лет я работал в Академгородке (Новосибирск) в Институте химической кинетики и горения СО АН СССР. Это были самые плодотворные годы в моём научном творчестве. Большим достижением было получение Ленинской премии в коллективе с Ю. Н. Молиным, Р. З. Сагдеевым (оба ИХКиГ СО АН СССР) и А. Л. Бучаченко, Е. Л. Франкевичем (Институт химической физики АН СССР, Москва) за создание основ спиновой химии. Р. З. Сагдеев не смог приехать, и он прислал видео поздравление.

Так сложилось, что в 1988 году я перешёл на работу в Казанский физтех КазНЦ РАН. Я занимался теорией электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Заниматься ЭПР в институте, одним из основателей которого



К. М. Салихов, его супруга Зоя Васильевна, их дочь Асия и её семья.







1986 г. Кев Минуллинович Салихов, Юрий Николаевич Молин и Ренад Зиннурович Сагдеев узнали о присуждении Ленинской премии.

стал первооткрыватель ЭПР Евгений Константинович Завойский, – об этом можно было только мечтать. Когда встал вопрос о моём переезде в Казань, одни сомневались, другие поддерживали. Спустя 28 лет работы в Казанском физтехе я считаю, что переезд в Казань был правильным решением. Институт меня встретил хорошо, руководство Республики также благожелательно отнеслось ко мне. Особенно мне помогла поддержка Минтимера Шариповича Шаймиева. Я очень горд, что городской совет и мэр Казани решили избрать меня Почётным гражданином г. Казани. Большое спасибо, что общество, руководство Республики и города положительно оценивают работу учёных, поддерживают их.

Я очень благодарен зарубежным коллегам за поддержку, дружбу. Огромную поддержку они оказали при создании журнала “Applied Magnetic Resonance”. Первый состав редакционной коллегии этого журнала сверкает звёздами мирового магнитно резонансного сообщества. Ещё один замечательный пример. По моей инициативе на физфаке КГУ была создана кафедра химической физики. Профессор Оксфордского университета Питер Аткинс прилетел и прочитал несколько лекций, устроил для студентов праздник. Бесплатно. Питер очень хотел приехать и сегодня, но обстоятельства не позволили ему этого сделать. Он прислал видео поздравление (смотрим и слушаем).

Особое место в моей работе, жизни занимает сотрудничество с немецкими коллегами в Свободном университете Берлина. Это сотрудничество давно переросло в дружбу с Клаусом Мёбиусом, Дитмаром Штеликом, Волфгангом Любитцем, Мартином Плато, Хансом Мартином Фитом, Гердом Бунтковским. Более того, мы дружим семьями.

Казань, Ленинград, Академгородок (Новосибирск), Берлин – это мои родные любимые города.

Я уже говорил, что семья мне всегда помогает. От имени семьи меня пришла поздравить внучка Ева-Мария.

Ещё раз всем большое спасибо.
Всего вам наилучшего.



Юлий Яковлевич Готлиб, научный руководитель.

Некоторые поздравления, поступившие в адрес К. М. Салихова

Уважаемый Кев Минуллинович!

Примите самые тёплые поздравления по случаю Вашего знаменательного юбилея.

Вы посвятили свою жизнь, талант и творческую энергию науке, внесли неоценимый вклад в развитие Казанского физико-технического института имени Е. К. Завойского и прославленной казанской физической школы в целом.

Трудолюбивая, целеустремлённая личность, Вы всегда активно служили укреплению интеллектуального и промышленного потенциала нашей республики, обрели заслуженный авторитет и признание в широком научном сообществе. Примите слова глубокого уважения к Вам и признательности за Вашу многогранную деятельность на благо Татарстана. Желаю Вам здоровья, бодрости духа и созидательной энергии для дальнейшего благополучного долголетия. Мира, добра и всего наилучшего Вам и Вашим близким.

Р. Н. Минниханов,
Президент Республики Татарстан

Глубокоуважаемый Кев Минулинович!

Позвольте нам, аппарату Отделения физических наук Российской академии наук, сердечно поздравить Вас с Юбилеем – с Днём 80-летия!

Мы желаем счастья Вам и Вашим близким, создающим уют в Вашем доме! Желаем процветания Вашему институту. Мы искренне радуемся успехам журнала “Applied Magnetic Resonance”.

Мы ценим те минуты, в которые нам удаётся с Вами беседовать. Общение с таким философом, каким Вы являетесь для окружающих Вас друзей, сотрудников и учеников, позволяет и нам побывать в объятиях Вашей мудрости. Нестандартные решения, которые Вы проводите в жизнь с “мягкой силой”, всегда вызывают восхищение.

Будьте счастливы!

И много-много здоровья в Ваш дом.

Н. Л. Истомина,
заместитель академика-секретаря ОФН
по научно-организационной работе

Уважаемый Кев Минуллинович!

Сердечно поздравляю Вас со знаменательной датой в жизненном календаре – 80-летним юбилеем!

С удовольствием присоединяясь ко всем звучащим сегодня в Ваш адрес добрым словам и пожеланиям, хочу подтвердить Вам своё уважение.

Этот день вы встречаете счастливым человеком, завоевавшим себе весомый авторитет и любовь родных, друзей и коллег. Вы щедро одарены природой жизненной энергией, выдающимся интеллектом и огромной работоспособностью. Не случайно Вам покорились многие вершины на научном поприще.

От всей души желаю Вам всегда оставаться на солнечной стороне жизни, где царят удача и успех. Доброго здоровья, прекрасного настроения, мира и благополучия Вам и Вашей семье.

Р. Ф. Муратов,
Помощник Президента Республики Татарстан

Дорогой Кев Минуллинович!

Ваши друзья и коллеги из Института физики твёрдого тела РАН сердечно и искренне поздравляют Вас с 80-летним юбилеем!

Ваши выдающиеся научные труды и открытия в области импульсной ЭПР спектроскопии и спиновой химии внесли огромный вклад в мировую физику и получили широчайшее признание во всём мире. Развитая Вами детальная теория спинового обмена широко используется во многих областях науки, включая молекулярную биофизику. А Ваши идеи в области возможного развития квантовых вычислений с использованием электронных спинов несомненно будут востребованы в будущем.

Наряду с выдающимся профессионализмом Вы обладаете замечательными человеческими качествами, которые притягивают к Вам окружающих.

Мы рады, что Вы полны энергии и захватывающих планов. Желаем Вам крепкого здоровья, благополучия, большого счастья и творческого долголетия! И пусть последующие годы принесут Вам ещё много интересных научных открытий, которые доставят радость и Вам и всему научному сообществу и послужат на благо России.

В. Кведер,
директор ИФТТ РАН

Дорогой Кев!

Приближается день твоего юбилея.

К сожалению, я не смогу присутствовать на нём, уезжаю в отпуск с семьёй. Но в этот день я хочу поздравить тебя, вспомнить наши прежние годы.

Наша совместная работа в ИХКиГ была самым романтичным, самым интересным в моей жизни. Надеюсь, и в твоей. Тогда мы открывали и развивали основы спиновой химии. Каждый день совершали открытия. Каждый день были многочисленные обсуждения. Мы всему этому радовались. Мы ездили на конференции. Вспоминаю поездку на самолёте в Америку, поездку на яхте вместе с Герхардом Клоссом, и многое другое.

Дорогой Кев, присоединяясь к поздравлениям, я хочу отметить, что у нас много общего. Кроме привязанности к науке, общее у нас – любовь к песне, к музыке. Поэтому я хочу спеть одну из песен нашей молодости.

С юбилеем тебя, дорогой Кев, обнимаю, поздравляю от всей души.

Р. З. Сагдеев, акад.
первый зам. председателя СО РАН

Дорогой Кев Минуллинович!

Мы, три поколения Завойских, поздравляем Вас с Юбилеем! Много лет назад своим появлением на свет Вы обрадовали своих родителей, а подрастая, радовали всё большее число людей. И для всех, кто попадал в этот обширный круг, от Новосибирска-Казани-Москвы до Германии-Швейцарии и далее через океан до Токио, жизнь начинала блестеть яркими красками идей и свершений. Это истинный талант – быть не только крупным учёным, имя которого известно всему научному миру, но и быть настоящим оптимистом в этой непростой жизни. Поклон и поздравления Вашей супруге Зое Васильевне!

Наталья Евгеньевна и
семья Завойских



Дорогой Кев Минуллинович!

От лица сотрудников Казанского физтеха позвольте сердечно поздравить Вас с Вашим замечательным юбилеем.

Самое главное, что нам хочется сказать, – Вы уникальная личность!

Вы – человек удивительной биографии, талантливый учёный, генератор идей, неутомимый организатор и энтузиаст науки.

Вы – мудрый человек, переживший не одно изменение в политической жизни страны, не одну реформу в сфере науки, не одну кадровую перестройку, но философски принимающий и радости, и огорчения, и не ожесточившийся на мир.

Вы – человек XX века, не только мудро наблюдающий за перипетиями века нового, но и опережающий его в своих идеях и начинаниях.

Вы – удивительно скромный человек, но с огромным чувством собственного достоинства.

Вы – романтик, неутомимый путешественник, готовый и сегодня собраться в путь, чтобы встречаться с людьми, любоваться природой и архитектурой, чтобы быть в мире событий, окружающих нас.

Вы – счастливый человек, потому что у Вас такая большая научная семья, которая любит и уважает Вас.

Позвольте нам от лица Вашей научной семьи преподнести в дар предмет, который в современном мире символизирует приоритет знаний над невежеством. Наши древние коллеги – алхимики, полагали его символом бесконечного движения, эволюции и первичной материи.

Это глобус. Пусть этот глобус, имеющий идеальную форму без углов и оконечностей, подарит Вам жизненный путь, свободный от трудностей, препон и неприятностей.



К. М. Салихова с юбилеем поздравили:

- Президент Республики Татарстан Р. Н. Минниханов
- Государственный советник Республики Татарстан М. Ш. Шаймиев
- Премьер-министр Республики Татарстан И. Ш. Халиков
- Помощник Президента Республики Татарстан Р. Ф. Муратов
- Помощник Президента Республики Татарстан К. Ш. Исхаков
- Председатель Государственного Совета Республики Татарстан Ф. Х. Мухаметшин
- Заместитель Председателя Государственного Совета Республики Татарстан Р. А. Ратникова
- Мэр г. Казани И. Р. Метшин
- Заместитель Премьер-министра Республики Татарстан, министр образования и науки Республики Татарстан Э. Н. Фаттахов
- Руководитель Аппарата Президента Республики Татарстан А. А. Сафаров
- Заместитель Руководителя Аппарата Президента Республики Татарстан, руководитель департамента Президента РТ по вопросам внутренней политики А. М. Терентьев
- Заместитель Руководителя Аппарата Президента Республики Татарстан, начальник Управления по работе с территориями И. М. Гарипов
- Председатель Комитета Государственного Совета Республики Татарстан по образованию, культуре, науке и национальным вопросам Р. И. Валеев
- Премьер-министр Правительства Республики Башкортостан Р. Х. Марданов
- Руководитель ФАНО М. М. Котюков
- Заместитель начальника Управления координации и обеспечения деятельности организаций в сфере науки ФАНО д.ф.-м.н. И. Н. Чугуева
- Вице-президент РАН, акад. В. В. Козлов
- Академик-секретарь ОФН РАН, акад. И. А. Щербаков; заместитель академика-секретаря ОФН по научно-организационной работе, д.ф.-м.н. Н. Л. Истомина
- Председатель Сибирского отделения РАН, акад. А. Л. Асеев (Новосибирск)
- Директор Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН, акад. И. А. Щербаков (Москва)
- Директор Института физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, акад. В. В. Устинов (Екатеринбург)
- Директор Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, акад. А. Г. Забродский (Санкт-Петербург)
- Директор НИЦ "Курчатовский институт", член-корр. РАН М. В. Ковальчук (Москва)
- Г.н.с. Института спектроскопии РАН, член-корр. РАН Е. А. Виноградов (Троицк, Моск. обл.)
- Директор Института проблем химической физики РАН, вице-президент РАН акад. С. М. Алдошин (Черноголовка, Моск. обл.).
- Директор Института физики твёрдого тела РАН, член-корр. РАН В. В. Кведер (Черноголовка, Моск. обл.).
- Директор Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, акад. А. В. Латышев; зам. директора по научной работе, член-корр. РАН А. В. Двуреченский (Новосибирск)
- Директор Института органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН, президент Азиатско-Тихоокеанского общества электронного парамагнитного резонанса (APES), д.ф.-м.н. Е. Г. Багрянская (Новосибирск)
- Директор Института физики микроструктур РАН, член-корр. РАН З. Ф. Красильник; Советник РАН, акад. С. В. Гапонов (Нижний Новгород)
- Директор Института прикладной физики РАН, акад. А. М. Сергеев; научный руководитель, акад. А. Г. Литвак (Нижний Новгород)
- Директор института физики им. Х. И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН, член-корр. РАН А. К. Муртазаев (Махачкала)
- Ректор Поволжского государственного технологического университета, д.с.-х.н. Е. М. Романов (Йошкар-Ола)
- Директор Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН, д.ф.-м.н. Н. В. Волков (Красноярск)
- Учёный секретарь Физико-технического института УрО РАН, к.х.н. О. Ю. Гончаров (Ижевск)
- Проф. Даниелла Гольдфарб (Израиль), президент Международного общества магнитного резонанса "ISMAR"
- Проф. Хитоши Охта, президент Международного общества ЭПР (ЭСР) (Университет Кобе, Кобе, Япония)
- Проф. Бернхард Блюмих (Германия), президент Амперовского общества
- Проф. Петер Аткинс (Оксфорд, Англия)
- Проф. Ханс-Мартин Фит (Свободный университет, Берлин)
- Уве и Барбара Айххоффы (фирмы "Брукер-Биоспин")
- Проф. Гарет Итон (Университет Денвера, Денвер, США).
- Проф. Сандра Итон (Университет Денвера, Денвер, США).
- Проф. Сабина Ван Доорслаер (Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия)
- Проф. Этьен Гувертс (Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия)
- Проф. Сунил Саксена (Университет Питтсбурга, Питтсбург, США)
- Доктор Хисако Нико (Издательство Шпрингер, Дордрехт, Нидерланды)
- Президент Академии наук Республики Башкортостан А. С. Гаязов



БЛАГОДАРСТВЕННОЕ ПИСЬМО

Глубокоуважаемый Кев Минуллинович!

От всей души поздравляю Вас с 80-летием!

За годы профессиональной деятельности Вы внесли значительный вклад в российскую науку и систему подготовки высококвалифицированных специалистов не только для Татарстана, но и для всей страны. Благодаря пытливому уму, глубоким знаниям Вы в своей работе добились удивительных результатов, которые имеют огромное практическое значение.

Профессионал, человек, преданный интересам отечественной науки, Вы по праву заслужили признание ученого сообщества всего мира, а мудрость, доброта и умение достигать поставленных целей снискали Вам уважение коллег, друзей и многочисленных учеников. Уверен, что Ваш богатый опыт еще долгие годы будет служить на благо Казани и ее жителей.

Искренне желаю Вам неизменного оптимизма, неиссякаемой жизненной энергии и успехов в реализации всех намеченных планов! Счастья, крепкого здоровья, мира и благополучия Вам и Вашим близким!

Мэр города Казани *И.Р.Метшин*



Министерство образования и науки Республики Татарстан

БЛАГОДАРСТВЕННОЕ ПИСЬМО

Заведующему отделом химической физики, научному руководителю Федерального государственного бюджетного учреждения науки Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского Казанского научного центра Российской академии наук, академику, профессору, доктору физико-математических наук

К.М. САЛИХОВУ

Уважаемый Кев Минуллинович!

Министерство образования и науки Республики Татарстан поздравляет Вас с 80-летием со дня рождения и выражает слова искренней благодарности за долголетнюю плодотворную работу в системе образования, активную деятельность в области научных исследований, значительный вклад в подготовку высококвалифицированных кадров.

Желаем Вам дальнейших творческих успехов, неиссякаемой энергии, доброго здоровья, счастья и благополучия.

Заместитель Премьер-министра Республики Татарстан – министр Э.Н. Фаттахов

- Президент Академии наук Республики Татарстан М. Х. Салахов
- Ректор Казанского федерального университета, д.э.н., И. Р. Гафуров
- Директор Физико-технического института им. Е. К. Завойского РАН, профессор РАН А. А. Калачёв
- Ректор Казанского национального исследовательского технологического университета, д.х.н. Г. С. Дьяконов
- Директор Института органической и физической химии им. А. Е. Арбузова, акад. О. Г. Синяшин
- Директор Казанского института биохимии и биофизики, акад. А. Н. Гречкин; зам. директора, д.б.н. В. М. Чернов; зам. директора, д.х.н. Ю. Ф. Зуев; учёный секретарь, к.б.н. И. Ю. Карпилова
- Ректор Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева, акад. АН РТ А. Х. Гильмутдинов; президент, акад. АН РТ Ю. Ф. Гортышев; зав. кафедрой общей физики д.ф.-м.н. Б. А. Тимеркаев
- Ректор Казанского государственного энергетического университета, к.т.н. Э. Ю. Абдуллазянов
- Директор Института механики и машиностроения, член-корр. РАН Д. А. Губайдуллин
- Ректор Университета управления “ТИСБИ”, д.п.н. Л. Н. Нусуманова
- Директор Набережночелнинского института (филиала) КФУ, д.т.н. М. М. Ганиев
- Врио директора Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН, д.ф.-м.н. М. Ф. Булатов
- Директор ФГБНУ ТатНИИСХ, член-корр. АН РТ М. Ш. Тагиров
- Генеральный директор АО “Научно-производственного объединения “Государственный институт прикладной оптики”, член-корр. АН РТ В. П. Иванов
- Акад. РАН Р. З. Сагдеев, первый зам. председателя СО РАН (Новосибирск)
- Акад. РАН А. Л. Бучаченко (Институт химической физики РАН, Москва)
- Акад. РАН Р. А. Сюняев (Институт космических исследований, Москва)
- Акад. РАН И. А. Тарчевский, советник РАН (Казанский институт биохимии и биофизики КазНЦ РАН)
- Член-корр. РАН, акад. АН РБ У. М. Джемилев
- Акад. АН РТ М. Х. Мазгаров, генеральный директор ОАО “ВНИИУС”
- Акад. АН РТ М. К. Михайлов (ГИДУВ, Казань)
- Д.ф.-м.н. Т. М. Бирштейн (Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург)
- Д.х.н. И. В. Коптюг (Институт “Международный томографический центр” Сибирского отделения РАН, Новосибирск)
- Д.ф.-м.н. В. А. Голенищев-Кутузов (Казанский государственный энергетический университет)
- Д.ф.-м.н. А. В. Голенищев-Кутузов (Казанский государственный энергетический университет)
- Руководитель Приволжского управления Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору Б. Г. Петров
- Руководство и коллектив сотрудников ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ (Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы)
- Генеральный директор ПАО “Татнефть” Н. У. Маганов, председатель профкома Г. К. Яруллин
- Председатель совета директоров компании “АБАК” Ф. Н. Маркман
- Председатель Совета директоров ЗАО “ТаксНет” С. Ш. Салимзянов
- Генеральный директор ОАО “Татнефтехиминвестхолдинг” Р. С. Яруллин
- Семья Н. Е. Завойской, дочери Е. К. Завойского

К. М. Салихова поздравили сотрудники института, многочисленные друзья и близкие.

ПЕРСОНАЛИИ

Евгений Иванович Штырков. К 80-летию со дня рождения



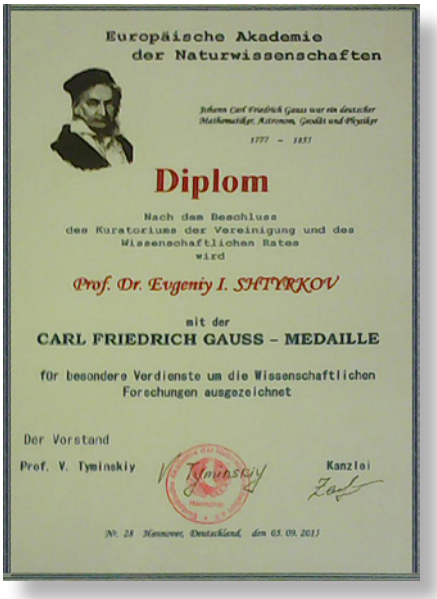
Евгений Иванович Штырков

22 декабря 2016 года своё 80-летие отметил доктор физико-математических наук, профессор Евгений Иванович Штырков. Евгений Иванович почти полвека служил науке в стенах Казанского физтеха. За эти годы он дважды стал лауреатом Государственной премии СССР по физике, автором открытия, Заслуженным деятелем науки Татарстана и Российской Федерации. Его заслуги перед отечественной наукой отмечены множеством наград разных физических обществ.

Подробно научные достижения Евгения Ивановича описаны его учениками в сборниках Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского (Ежегодник 2006 (стр. 223–225), и Ежегодник 2011 (стр. 177)), в связи с 70-летием и 75-летием.

В настоящее время Евгений Иванович не может по состоянию здоровья активно работать в институте, но дома он по-прежнему с энтузиазмом обсуждает тёмную материю, эфир, движение Земли – те проблемы, которые давно волнуют этого неугомонного учёного.

Награды продолжают находить Евгения Ивановича. В 2014 году он стал лауреатом Премии им. Ю. И. Остров-


Europäische Akademie der Naturwissenschaften

Diplom

Nach dem Beschluss des Kuratoriums der Vereinigung und des Wissenschaftlichen Rates wird

Prof. Dr. Evgeniy I. SHTYRKOV

mit der

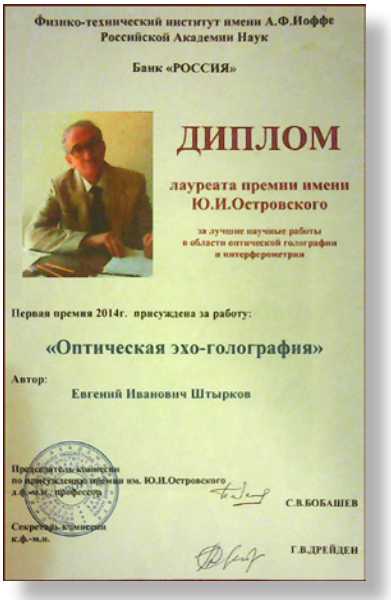
CARL FRIEDRICH GAUSS – MEDAILLE

für besondere Verdienste um die Wissenschaftlichen Forschungen ausgezeichnet

Der Vorstand

Prof. V. Tyminskiy

Kanzlei


Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе Российской Академии Наук

Банк «РОССИЯ»

ДИПЛОМ

лауреата премии имени Ю.И.Островского

за лучшие научные работы в области оптической голографии и интерферометрии

Первая премия 2014г. присуждена за работу:

«Оптическая эхо-голография»

Автор:

Евгений Иванович Штырков

С.В.БОБАШЕВ

Г.В.ДРЕЙДЕН



ского, которая присуждается за лучшие научные работы в области оптической голографии и интерферометрии, за работу “Оптическая эхо-голография”. В 2015 году Европейская академия естественных наук наградила Евгения Ивановича Почётным дипломом и медалью Иоганна Карла Фридриха Гаусса, которой награждаются учёные, “чьи исследования, технологии и разработки привели к установлению важных научных достижений”.

Мы поздравляем Евгения Ивановича с юбилеем, желаем ему здоровья и долголетия.

М. Ф. Галяутдинов, Н. В. Курбатова

Владимир Сергеевич Лобков. К 70-летию со дня рождения



Владимир Сергеевич Лобков

21 марта 2016 года случилось невероятное: 70-летие добралось до Владимира Сергеевича Лобкова – красы физтеха и всеобщего любимца. Кто в физтехе не знает этого широкоплечего бородатого блондина, бывшего хоккеиста клуба им. Воровского, а ныне заведующего лабораторией быстропротекающих молекулярных процессов, талантливого учёного-экспериментатора, занимающегося развитием передовых методов современной оптической спектроскопии в России. Например, под его руководством впервые в Казани были выполнены эксперименты с применением техники фемтосекундных лазеров. Однако юбилей – это такой момент, когда “итоги важны на жизненной дороге”.

В настоящее время Владимир Сергеевич руководит в институте научным направлением, включающем в себя хорошо известные методы линейной спектроскопии (например, люминесцентная спектроскопия) вместе со сложнейшими передовыми методами “pump-probe” оптической техники, основанной на применении сверхкоротких интенсивных лазерных импульсов длительностью несколько десятков фемтосекунд. Это позволяет проводить комплексные исследования и извлекать ценнейшую спектроскопическую информацию о свойствах исследуемых образцов, в том числе в субпикосекундной области, недоступной для других методов современной науки. Исследовательские интересы Владимира Сергеевича охватывают широкую область сложнейших задач, связанных с изучением фотофизических свойств новых оптоэлектронных материалов – бурно развивающегося сегмента современной технологической революции. В его лаборатории идут эксперименты с квантовыми точками, композиционными наноматериалами, красителями, люминесцентными порошками и плёнками, приготовленными из комплексов редкоземельных металлов. В сфере его интересов лежат и чисто фундаментальные вопросы, связанные, например, с внутримолекулярным переносом энергии, динамикой сверхбыстрых когерентных движений молекул, нелинейными многофотонными фотофизическими процессами и др. Помимо этого Владимир Сергеевич активно продвигает исследования, в результате которых впервые в мире предложены техника многоимпульсного когерентного лазерного контроля молекулярной динамики, метод УФ-лазерной модификации фотофизических свойств люминесцентных материалов и операция побитного умножения при регистрации спектра фотонного эха при комнатной температуре (эхо-процессинг).

Владимир Сергеевич является мудрым и авторитетным руководителем. Под его началом трудится сплочённый коллектив, состоящий в основном из молодых исследователей, двое из которых получили степень кандидата физико-математических наук. Хочется отметить его внимание, участие и глубокую заинтересованность в успехе каждого сотрудника. Важный аспект работы его лаборатории состоит в безграничном доверии Владимира Сергеевича к своим сотрудникам. Все это создаёт в коллективе уникальную творческую обстановку, способствующую плодотворной работе и достижению высоких научных результатов.

Н. В. Курбатова, В. Г. Никифоров

Валерий Николаевич Лисин. К 70-летию со дня рождения

Нам не дано предугадать,
Как слово наше отзовётся, –
И нам сочувствие даётся,
Как нам даётся благодать…

Ф. Тютчев



Валерий Николаевич Лисин

Валерий Николаевич Лисин родился 7 июня 1946 года в г. Каменка Пензенской области. Каменка основана в начале 18 века в районе древнего каменного брода через реку Атмис на пути из Пензы в Нижний Ломов и Тамбов. Юный Валерий активно участвовал в сборе информации о природе и истории Каменского края.

Валерий Николаевич учился с 1953 года в семилетней школе, а затем с 1960 года в средней школе № 3. Закончил школу в 1964 году с золотой медалью и поступил учиться на физический факультет Казанского государственного университета (КГУ), который окончил в 1969 году по специальности теоретическая физика. По распределению КГУ был направлен в Казанский физико-технический институт (КФТИ) в отдел квантовой акустики (зав. отделом Копвиллем У.Г.) стажёром-исследователем к Хабибуллину Булату Мусовичу и далее работал в том же отделе младшим научным сотрудником, а затем научным сотрудником. В настоящее время работает старшим научным сотрудником в лаборатории нелинейной оптики (зав. лабораторией Самарцев В.В.).

Вначале предметом его исследований была физика поверхностной релаксации спинов электронов проводимости в металлах. По этой теме в 1984 году была защищена кандидатская диссертация. Некоторые результаты этих исследований вошли в книгу В. Ф. Гантмахера по механизмам рассеяния электронов проводимости, а также в американский журнал для учителей. На эти результаты ссылались и продолжают ссылаться до сих пор.

Затем Лисин В.Н. занимался физикой неравновесных фононов, изучением динамики неравновесных терагерцовых фононов в диэлектриках, а также исследованием ряда когерентных эффектов: фазы Берри (вместе с Е. П. Хаймовичем), поляризационных свойств фотонного эха и СИП (самоиндукционная прозрачность) в кристаллах. Им было, в частности, показано, что поляризация фотонного эха является результатом интерференции вкладов в сигнал эха от различных мест расположения оптически активных ионов в матрице кристалла. Этот результат и ряд других также были, вне сомнений, замечены в научной литературе.

Совместно с А. М. Шегедой им были предложены и разработаны новые методы спектроскопических исследований: время-разрешённая фото-фононная спектроскопия и метод биений фотонного эха под действием слабых импульсных магнитных и электрических полей. В актив Лисина В.Н. следует также отнести теорию механизма нагрева баллистических наноконтактов (размер области джоулева нагрева зависит от разности потенциалов, приложенных к наноконтакту).

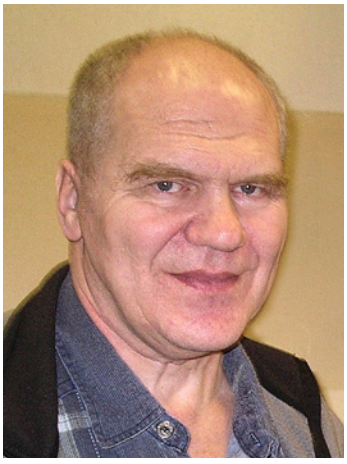
Последнее время основные усилия его научной работы направлены на понимание механизмов влияния внешних постоянных и импульсных магнитных и электрических полей на параметры фотонного эха лазерных примесных кристаллов. Разработан новый метод определения параметров спектроскопического расщепления (g-факторов) основного и возбуждённого состояний рабочих ионов кристаллов и псевдо-Штарковских сдвигов. Предыдущие и эти научные результаты могли бы стать, при желании, основой его докторской диссертации. Валерий Николаевич Лисин за годы работы в КФТИ вырос в одного из самых квалифицированных учёных в институте, которому по плечу решение очень сложных научных задач в областях твёрдотельной магнитной и оптической спектроскопии. Его результатам присуща надёжность, т.е. всегда можно быть уверенным в том, что эти научные результаты верны.

Лисин В.Н. активно участвует в общественной жизни института. Много лет он был председателем месткома (профкома). В настоящее время он является членом Учёного совета, членом библиотечного совета. Совместно с Талановым Ю.И. и Соловаровым Н.К. инициировал создание в институте премии имени Блатта для работников вспомогательных подразделений за доброжелательное отношение к научным работникам и добросовестный многолетний труд.

Активная и творческая его позиция на институтских семинарах и Учёных советах вызывает уважение, а его открытость обезоруживает. Все это, несомненно, свидетельствует, что В. Н. Лисин – честный и талантливый учёный, преданный науке. Мы желаем ему оставаться таким же и в дальнейшем.

В. В. Самарцев, А. А. Калачёв, Р. Н. Шахмуратов, Т. Г. Митрофанова, В. С. Романов, Н. К. Соловаров, А. В. Шкаликов, И. З. Латыпов, К. Р. Каримуллин, Д. Д. Кельина

Григорий Бенционович Тейтельбаум. К 70-летию со дня рождения



Григорий Бенционович Тейтельбаум

Имя Григория Бенционовича Тейтельбаума неразрывно связано с Казанским физико-техническим институтом без малого пятьдесят лет. Выпускник кафедры теоретической физики Казанского университета 1968 года он, теоретик и по образованию, и по складу характера, поступил в отдел Б. М. Козырева на должность лаборанта (с окладом 74 руб. в месяц). Фактически, он стал первым и единственным чистым теоретиком в этом сообществе блестящих экспериментаторов. Благодаря своей широкой эрудиции, прекрасной теоретической подготовке, готовности вникать в суть предлагаемых проблем молодой учёный быстро завоевал уважение среди коллег. В дальнейшем, когда в отделе возник теоретический сектор, возглавляемый А. Р. Кесселем, Григорий Бенционович занял весьма заметное положение и среди теоретиков отдела. Это касалось и выбора тематики его научных работ, и особой манеры выступления на еженедельных семинарах, и участия в околонаучных мероприятиях института. Самостоятельность Г.Б. проявилась даже в том, что он без научного руководителя подготовил и успешно защитил в 1972 г. кандидатскую диссертацию. Темой его исследований были ферми-жидкостные эффекты в неравновесных магнитных явлениях в нормальных металлах.

В последующем научные интересы Григория Бенционовича сосредоточились на изучении критических явлений и фазовых переходов. Им были вычислены критические индексы, описывающие поведение таких физических параметров как ширина линий ЭПР и ЯМР, дано теоретическое описание магнитного резонанса вблизи точки Нееля и низкотемпературные автоколебания намагниченности в антиферромагнетиках.

Г. Б. Тейтельбаум одним из первых учёных физтеха активно включился в исследование природы высокотемпературной сверхпроводимости практически сразу после открытия этого явления в 1986 году. Руководимая им лаборатория выполнила большое число исследований ЭПР и ЯМР в ВТСП купратах, что внесло заметный вклад в понимание природы и механизма формирования страйп-структуры ВТСП материалов. В дальнейшем Григорий Бенционович сосредоточил своё внимание на исследовании свойств новых поколений высокотемпературных сверхпроводников. В тесном сотрудничестве с одним из ведущих специалистов мира в области сверхпроводимости Л. П. Горьковым им было предсказано возникновение солитонной магнитной фазы в ВТСП-соединениях на основе пниктидов железа. Также они показали, что при достаточно высокой степени допирования в структурно однородных ВТСП образцах возникает несоразмерная волна спиновой плотности, которая трансформируется в магнитную фазу с конечной плотностью состояний на уровне Ферми. В этой магнитной фазе возникают особые доменные стенки – солитоны. Анализ большого числа экспериментов показал, что сверхпроводимость в пниктидных соединениях действительно обуславливается возникновением модулированной солитонной структуры. Григорием Бенционовичем получены уравнения, описывающие это новое магнитное состояние. Эта работа была отмечена в числе важнейших достижений РАН в 2010 г.

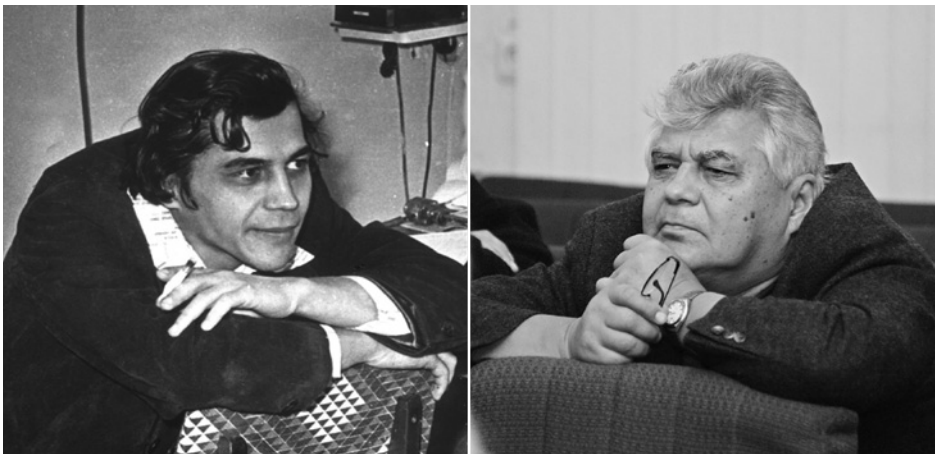
Высокий научный авторитет Тейтельбаума позволяет ему успешно участвовать в научных конкурсах РАН и РФФИ. Возглавляемая им лаборатория в течении многих лет проводит исследования в области физики перспективных материалов, среди которых классические и высокотемпературные сверхпроводники, сильнокоррелированные электронные системы, тонкоплёночные и низкоразмерные магнетики. Его незаурядная эрудиция позволяет ему, теоретику, прекрасно справляться с руководством экспериментальной лабораторией, что предполагает хорошее знание особенностей экспериментальной работы, правильную оценку важности той или иной детали эксперимента, тонкое понимание психологии и межличностных отношений. Лаборатория физики перспективных материалов, которой Григорий Бенционович руководит с 1987 года, постоянно взаимодействует с Казанским университетом. Помимо проведения совместных исследований лаборатория активно участвует в подготовке высококвалифицированных кадров, ежегодно в её состав вливаются 2-3 бакалавра, магистранта или аспиранта. Тейтельбаум по-отечески относится к новичкам, прикладывает много сил для скорейшего становления молодого учёного, всегда готов помочь как научным советом, так и решением организационных вопросов, берет на себя нелёгкую задачу их согласования с институтским начальством. Он читает лекции для аспирантов по физическим основам фазовых переходов, часто выступает с лекциями для молодых учёных в рамках Школы “Актуальные проблемы магнитного резонанса и его применений”, проводимой университетом и физтехом уже 20 лет. В процессе руководства аспирантами Григорий Бенционович старается

привить им навыки самостоятельной научной работы. И это у него получается. Как пример, можно отметить его бывшего аспиранта В. Прудникова, который в настоящее время возглавляет кафедру теоретической физики в Омском государственном университете и уже сам взрастил многочисленных учеников. Кстати, нынешний заместитель директора КФТИ – тоже его (Г.Б.Т.) воспитанник.

Мы нисколько не сомневаемся, что впереди у Григория Бенционовича – ещё долгая, насыщенная творческими победами и не только научными успехами жизнь!

Н. Н. Гарифьянов, В. А. Жихарев, Ю. И. Таланов

Ильгиз Абдулсаматович Гарифуллин. К 70-летию со дня рождения



2 июля 2016 г. исполнилось 70 лет со дня рождения главного научного сотрудника Казанского физико-технического института Гарифуллина Ильгиза Абдулсаматовича.

Выпускник Московского инженерно-физического института, в 1970 он поступил на работу в наш институт и очень быстро стал одним из ведущих экспериментаторов физтеха. Влившись в группу Э. Г. Харахашьяна, он выполнил несколько интересных работ по магнитному резонансу в металлах. Молодой сотрудник Ильгиз Гарифуллин активно участвовал в создании новой в то время для института аппаратуры для резонансных измерений при гелиевых температурах, в разработке оригинальных методик проведения таких экспериментов.

Необходимо отметить, что по-молодому нетерпеливый, он дневал и ночевал в механической мастерской и стеклодувной, лично контролируя каждый шаг в изготовлении деталей для новых криогенных устройств. Он мастерски обращался не только со спектрометрами и криостатами, но и с паяльником и зубилом. Созданные им устройства до сих пор используются в лаборатории, а накопленный им опыт сделал его “гуру” в области низкотемпературных экспериментов. Гарифуллин щедро делится своими знаниями и опытом с молодыми сотрудниками, своими учениками, что в немалой степени способствует их стремительному взлёту на высокий научный уровень.

В начале семидесятых годов прошлого столетия в лаборатории физики металлов возникло новое направление – исследование магнитного резонанса в сверхпроводниках. Лидером экспериментаторов в этой области стал Ильгиз Абдулсаматович. Необходимо отметить, что целый ряд ведущих лабораторий мира в это же время проводили подобные исследования. Однако, первым существенных успехов в данном направлении удалось достичь Гарифуллину. Тесное сотрудничество И. А. Гарифуллина и Э. Г. Харахашьяна с университетскими теоретиками, возглавляемыми Б. И. Кочелаевым, привело к появлению пионерских работ по ЭПР в сверхпроводниках второго рода, получивших международное признание.

И, естественно, открытие в 1986 году высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) не могло оставить Гарифуллина равнодушным. Вместе с коллегами из Института физических проблем и Казанского университета он подключился к исследованию этих материалов. В те годы многие исследователи, которые до этого не имели дело с сверхпроводниками, бросились исследовать ВТСП. И явления, которые были изучены ранее Гарифуллиным для обычных низкотемпературных сверхпроводников, принимались такими исследователями как необычные экзотические свойства, характерные для ВТСП материалов. В отличие от них Гарифуллин, обладая богатейшим опытом изучения сверхпроводников, получил ряд действительно

интересных результатов, среди которых можно отметить, например, обнаружение фазового расслоения в этих соединениях. В 2007 году за исследования сверхпроводников радиоспектроскопическими методами И. А. Гарифуллин вместе с коллегами из физтеха и Казанского университета получил государственную премию Республики Татарстан. Необходимо отметить, что в Институте физических проблем техника эксперимента со времён П. Л. Капицы всегда была на самом высоком уровне. Поэтому в результате сотрудничества с лабораторией Н. Е. Алексеевского появились не только важные научные достижения, но и плодотворное взаимное обогащение экспериментальным опытом. Это заметно повлияло на уровень научных исследований в нашем институте.

В дальнейшем научные интересы Гарифуллина сосредоточились на исследованиях в области одного из наиболее перспективных направлений науки, во многом определяющего современное развитие наноэлектроники и спинтроники, – физики мультислойных структур, состоящих из магнетиков и сверхпроводников. Для приготовления таких наноструктур необходимы сверхвысоковакуумные напылительные установки. Поскольку в нашем институте таких установок нет, то возникла необходимость сотрудничества с немецкими коллегами, успешно использующими такие аппараты. Под пристальным надзором Ильгиза Абдулсаматовича молодые сотрудники нашего института в кратчайшие сроки освоили современную напылительную технику в Бохуме (Германия), достойно внедрились в эту сферу исследований и получили интересные результаты. Экспериментальное наблюдение эффекта близости в тонкоплёночных системах сверхпроводник/ферромагнетик, спинового экранирования на межслоевой границе, переключения тонкоплёночной структуры из нормального в сверхпроводящее состояние и обратно при воздействии на магнитный слой – вот некоторые главные результаты Гарифуллина и его учеников в последние годы. На их основе Ильгизом Абдулсаматовичем с коллегами была предложена конструкция реально работающего сверхпроводящего спинового клапана, ключевого устройства сверхпроводящей спинтроники. Высокий уровень этих исследований был отмечен их включением в Перечень важнейших достижений РАН за 2004, 2005, 2009 и 2012 гг.

И. А. Гарифуллин обладает удивительной научной интуицией, которая позволяет ему предвидеть результаты предстоящих исследований. Он умеет точно оценить перспективность проблемы, корректно сформулировать задачи и наметить стратегические пути их решения. Это привлекает к нему талантливых молодых сотрудников, мечтающих оставить свой след в науке. За долгие годы работы в институте Ильгиз Абдулсаматович взрастил и поставил на ноги многих известных теперь учёных. Среди них Н. Н. Гарифьянов, В. Е. Катаев, П. В. Лексин, Р. И. Салихов и многие другие. Пожелаем ему, чтобы этот список и в дальнейшем успешно пополнялся новыми талантливыми именами!

Н. Н. Гарифьянов, В. А. Жихарев, Ю. И. Таланов

Святослав Яковлевич Хлебников. К 70-летию со дня рождения

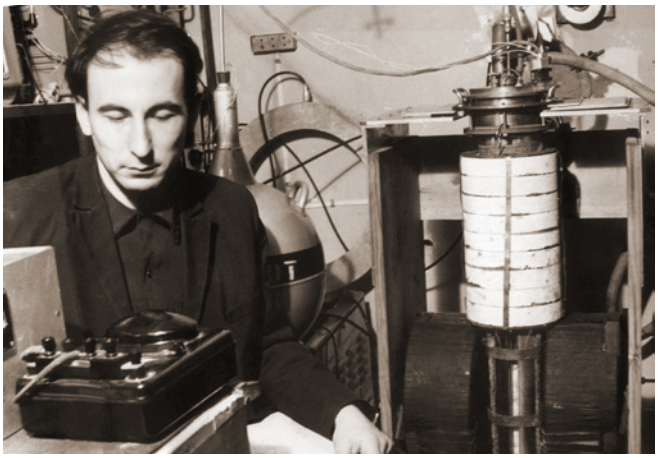
50 лет с институтом



Святослав Яковлевич Хлебников

Святослав Яковлевич Хлебников родился 21 июля 1946 года в деревне Шанары Марпосадского района Чувашской АССР в семье учителя. В 1964 году поступил на вечернее отделение физического факультета Казанского государственного университета. В 1964–65 гг. работал на заводе “Теплоконтроль”, был бойцом Татарского отдельного военизированного горно-спасательного отряда, с мая 1966 года – лаборант Казанского физико-технического института Казанского филиала АН СССР, с 1969 года – старший лаборант, а с сентября 1970 года – младший научный сотрудник КФТИ АН СССР.

Я с ним познакомился 1 апреля 1970 года. В этот день Эдуард Георгиевич Харахашьян открыл мне дверь и впустил в комнату в криогенке на Лобачевского, в которой тогда располагалась его группа физики металлов, куда входила чета Хлебниковых (Тамара и Слава), Фред Черкасов и Таня Альтшулер, сам он туда не вошёл. Что же я увидел, войдя в эту комнату? Осыпавшийся на мелкие части стеклянный криостат (судя по всему, немалых размеров). Через какое-то время



появился хозяин, высокий молодой человек. Оказалось, что это – Слава Хлебников, который стал моим другом на многие годы. Выяснилось, что он до глубокой ночи экспериментировал. Эксперимент заключался в достижении сверхнизких температур методом адиабатического размагничивания. Эксперимент очень тяжёлый и времязатратный. Вскоре был сконструирован и заказан во ВТИНТе (Институт низких температур АН УССР, г. Харьков) криостат для получения температур до 0.35 К, который работал на жидком ^{3}He с откачкой. Откачка осуществлялась опускающимся в область низких температур угольным сорбционным насосом. Это было компактное и оригинальное устройство, очень удобное в работе. Дальше – больше: в Институте физических проблем АН СССР был заказан криостат растворения ^{3}He в ^{4}He. Изготавливал этот аппарат и запускал у нас в институте Крутихин. Его имени я не помню (может быть Володя). Они дружили со Славой многие годы. Это был довольно полный, колоритный и оригинальный человек. Говорил, что живёт он в первом доме от Красной площади. Запущенная им установка позволяла достигать температур на порядок ниже первой – 35 мК. Работать стало намного сложнее и дольше. Теперь в лаборатории была поставлена раскладушка, чтобы можно было прикорнуть во время двух-трёхсуточного эксперимента. В результате этой деятельности Казань стала третьим центром в СССР (после ИФП и ВТИНТа), в котором имелась возможность проводить эксперименты при таких температурах. Таким образом, Святослав Яковлевич стал одним из самых передовых в Советском Союзе криогенщиков.

В 1983 году он защитил кандидатскую диссертацию, посвящённую изучению ЭПР в дифинилпикрилгидразиле (ДФПГ) при сверхнизких температурах. На примере органического радикала ДФПГ были получены решающие результаты, позволившие однозначно установить существование фазового перехода и построить полную фазовую диаграмму состояний. Со своей идеей, отличной от Славиной, в Казань приезжал Вадим Александрович Ацаркин, известный физик из Института радиоэлектроники АН СССР. Целью его приезда являлось получение данных о возможном образовании спинового стекла в разбавленном диэлектрическом парамагнетике за счёт магнитных дипольных взаимодействий между примесными ионами, используя установку С. Я. Хлебникова. Эксперимент закончился публикацией статьи В. А. Ацаркин, В. В. Демидов, С. Я. Хлебников “Признаки дипольного спинового стекла в магнитно-разбавленном диэлектрике CaF^2:Er^{3+}” (Письма в ЖЭТФ **32**, вып. 7, 461–464, 1980).

Интересную совместную деятельность мы замутили и по натрий-вольфрамовым бронзам. Считалось, что сверхпроводимость в этой системе возникает только в образцах с тетрагональной структурой. Надир Гарифьянов научился выращивать кубические монокристаллы с малым содержанием натрия, при котором обычно реализуется тетрагональная структура. При работе со Славой Хлебниковым всегда поражает его обстоятельность и тщательность с которой он подходит к низкотемпературным экспериментам. Кристаллы натрий-вольфрамовых бронз помещались в ячейку с ^{3}He. Надо было видеть, как тщательно Слава проверял герметичность, чтобы не допустить потери редкого и дорогостоящего изотопа ^{3}He. Чтобы достичь низких температур, использовался уже упомянутый выше угольный насос, который плавно опускался в ячейку низкооборотным электромоторчиком. Для регистрации сверхпроводимости использовался генератор на туннельном диоде, привезённый в своё время В. А. Ацаркиным, способный работать непосредственно при низких температурах и выделяющий всего несколько микроватт мощности. В нашей работе (Garif’yanov N.N., Khlebnikov S.Ya., Khlebnikov I.S., Garifullin I.A. “Superconductivity of sodium tungsten bronze with cubic structure”), опубликованной в Czech. Journ. Phys. (**46**, Suppl. S2, 855–856, 1996), мы показали, что структура не имеет отношения к сверхпроводимости, а определяющим является содержание натрия в образцах. Сверхпроводимость в кубических образцах так же как и в тетрагональных, возникала при температурах в нескольких сотен милликельвина. Некоторое время спустя, мы совместно со Славой поставили жирную точку в работе по изучению так называемой “возвратной” сверхпроводимости в слоистой тонкоплёночной системе V/Fe (Garifullin I.A., Tikhonov D.A., Garif’yanov N.N., Lazar L., Goryunov Yu.V., Khlebnikov S.Ya., Tagirov L.R., Westerholt K., Zabel H. “Re-entrant superconductivity in the superconductor/ferromagnet V/Fe layered system” (Phys. Rev. B, Vol. 66, 020505(R), P. 1–4, 2002). Эксперименты, проведённые до 0.35 К, показали, что температура сверхпроводящего перехода T_c в слоистых тонкоплёночных образцах V/Fe в зависимости от толщины слоя железа ведёт себя необычным образом. При малых толщинах слоя железа T_c сначала резко уменьшается до температур ниже 0.35 К, сверхпроводимость пропадает, а затем восстанавливается, температура сверхпроводящего перехода увеличивается и выходит на плато. Эксперименты в ^{3}He явились ключевыми для демонстрации возвратной сверхпроводимости в этой системе. К сожалению, продолжить все эти исследования (особенно в натрий-вольфрамовых



бронзах) у нас не хватило времени. В последующем мы не смогли найти задачу по нашей тематике, в которой были бы необходимы сверхнизкие температуры.

Экспериментальное мастерство Слава применял не только для решения фундаментальных задач, но и в реальной жизни. В девяностых годах к нам обратились за помощью из ветеринарного института. Фамилия человека, по-моему, была Пронин. Он был доцентом, фанатом в своём деле. У них были проблемы с замораживанием биоматериалов племенных быков, что было необходимо для создания банков долговременного хранения таких материалов. Замораживание проводилось путём непосредственного окунания контейнера в жидкий азот. Оказалось, что после размораживания выживало всего несколько процентов биоматериала. Слава и здесь показал себя замечательным специалистом. Он разработал методику ступенчатого замораживания. Им был изготовлен азотный криостат с необходимым градиентом температуры по высоте, в который моторчиком опускается на нитке контейнер с биоматериалом. В результате ему удалось добиться в несколько раз большей выживаемости биоматериала. Однако, к сожалению, (как и во многих таких случаях в нашей стране) дальше нескольких экспериментов дело не продвинулось, поскольку заказчики из ветинститута потеряли интерес ввиду отсутствия финансирования.

Гелиевой станцией до 1992 года руководил Виктор Михайлович Пименов, уважаемый специалист в области техники низких температур и очень хороший человек. Ввиду износа оборудования и постоянной необходимости его починки, его усилий стало не хватать для поддержания в порядке криогенной станции. Наступила критическая ситуация. При обсуждении этой проблемы в нашей лаборатории, которая больше всех нуждалась в низких температурах, Григорий Бенционович Тейтельбаум сказал, что спасти наш институт может только С. Я. Хлебников. Аргументы: он – опытный криогенщик, хорошо разбирается в вакуумной и криогенной технике, виртуоз в вакуумной пайке. Оставалось уговорить его занять место начальника гелиевой станции. И это удалось Григорию Бенционовичу. Победила преданность Славы институту и желание помочь ему. С тех пор институт практически не знает больших проблем с гелием.

Слава – хороший семьянин, души не чает в своей жене – Тамаре. Вырастил трёх сыновей – Сашу, Игоря и Вову. Игорь некоторое время работал в нашем институте, Володя работает до сих пор.

Все знают Святослава Яковлевича как главного в Казани криогенщика и человека, способного привести в порядок любое криогенное оборудование, будь то импортное или отечественное.

Святослав Яковлевич занимается и педагогической деятельностью: студенты Казанского государственного технического университета слушают курс “Основы криогенной техники”. Жаль, что этот курс не посещают студенты и аспиранты нашего института. Пять выпускников КГТУ выполнили дипломные проекты по криогенной и вакуумной технике под его руководством.

Хлебников С.Я. прошёл путь от лаборанта до старшего научного сотрудника и далее до заведующего отделом криогенной техники.

Долгих лет тебе, Слава. Мы любим тебя. Главное, не бросай работу. Нам будет плохо без тебя.

И. А. Гарифуллин, Н. Н. Гарифьянов

Анатолий Михайлович Шегеда. К 70-летию со дня рождения

Талантливый человек – талантлив во всём!
Пословица



Анатолий Михайлович Шегеда

Шегеда Анатолий Михайлович родился 26 августа 1946 года в городе Борисоглебске Воронежской области в семье военнослужащего. Детство он провёл на Украине и в 1964 году закончил 11 классов средней школы в городе Староконстантинове Хмельницкой области. В том же году он поступил на физический факультет КГУ, который закончил в 1969 году по специальности теория относительности и гравитации. После окончания КГУ А. М. Шегеда был принят стажёром-исследователем в Казанский физико-технический институт в отдел квантовой акустики, который возглавлял Уно Херманович Копвиллем. Его научным руководителем стала Ирина Андреевна Нагибарова и первые его публикации были посвящены теории нерезонансной миграции энергии в кристаллах. Анатолий с детства увлекался радиотехникой, поэтому, когда возникла идея поставить какие-то эксперименты по миграции энергии, он с удовольствием подключился к работе экспериментаторов (В. А. Пирожков, Р. Г. Усманов, В. Г. Торопов) в к. 34 здания КФТИ на ул. Лобачевского. Там он предложил конструкцию и собрал низкотемпературный рубиновый лазер, необходимый для наблюдения фотонного эха. В 1973 г. А. М. Шегеда поступил в аспирантуру Казанского государственного педагогического института (КГПИ), куда его пригласил Вилен Романович Нагибаров, перешедший работать в КГПИ проректором по науке. На физико-математическом факультете КГПИ с нуля начала создаваться оптическая лаборатория, но последовавший вскоре отъезд Вилена Романовича в Минск привел, фактически, к прекращению всякого финансирования и, впоследствии, к закрытию лаборатории. Однако, одна опубликованная экспериментальная работа с участием А. М. Шегеды в это время всё же была сделана. В КГПИ Шегеда собрал новую, более совершенную конструкцию рубинового лазера, работающего при азотных температурах. Это позволило в к. 31 КФТИ, в соавторстве с В. А. Пирожковым, Н. К. Соловаровым и Н. Н. Куркиным наблюдать необычное поведение фотонного эха в рубине в сильных (~10 кЭ) поперечных магнитных полях.

В 1978 г. у Шегеды появилась возможность вернуться в КФТИ в группу Булата Мусовича Хабибуллина в тот же отдел квантовой акустики, которым руководил уже Вадим Алексеевич Голенищев-Кутузов. Там ему было предложено заняться экспериментами с неравновесными фононами высоких энергий (тепловыми фононами). Здесь же началось его многолетнее сотрудничество с Валерием Николаевичем Лисиным. К этому времени у Шегеды накопилось достаточно много публикаций по нерезонансной миграции энергии в твёрдых телах, но вопрос о защите диссертации на эту тему им даже не рассматривался. Он с энтузиазмом занялся совершенно новой темой. Была освоена техника напыления тонких плёнок и сверхпроводниковых болометров с временным разрешением ~20 нс, способных регистрировать изменение температуры $\Delta T \sim 10^{-6}$ K, изучено распространение высокочастотных фононов в большом числе полупроводниковых и диэлектрических образцов, рассмотрены нестационарные процессы, возникающие на границе образца с жидким гелием. Его руководителя, Булата Мусовича, всегда увлекал только сам процесс научного поиска. Как правило, перед учениками он никогда не ставил вопрос о защите диссертаций. Через какое-то время в дело вмешался В. А. Голенищев-Кутузов. Он в ультимативной форме потребовал от Шегеды прекратить всякие измерения и сесть за написание диссертации. В 1988 г. им была защищена кандидатская диссертация на тему распространения неравновесных тепловых фононов в кристаллах $Y_3Al_5O_{12}$ и нестационарной теплопередачи в жидкий гелий. После защиты диссертации появилась возможность продолжить эксперименты, объединяющие метод тепловых импульсов и фотонного эха, и изучить влияние импульсов неравновесных баллистических фононов на спектроскопические свойства кристаллов. Совместно с В. Н. Лисиным им было показано, что импульсы некогерентных баллистических фононов могут приводить к псевдоштарковскому сдвигу резонансных оптических линий в рубине. Затем им было показано в целом ряде кристаллов, что возбуждение оптических переходов, как правило, сопровождается излучением неравновесных фононов и оптические спектры пропускания можно регистрировать с помощью сверхпроводникового болометра, получая при этом новую информацию, недоступную при обычных спектроскопических измерениях. На эту тему совместно с В. Н. Лисиным был опубликован цикл работ с общим названием “Фото-фононная спектроскопия”.

В настоящее время Анатолий Михайлович работает старшим научным сотрудником лаборатории нелинейной оптики, руководимой Виталием Владимировичем Самар-

цевым. Многочисленные усилители и генераторы, узлы и блоки для автоматизации эксперимента собраны его руками. Последнее время он занимается экспериментами по влиянию наносекундных магнитных и электрических импульсов на поведение фотонного эха в кристаллах. Был найден новый метод определения зеемановского (псевдоштарковского) расщепления оптических линий по биениям сигналов фотонного эха и совместно с В. Н. Лисиным и В. В. Самарцевым опубликован ряд статей по новым спектроскопическим возможностям метода фотонного эха. Работы с его участием неоднократно занимали призовые места на итоговых конференциях КФТИ.

Анатолий Михайлович отличается хорошим чувством юмора. Своим друзьям и коллегам он написал множество шутливых строчек, посвящённым разным событиям. Когда в институте возникла идея создания юбилейного буклета, К. М. Салихов попросил статьи в буклет писать так, чтобы, в первом приближении, их мог понять любой читатель, далёкий от физики. Шегеда тут же откликнулся таким вариантом статьи для буклета: “Определение сдвигов частот оптических переходов под действием импульсных возмущений по форме сигнала фотонного эха”.

* * *

В неком царстве небогатом
Квантовый жил генератор.
Жена – линия задержки.
От жены хотел поддержки,
Но стучатся в дверь болячки,
Стержень требует накачки,
В общем, как он ни крутился,
Стол, скамья – всё, чем разжился!
Как-то в спальню постучал,
Без жены, мол, одичал,
А та утром заявила:
“У тебя теперь два сына,
Наш дворец ужасно тесен,
Их пристрой уж, будь любезен!
И так хмуро не смотри,
Лучше зеркала протри!”
Первый импульс слабоват,
И пожить бы в доме рад,
Но отец суров и строг:
“Вот те Бог, а вот порог!
А на нас не обижайся,
Прыгай, бегай, отражайся!”
1-ый импульс:
В зазеркалье импульс рыщет
И себе невесту ищет.
Вот наткнулся, наконец,
На рубиновый дворец,
Где живёт принцесса ЭХО:
“Мне здесь фильтры не помеха!
ЭХО, свет мой, отзовись,
Хоть в окошко покажись!
Говорят, что ты пригожа,
Вся на Гаусса похожа!”
Тут окошко приоткрылось,
И на голову свалилась,
Задний фронт ему сминая,
Красна-девица другая,
Что индукцией зовётся.
Обнимает и клянётся
Не расстаться с ним вовек!
Импульс, что, не человек?
Молча посадил девицу
На больную поясницу,
От дворца умчался прочь
И забыл с ней всё в ту ночь!
2-ой импульс:
Быстро время пролетело,
Старший брат взялся на дело.
Он силён, он выше вдвое:
“ЭХО, я ведь за тобою!
Долго ждать я не желаю,
“НЕТ!” – ответ не принимаю,
Юстировкой дверь открою
И войду в твои покои,
Рассчитаюсь там за братца!”
ЭХО:
“Погоди! Дай мне собраться!
Надо ж вещи уложить,
Прежде, чем с тобою жить!”
Только дверцу приоткрыла,
Вдруг, ей-бо! Свиное Рыло
Нагло влезло на порог:
“Я теперь твой Царь и Бог!”
Раскосматило невесту,
Нет на ней живого места,
Когда вышла наконец…
Кто ж пойдёт с ней под венец?!
Ну на что она годится?!

Тут не будем торопиться,
Да, попала в переплёт,
Но ведь ЗНАНИЕ несёт!
Есть по физике вопросы? –
Глянь в растрёпанные косы!

К этим стихам грех прикасаться, как и ко многим другим его строчкам, вошедшим в ряд изданий. Анатолий Михайлович всегда готов прийти на помощь молодым исследователям (например, Андрею Шкаликову или Камилю Каримуллину) в проведение научных работ. Вспомним, для примера, эксперименты по фотонному эху в корунде, активированном трёхвалентными ионами изотопа Cr^{53}, или эксперименты по некогерентному фотонному эху в кристалле $Y_3Al_5O_{12}$, активированном высоким содержанием трёхвалентного тулия. Во всех этих работах мастерство и изобретательность Шегеды проявились во всей своей красе. Поражает его доброта и стремление помочь друзьям и знакомым. На наш взгляд Анатолий Михайлович Шегеда прожил свои первые 70 лет честным и талантливым человеком. Остаётся пожелать ему прожить оставшиеся годы в добром здравии и при прекрасном уме.

В. В. Самарцев, А. А. Калачёв, В. Н. Лисин, Р. Н. Шахмуратов, Т. Г. Митрофанова, В. С. Романов, А. В. Шкаликов, И. З. Латыпов, Н. К. Соловаров, Д. Д. Кельина, К. Р. Каримуллин

Рустэм Махмудович Баязитов. К 70-летию со дня рождения



Рустэм Махмудович Баязитов

2016 год стал годом юбилея доктора физико-математических наук, заслуженного деятеля науки РТ, лауреата государственной премии СССР в области науки и техники Рустэма Махмудовича Баязитова.

Трудовой путь Рустэм Махмудович начинал с 16 лет слесарем на Казанском авиационном заводе, затем инженером конструкторского бюро. После выполнения дипломной работы в стенах физтеха и окончания вечернего отделения физфака КГУ, он был приглашён в Казанский физико-технический институт для сборки, наладки и запуска ионно-лучевого ускорителя ИЛУ-3, до сих пор успешно работающего в институте. Им был получен первый пучок ионов в 1972 году и с этого момента в институте развернулись широкомасштабные исследования по влиянию ионной имплантации на самые разнообразные свойства различных материалов, в первую очередь полупроводников. Выражаясь современным языком, он является одним из основоположников казанской школы по ионной имплантации, которая известна, уважаема и общепризнана по всему миру. Его пионерские работы по влиянию импульсного лазерного излучения на имплантированные слои кремния и германия привели к открытию явления импульсной ориентированной кристаллизации твёрдых тел, за что ему и его коллегам в 1988 году была присуждена Государственная премия СССР в области науки и техники. Совсем недавно он был приглашён в США, где ему и его коллегам по основополагающим работам в данной области (И. Б. Хайбуллину, Р. И. Баталову, Я. В. Фаттахову, М. Ф. Галяутдинову) была присуждена Международная премия им. Дж. Гиббонса от Института инженеров электротехники и электроники (IEEE) “С признанием их вклада в технологию лазерного отжига”. Таким образом, казанские учёные прошли славный путь от открытия физического явления до его широкомасштабного внедрения в технологию производства современной микроэлектроники! Об этом свидетельствует также недавно вышедшая обширная статья Баязитова Р.М. в Большой Российской энциклопедии, где под термином “лазерный отжиг” указано, что метод предложен Казанским физико-техническим институтом. Этим наш институт может гордиться!

Подбором кадров и направлениями исследований в области ионной имплантации после запуска ионного ускорителя занимался И. Б. Хайбуллин, которому удалось сформировать очень сплочённый коллектив, объединённый не только общей тематикой исследований, но и чисто человеческими отношениями. И здесь Рустэм Махмудович был одним из центров притяжения благодаря его доброжелательности, общительности, глубоким знаниям и отсутствию каких-то гиперамбиций. Я всегда относился и отношусь к нему как к старшему товарищу, с которым можно спокойно обсудить иногда весьма острые проблемы лаборатории или отдела.

Многим в институте известны наши “семинары”, которые организуются по всяким значимым и мало-



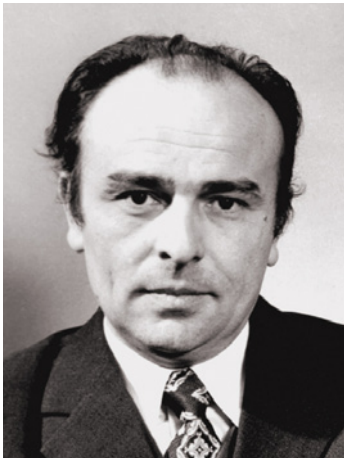
Группа ионной имплантации (1982 г., не все!)): 1-й ряд: Я. Фаттахов, И. Хайбуллин, Р. Баязитов; 2-й ряд: И. Илалтдинов, В. Нуждин, Г. Закиров, В. Петухов.

значимым поводам, где собирается очень много сотрудников не только нашего отдела, но и других, и даже приходят бывшие сотрудники лаборатории – тянет их в наш коллектив! При этом Рустэм Махмудович частенько весьма зажигательно и эмоционально играет и поёт под гитару – есть ещё порох в пороховнице!

Коллеги по работе и все сотрудники института желают Рустэму Махмудовичу здоровья, дальнейших успехов в науке, удачи и многих лет жизни!

И. А. Файзрахманов

Памяти Максута Мухамедзяновича Зарипова



Максут Мухамедзянович Зарипов (08.09.1929–24.12.2016)

24 декабря 2016 года на 88-ом году жизни скончался известный учёный-физик, выдающийся специалист в области парамагнитного резонанса в твёрдых телах, известный организатор науки, талантливый педагог, наш учитель – Максут Мухамедзянович Зарипов.

Максут Мухамедзянович родился 8 сентября 1929 года в г. Подольске Московской области. В 1941 году вместе с родителями он был эвакуирован в г. Казань, где окончил среднюю школу и поступил на дневное отделение физико-математического факультета Казанского государственного университета. Здесь с первых дней студент Зарипов привлёк внимание преподавателей своей организованностью и любознательностью. Несмотря на то, что много времени отдавал участию в общественных мероприятиях физико-математического факультета КГУ, он учился на “отлично”. Поэтому уже на третьем курсе университета он стал именным стипендиатом. В 1951 году он женился на Сание Галимулловне Шариповой, с которой они прожили вместе 65 лет. В 1952 году, после окончания университета с отличием, М. М. Зарипов был рекомендован своей кафедрой в аспирантуру. Его научным руководителем стал профессор Семён Александрович Альтшулер. С момента поступления в аспирантуру М. М. Зарипов стал активным участником процесса становления казанской школы магнитного резонанса, основанной Е. К. Завойским, С. А. Альтшулером и Б. М. Козыревым. В его кандидатской диссерта-

ции, выполненной под руководством С. А. Альтшулера на тему “К теории тонкой и сверхтонкой структуры спектров парамагнитного резонанса”, были заложены основы теории магнитного резонанса в специальном классе веществ, впоследствии получивших название ван-флековских парамагнетиков.

После защиты кандидатской диссертации М. М. Зарипов возглавил группу физиков-экспериментаторов, занимавшихся систематическими исследованиями спектров электронного парамагнитного резонанса в кристаллах, содержащих парамагнитные ионы группы железа. Одним из важнейших результатов этих исследований явилось установление общих закономерностей взаимодействия парамагнитного иона с кристаллической решёткой и доказательство высокой информативности спектров электронного парамагнитного резонанса. Последнее явилось стимулом для широкого внедрения метода ЭПР в кристаллохимию и геохимию и позволило в течение относительно небольшого периода времени получить ценную информацию о структуре и свойствах большого числа минералов с различными парамагнитными примесями. Значительный шаг в развитии метода ЭПР был сделан М. М. Зариповым и Ю. Я. Шамониным в 1956 году, когда им впервые удалось наблюдать и интерпретировать тонкую структуру спектра ЭПР трёхвалентного хрома в рубине. Эти исследования привели к тому, что рубин стал одним из важнейших материалов квантовой электроники. Несколько позже М. М. Зарипов в сотрудничестве с Н. С. Гарифьяновым и Б. М. Козыревым впервые определил фундаментальные характеристики ядра ^{57}Fe и его спиновый момент. Формулировке основных приёмов расшифровки спектров и анализу возможностей ЭПР была посвящена докторская диссертация Максута Мухамедзяновича “Исследование спектров ЭПР в кристаллах”, которую он защитил в 1966 году.

Одновременно с научными исследованиями М. М. Зарипов занимался также педагогической и организационной деятельностью. В период с 1953 года по 1971 год он работал в КГУ на должностях ассистента, доцента, заместителя декана и профессора. В 1963 году он возглавил вновь созданную кафедру квантовой электроники и радиоспектроскопии, где читал ключевой для этой кафедры курс лекций “Основы теории спектров электронного парамагнитного резонанса”. С 1968 г. по 1971 г. он являлся деканом физического факультета КГУ.

Под руководством Максута Мухамедзяновича в 1967 году создан, впервые в СССР, спектрометр двойного электронно-ядерного резонанса (ДЭЯР) и были выполнены систематические исследования механизмов электронно-ядерных взаимодействий между парамагнитными ионами переходных групп железа и редких земель и их лигандами в кристаллах изоструктурных рядов перовскита и флюорита. В результате были получены новые фундаментальные знания о физике примесных кристаллов, которые оказались важными для решения прикладных задач, связанных с описанием оптических, магнитных и электрических характеристик кристаллов с парамагнитными примесями.

В 1971 году, не прекращая чтения лекций в Казанском государственном университете, Максут Мухамедзянович становится заведующим лабораторией физики твёрдого тела в Казанском физико-техническом институте (КФТИ) Казанского филиала Академии наук СССР. В 1972 г. он назначается директором КФТИ, и работает в этой должности до 1988 г. В период с 1972 г. по 1982 г. Максут Мухамедзянович является также председателем Президиума Казанского филиала АН СССР.

Период его работы в КФТИ был ознаменован новыми научными достижениями. За работы, результатом которых оказалось открытие в 1973 году эффекта «лазерного отжига», представляющего собой рекристаллизацию поверхностного слоя имплантированного полупроводника под действием мощного лазерного облучения и приведшего к технологической революции в производстве полупроводниковых приборов, он вместе с коллективом соавторов был удостоен Государственной премии СССР в области науки и техники в 1988 году.

Новые важные результаты были получены М. М. Зариповым с сотрудниками в области вибронных взаимодействий в твёрдых телах. Методами ЭПР и ДЭЯР были изучены примесные ян-теллеровские комплексы d-ионов, синтезированные в кристаллах структурной группы флюорита и находящиеся в вырожденных основных орбитальных состояниях. Выявлены важные для теории вибронных взаимодействий закономерности и открыты новые механизмы взаимодействия.

Но Максут Мухамедзянович запомнился сотрудникам КФТИ не только как учёный, но и как прекрасный организатор. В центре его внимания всегда были и вопросы материально-технического обеспечения научных исследований, проводимых в институте. Например, в начале своей деятельности на посту директора КФТИ он столкнулся с проблемой повышения производительности парка электронно-вычислительных машин. Понимая важность решения этой проблемы, Максут Мухамедзянович постоянно добивался выделения институту наиболее мощных на то время ЭВМ: в 1973 году – машину М-222, затем в 1980 году – машину ЕС-1033, позже – машины ЕС-1045 и ЕС-1046. Постоянным предметом его забот также была группа криогенной техники. Им были организованы получение и монтаж гелиевой ожижительной станции, азотной станции, обеспечение экспериментальной мастерской современным оборудованием.

До настоящего времени особенно много благодарных слов в адрес Максута Мухамедзяновича произносится в коллективе КФТИ по поводу организованной им базы летнего отдыха “Голубой залив”. Этот вопрос был поднят сотрудниками КФТИ в 1973 году, поскольку в то время дачами или садовыми участками могли похвастаться лишь небольшое число сотрудников, а дома отдыха или санатории были летом практически недоступны. Поэтому организация места летнего отдыха была важной задачей. Максут Мухамедзянович, будучи мудрым руководителем,

глубоко понимал это и, несмотря на очевидные препятствия, связанные с жёсткой регламентацией финансовых расходов института, взялся за решение данной проблемы. До сих пор старейшие сотрудники КФТИ считают, что здесь Максут Мухамедзянович проявил настоящее мужество, поскольку использование нетрадиционных путей решения возникшей проблемы грозило ему крупными неприятностями. В результате в течение 1973–1974 годов база отдыха была построена, а Максут Мухамедзянович получил строгое партийное взыскание.

Все годы своей жизни, начиная с аспирантуры в КГУ, Максут Мухамедзянович отдавал немалую часть своих сил преподавательской деятельности. Наиболее важная часть этой деятельности – чтение курса лекций “Основы теории спектров электронного парамагнитного резонанса” в течении 40 с лишним лет студентам, магистрантам и аспирантам Казанского государственного университета. Учебник, написанный по материалам этих лекций, был опубликован в 2009 году в издательстве Казанского университета. Неоднократно Максут Мухамедзянович организовывал лекции по теории спектров ЭПР и для сотрудников КФТИ.

Результаты научной деятельности Максута Мухамедзяновича опубликованы в более чем двухстах статьях в ведущих российских и зарубежных физических журналах. Под его руководством защищены 31 кандидатская диссертация, подготовлено одиннадцать докторов наук. С 1988 г. по 2016 г. Максут Мухамедзянович работал на должностях главного научного сотрудника лаборатории радиоспектроскопии диэлектриков КФТИ и профессора кафедры квантовой электроники и радиоспектроскопии Казанского государственного университета. Он являлся член-корреспондентом Академии наук Республики Татарстан с момента её создания в 1992 году, принимал активное участие в работе республиканской Академии в качестве члена научного совета Академии наук РТ по физике. Научные достижения Максута Мухамедзяновича были отмечены государственными наградами: орденом Трудового Красного Знамени, почётными грамотами и медалями. Ему были присвоены почётные звания: “Заслуженный профессор Казанского университета”, “Заслуженный деятель науки Татарской АССР” и “Заслуженный деятель науки Российской Федерации”.

Уход Максута Мухамедзяновича из жизни является для всех нас, его учеников, невосполнимой потерей. Мы всегда будем благодарны ему за всё, что он сделал для нас как учитель и как неравнодушный человек.

В. Ф. Тарасов, В. А. Уланов, Р. М. Ерёмина,
М. Л. Фалин, Г. С. Шакуров

НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Выездная научная сессия Отделения физических наук, посвящённая 70-летию КФТИ

4 февраля 2016 года, в рамках празднования юбилея КФТИ, состоялась выездная сессия Отделения физических наук (ОФН) РАН. Учёные из Москвы, Н.-Новгорода, С.-Петербурга, Троицка, Черноголовки и Казани представили доклады:

- Демишев С.В. (Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН): Квантовые фазовые переходы в спиральных магнетиках без центра инверсии.
- Смирнов А.И. (Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН): Магнитный резонанс спинонов в квантовых магнетиках.
- Рязанов В.В. (Институт физики твёрдого тела РАН): Когерентные и неравновесные явления в структурах на основе сверхпроводников и ферромагнетиков.
- Мельников А.С. (Институт физики микроструктур РАН): Механизмы дальнедействующего эффекта близости в сверхпроводящей спинтронике.
- Фельдман Э.Б. (Институт проблем химической физики РАН). Парадоксы ряда Магнуса при исследовании равновесной намагниченности и запутанности в многоимпульсном спиновом локинге.
- Фраерман А.А. (Институт физики микроструктур РАН): Особенности движения частиц со спином 1/2 в некомпланарном магнитном поле.
- Салихов К.М. (КФТИ КазНЦ РАН): О развитии перспективных применений ЭПР в КФТИ.
- Виноградов Е.А. (Институт спектроскопии РАН). Характеризация ультратонких плёнок методом спектроскопии поверхностных поляритонов в ближнем поле.
- Глявин М.Ю. (Институт прикладной физики РАН): Источники мощного терагерцового излучения для спектроскопии и диагностики различных сред.
- Солтамов В.А., Баранов П.Г. (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН): Радиоспектроскопия оптически выстроенных спиновых состояний центров окраски в карбиде кремния.



А. А. Фраерман (Институт физики микроструктур РАН) делает доклад об особенностях движения частиц со спином 1/2 в некомпланарном магнитном поле.



Член-корр. РАН Е. А. Виноградов (Институт спектроскопии РАН) представляет свои результаты.

- Калачёв А.А. (КФТИ КазНЦ РАН): Дальнодействующая квантовая связь. Базовые устройства и перспективы развития.
- Кузнецов Д. (ООО "Брукер"): Последние достижения Bruker в области магнитно-резонансного оборудования.

Кроме докладчиков в Казань для участия в заседании приехали заместитель академика-секретаря, член-корреспондент РАН Кведер Виталий Владимирович, начальник отдела, заместитель академика-секретаря ОФН РАН по научно-организационной работе, д.ф.-м.н. Истомина Наталья Леонидовна, зам. директора Института спектроскопии РАН, д.ф.-м.н. Наумов Андрей Витальевич.

Все доклады вызвали большой интерес. Представители журнала "Успехи физических наук" приняли решение опубликовать все доклады в журнале УФН.

Репортаж с празднования 70-летия КФТИ

5 февраля 2016 года в Академии наук РТ состоялось торжественное заседание, посвящённое Дню российской науки и юбилею КФТИ. В зале присутствовали представители правительства РТ, представители Российской академии наук, научная общественность города Казани, гости из Москвы, Черноголовки, Нижнего Новгорода и Санкт-Петербурга. От Правительства РТ выступил заместитель премьер-министра РТ Шайхразиев Василь Габтелгаязович. Поздравляя всё научное сообщество республики с праздником, он особо остановился на достижениях и успехах Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского. За достигнутые успехи и в связи с 70-летием институт был награждён Благодарственным письмом Президента Республики Татарстан.

Благодарностями Президента были отмечены и сотрудники института: Р. Р. Гусева, главный бухгалтер института, Л. В. Мосина, ведущий научный редактор, и С. Я. Хлебников, заведующий отделом криогенной техники. Звания "Заслуженный деятель науки РТ" были присвоены д.ф.-м.н. А. А. Калачёву и д.ф.-м.н. Р. Н. Шахмуратову.

Президент АН РТ М. Х. Салахов и ректор Казанского федерального университета И. Р. Гафуров поздравили всех присутствующих с Днём науки, а физтеховцев с 70-летием института.

Об основных этапах развития и становления Казанского физико-технического института, о сегодняшнем дне института рассказал временно исполняющий обязанности директора А. А. Калачёв.

От имени отделения физических наук Российской академии наук КФТИ поздравила заместитель академика-секретаря ОФН РАН д.ф.-м.н. Н. Л. Истомина.



Начальник отдела, заместитель академика-секретаря ОФН РАН, д.ф.-м.н. Наталья Леонидовна Истомина поздравила КФТИ от имени Российской академии наук.



Благодарность Президента РТ вручается Л. В. Мосиной.



Поздравление от коллег из ИОФХ им. А. Е. Арбузова.

Самолёт от коллег из КБ им. М. П. Симонова.



Физтех поздравляет Институт физики КФУ.



Поздравить физтех с юбилеем пришли и наши коллеги из ИОФХ им. А. Е. Арбузова во главе с директором, академиком О. Г. Синяшиным.

Праздник продолжался в неформальной обстановке. Ляйле Васильевне Мосиной выпала честь вести эту часть праздника. Физтех принимал поздравления от Казанского института биохимии и биофизики, Института механики и машиностроения, Института физики твёрдого тела РАН, Института спектроскопии РАН, Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Поволжского государственного технологического университета, КБ им. М. П. Симонова и многих коллег и друзей физтеха. Институт физики КФУ пришёл поздравить физтех большим составом, что было очень приятно.

Некоторые поздравления, поступившие в адрес института, приведены ниже.

70 лет для института – это много или мало? Вопрос остался открытым. Для института главное не количество лет, а качество работ. Гости отмечали высокий уровень научных исследований. Это самое главное.

Выступление А. А. Калачёва на торжественном заседании 5 февраля 2016 года

Уважаемые коллеги, дорогие друзья!

Прежде всего, я хочу поздравить всех присутствующих с наступающим днём российской науки. Сегодня в этом зале собрались представители самых разных организаций: Отделения физических наук, институтов Казанского научного центра, Академии наук РТ, вузов Казани, а также предприятий, так или иначе использующих наукоёмкие технологии. Здесь присутствуют гости из академических институтов и вузов других городов России. Я желаю всем успехов, плодотворного сотрудничества и сохранения единства в этом многообразии.

И, конечно, мы с большой радостью отмечаем сегодня 70-летний юбилей нашего института. В своём докладе я бы хотел рассказать о его славной истории, достижениях сегодняшнего дня и планах на будущее.

Созданный в тяжёлые послевоенные годы, наш институт внёс существенный вклад в развитие отечественной науки и может гордиться целой плеядой выдающихся учёных, трудившихся в его стенах. Заслуженным итогом научной деятельности нескольких поколений сотрудников физтеха стало признание нашего института одним из ведущих мировых брендов в области радиоспектроскопии и применения радиоспектроскопических методов в различных областях науки и техники. Начну с самого начала, с момента создания института.

Концепция создания КФАН СССР начала формироваться во время Великой отечественной войны, когда казанские учёные плечом к плечу работали с сотрудниками эвакуированных в Казань институтов АН СССР. 13 апреля 1945 года Совет Народных Комиссаров СССР постановил создать Казанский филиал академии, состав которого был определён Постановлением Президиума АН СССР от 28 августа 1945 года. Среди 5 институтов филиала был и ФТИ. В январе-феврале были сформированы структура ФТИ и первое штатное расписание. Сектор физики – это как раз та клеточка, из которой вырос современный КФТИ. Уже тогда наметились основные направления деятельности института: фундаментальные исследования, прикладные разработки и научно-образовательная деятельность.

Первым директором института был назначен Николай Григорьевич Чеботарёв. С 1946 по 1972 годы институт возглавлял Хамид Музафарович Муштари, а с 1972 по 1988 – Максут Мухамедзянович Зарипов.

Становление и развитие физических исследований в КФТИ неразрывно связано с именами трёх выдающихся физиков: Семёна Александровича Альшуллера, Евгения Константиновача Завойского и Бориса Михайловича Козырева – основателей казанской школы радиоспектроскопии. Основные достижения института в годы его становления связаны с явлением ЭПР, которое было открыто Е. К. Завойским в 1944 году. В 1947 году Евгений Константинович переехал в Москву, а работы по радиоспектроскопии в КФТИ возглавил Б. М. Козырев. С участием Бориса Михайловича был получен ряд важных результатов в этой области: 1947 г. – первое наблюдение ЭПР в свободных радикалах (Б. М. Козырев, С. Г. Салихов); 1948 г. – обнаружение проявления сверхтонкого взаимодействия в спектрах ЭПР (С. А. Альтшулер, Б. М. Козырев, С. Г. Салихов); 1959 г. – определение спина ядра изотопа Fe-57 (Б. М. Козырев, Н. С. Гарифьянов, М. М. Зарипов); 1960 г. – первое наблюдение ЭПР в щелочных металлах (Б. М. Козырев, Н. С. Гарифьянов, М. М. Зарипов).

Разумеется, открытия совершались не только в области ЭПР. Хотелось бы отметить такие значимые достижения как: предсказание эффекта светового эха (У. Х. Копвиллем, В. Р. Нагибаров) и обнаружение эффекта нерезонансного поглощения ультразвука системой электронных спинов (В. А. Голенищев-Кутузов) – 1962 г.; открытие явления электроакустического эха в пьезоэлектрических кристаллах (А. Р. Кессель, И. А. Сафин) – 1970 г.; первое наблюдение электронного спинового резонанса в сверхпроводниках и спинового эха на электронах проводимости (Э. Г. Харахашьян, И. А. Гарифуллин, Ф. Г. Черкасов и др.) – 1972 г.; открытие явления импульсной рекристаллизации разупорядоченных полупроводников (лазерный отжиг) (И. Б. Хайбуллин, Е. И. Штырков, М. М. Зарипов, М. Ф. Галяутдинов, Р. М. Баязитов) – 1974 г.; теория динамической эхо-голографии (Е. И. Штырков, В. В. Самарцев) – 1976 г.

Во второй половине 80-х годов прошлого века в стране начинается перестройка, происходят существенные перемены во всех областях политической и экономической жизни, что, естественно, сказывается и на жизни нашего института. В марте 1988 года коллектив института впервые тайным голосованием выбирает своего директора. Им становится Кев Минуллинович Салихов, который затем возглавлял институт почти 30 лет.

В течение первых нескольких лет по инициативе К. М. Салихова был образован Диссертационный Совет по защите кандидатских и докторских диссертаций и открыта кафедра химической физики КГУ. В те же годы основан международный научный 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, экологии и других областях науки. По инициативе К. М. Салихова в 1991 году была учреждена Международная премия имени Е. К. Завойского. Премия поддержана нашим институтом, КФУ, Правительством РТ и издательством Шпрингер. Она получила признание Амперовского общества,

международного общества ЭПР и Президиума РАН. Вот уже более 25 лет ежегодное вручение премии является значительным событием для научной общественности Казани и РТ.

За годы руководства институтом К. М. Салиховым существенно обновился парк ЯМР и ЭПР спектрометров. Особенно хочется отметить созданный В. Ф. Тарасовым и Г. С. Шакуровым первый в мире ЭПР спектрометр субмиллиметрового диапазона с перестраиваемой частотой от 37 до 859 ГГц. Валерий Фёдорович Тарасов является одним из пионеров и признанным в мире авторитетом в области субмиллиметровой ЭПР спектроскопии, а также в течение 20 лет он занимал должность заместителя директора по науке.

С получением в 1963 году жидкого гелия была открыта дверь в физику низких температур. В 1992 году создаётся отдел криогенной техники, который возглавляет С. Я. Хлебников, а на следующий год запускается гелиевая станция КГУ-600, обеспечивающая стабильное снабжение института жидким гелием по сегодняшний день.

В 2000 году в институте создаётся отдел медицинской физики, основной задачей которого становится использование методов магнитного резонанса для диагностики различных заболеваний и разработка медицинского томографа.

Исследования и разработки сотрудников института получили широкое признание как у нас в стране, так и за рубежом. Они отмечены государственными и международными наградами и премиями. Среди них: Ленинская премия (Салихов К.М. с соавт., 1986); 2 государственные премии СССР (Штырков Е.И. с соавт., 1982; Баязитов Р.М., Хайбуллин И.Б., Галяутдинов М.Ф., Штырков Е.И., Зарипов М.М. с соавт., 1988); 11 Государственных премий РТ, из них семь за последние 10 лет (Зарипов М.М. с соавт., 2006; Гарифуллин И.А., Гарифьянов Н.Н., Тейтельбаум Г.Б., Харахашьян Э.Г. (посм.) с соавт., 2007; Самарцев В.В., 2009; Богданова Х.Г., Кессель А.Р. (посм.), Мигачев С.А., Шакирзянов М.М. с соавт., 2011; Нуждин В.И., Хайбуллин Р.И. с соавт., 2011; Галяутдинов М.Ф., Герасимов К.И., Курбатова Н.В. с соавт., 2012; Гнездилов О.И. с соавт., 2015).

Казанский физтех сегодня – это динамично развивающийся исследовательский центр с широким спектром научных интересов, осваивающий передовые рубежи современной физики. Среди актуальных направлений – оптические квантовые технологии, нанотехнологии, синтез и исследование перспективных материалов и структур, спектроскопия быстропротекающих процессов. Благодаря достигнутому в КФТИ высокому уровню работ в области ЭПР спектроскопии и её применения, на сегодняшний день КФТИ является головным научным учреждением в реализации Программы фундаментальных исследований Президиума Российской академии наук “Электронный спиновый резонанс, спин-зависящие электронные эффекты и спиновые технологии”. В реализации этой Программы участвуют ведущие физические институты РАН Москвы, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода, Новосибирска. В институте выполняются три гранта Российского научного фонда по теме квантовых оптических технологий.

Особенно хочется выделить прикладные исследования и разработки. В институте были созданы четыре ЯМР-томографа ТМР-0.06-КФТИ, которые работали в медицинских учреждениях Республики Татарстан. Сейчас разработан новый томограф с индукцией магнитного поля 0.4 Тл. Большой резонанс в Татарстане и России вызвала разработка ионно-лучевой нанотехнологии изменения окраски минералов и их синтетических аналогов. Создан аппаратурно-методический комплекс для исследования гидрогеологических процессов с использованием флуоресцентных индикаторов-красителей, который можно использовать для выявления источников загрязнения пресных вод и оптимизации накачки водой нефтяных месторождений. Ведутся прикладные исследования и разработки института для машиностроения, востребованные промышленностью республики. Так, модели, методы и средства расчётного сопровождения процесса проектирования используются в ПАО “КамАЗ” и НПО “ОКБ им. М. П. Симонова”.

Хотел бы отметить достижения нашей молодёжи и отметить победителей различных конкурсов последних лет: Зарипова Р.Б., Суханова А.А., Хантимерова С.М., Шмелёва А.Г., Конова А.Б., Конова К.Б., Лебедева Д.В., Камашева А.А., Салахутдинова Л.Ф., Волкова М.Ю., Халитова Н.И. Их достижения дают нам основание с уверенностью смотреть в будущее.

Своё выступление я хотел бы закончить словами Фредерика Жолио-Кюри: “Наука – основной элемент, объединяющий мысли людей, рассеянных по земному шару, и это – одно из высоких её назначений. На мой взгляд, нет такой человеческой деятельности, где согласие между людьми было бы настолько очевидно.”

Некоторые поздравления, поступившие в адрес института

Поздравление от первого президента РТ М. Ш. Шаймиева



Дорогие учёные, доктора, профессора, аспиранты
и сотрудники института!
Уважаемый Алексей Алексеевич!
Уважаемый Кев Минуллинович!

Примите искренние поздравления со знаменательным юбилеем – 70-летием прославленного Казанского физико-технического Института имени Е. К. Завойского Казанского научного центра РАН!

Талант, умение масштабно мыслить и исключительная преданность любимому делу всего коллектива позволили Институту стать одним из ведущих мировых научных центров в области магнитной радиоспектроскопии. Мы гордимся плеядой выдающихся физиков, принёсших славу и международное признание Институту. Семён Александрович Альтшулер, Борис Михайлович Козырев, Вячеслав Евгеньевич Алемасов, Хамид Музафарович Муштари, Максут Мухамедзянович Зарипов, Ильдус Бариевич Хайбуллин, Кев Минуллинович Салихов и многие другие видные учёные вписали яркие страницы в историю становления и развития Института.

Приятно, что вы успешно продолжаете дело Евгения Константиновича Завойского, открывшего великое явление парамагнитного резонанса, создавая новые возможности во благо человечества в таких областях как медицина и биохимия, геологоразведка и гидрология, автомобилестроение и авиационная промышленность, строительство и т.д.

Уверены, что высокий профессионализм и целеустремлённость сотрудников, дальновидность и созидательная энергия руководства будут способствовать дальнейшему развитию Института, позволят вам соответствовать запросам нового времени.

Дорогие друзья! От всей души желаю вам здоровья, благополучия и новых научных достижений.

Поздравление от руководителя ФАНО России М. М. Котюкова

Уважаемый Алексей Алексеевич и коллектив Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского!

Сердечно поздравляю вас с 70-летием со дня основания Института!

Казанский физико-технический институт носит имя выдающегося физика Евгения Константиновича Завойского. В создании и становлении Института определяющую роль сыграло его открытие электронного парамагнитного резонанса. Это явление впоследствии нашло широкое применение в физике, химии, биологии и медицине.

За годы работы в Институте было получено множество важнейших научных результатов, признанием этих достижений являются многочисленные награды и премии: Ленинская премия, две Государственные премии СССР, одиннадцать Государственных премий Республики Татарстан.

Сегодня КФТИ является одним из ведущих мировых центров в области развития радиоспектроскопии и применения радиоспектроскопических методов в ряде научных областей.

В Институте с успехом проводятся прикладные исследования, связанные с разработкой, созданием и введением в эксплуатацию медицинских магнитно-резонансных томографов.

КФТИ активно участвует в подготовке научных кадров, является базовой кафедрой Института физики Казанского федерального университета и развивает сотрудничество с другими научными организациями региона.

Желаю коллективу Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского успехов в дальнейшей работе и новых открытий!

Поздравление от Отделения физических наук РАН

Глубокоуважаемые сотрудники КФТИ РАН!
Дорогие друзья!

Отделение физических наук Российской академии наук сердечно поздравляет вас с 70-летним юбилеем Казанского физико-технического института им. Е. Е. Завойского РАН!

Казанский физико-технический институт Академии наук СССР был организован в августе 1945 года и стал как бы вестником наступившей мирной созидательной жизни страны.

Становление и развитие физических исследований в КФТИ во многом определилось открытием в Казани ещё в 1944 году Евгением Константиновичем Завойским явления электронного парамагнитного резонанса. Сектор физики, созданный Е. К. Завойским, стал основой для создания института, который со временем превратился в первоклассный исследовательский центр. Вот уже в течение 70 лет Казанский физико-технический институт нашей Академии является одним из ведущих мировых центров в области развития радиоспектроскопии и применения радиоспектроскопических методов в физике, химии, материаловедении и медицине.

В летопись физической науки учёные КФТИ вписали немало ярких страниц своими всесторонними исследованиями явления электронного парамагнитного резонанса, предсказанием и открытием эффекта светового эха и явления электроакустического эха, открытием явления, названного впоследствии лазерным отжигом полупроводников.

В настоящее время в Институте активно развиваются исследования, связанные с синтезом и модификацией новых функциональных материалов, оптическими квантовыми технологиями, нанотехнологиями, когерентной оптической твёрдотельной спектроскопией и спектроскопией быстропротекающих процессов.

Помимо фундаментальных исследований в КФТИ ведутся прикладные исследования и разработки. Одним из направлений является разработка, создание и введение в эксплуатацию медицинских магнитно-резонансных томографов. В настоящий момент три томографа КФТИ работают в медицинских учреждениях Республики Татарстан. Разработана ионнолучевая нанотехнология изменения окраски минералов и их синтетических аналогов. Ведутся прикладные исследования и разработки для машиностроения, которые востребованы промышленностью республики, используются в ПАО "КамАЗ", НПО "ОКБ им. М. П. Симонова" и ряде других предприятий.

КФТИ успешно ведёт подготовку высококвалифицированных научных кадров, широко сотрудничает с вузами, российскими и международными научными центрами, имеет совместные лаборатории с Институтом физики Казанского федерального университета и Институтом авиации, наземного транспорта и энергетики КНИТУ-КАИ.

Большую роль в укреплении международного авторитета института играет Международная премия им. Е. К. Завойского за выдающийся вклад в развитие электронного парамагнитного резонанса, учреждённая в 1991 году по инициативе директора КФТИ академика К. М. Салихова. Институт принимает самое непосредственное участие в организации церемонии награждения и приуроченного к ней международного симпозиума. За 20 лет существования этой премии, высокого звания лауреата были удостоены 23 выдающихся учёных из разных стран мира.

С 1990 году КФТИ РАН совместно с издательством Springer-Verlag издаёт международный журнал "Aplied Magnetic Resonance", посвящённый приложениям магнитного резонанса в физике, химии, биологии, медицине, геохимии, экологии. К настоящему времени вышли 39 томов этого авторитетного издания.

Признанием высокого авторитета КФТИ РАН являются многочисленные награды, присуждённые учёным. Сотрудники института удостоены: Ленинской премии, трёх Государственных премий СССР, одиннадцати Государственных премий Республики Татарстан, золотой медали международного общества ЭПР; награды Общества магнитного резонанса Австралии и Новой Зеландии, премии фонда им. Александра фон Гумбольдта, ордена "За заслуги перед Республикой Татарстан", медали Российской академии наук для молодых учёных РАН, ордена "За заслуги перед Отечеством" IV степени.

Дорогие коллеги!

Отделение физических наук РАН от всей души желает всем Вам дальнейших успехов в науке, крепкого здоровья, неизменной бодрости, благополучия Вашим семьям, личного счастья!

Академик-секретарь Отделения физических наук
РАН акад. И. А. Щербаков,
Заместитель академика-секретаря
Отделения физических наук РАН по
научно-организационной работе
д.ф.-м.н. Н. Л. Истомина

О работе Учёного совета КФТИ КазНЦ РАН

В 2016 году состоялось, как и в предыдущий год, 38 заседаний Учёного совета. В институте традиционно одно из заседаний Учёного совета посвящается конкурсу на гранты КФТИ для молодых учёных и аспирантов, а в начале года – заслушиваются отчёты по грантам предыдущего года. В 2016 году, на первом заседании состоялось обсуждение отчётов Шухина А.А., Воробьёвой В.Е, Зарипова Р.Б., Баязитова А.А. и Суханова А.А. Доклады молодых учёных вызвали неподдельный интерес, члены Учёного совета отметили высокий уровень выполненных работ. В продолжение молодёжной темы отмечу сразу и конкурс на именные стипендии для молодых учёных и аспирантов. Конкурс всегда проводится в начале мая. На стипендию имени Н. С. Гарифьянова претендовали три аспиранта, выбор был сложный, присудили стипендию Салихову Тимуру. На стипендию для молодых учёных имени Б. М. Козырева также было три претендента, победил Лядов Николай. В октябре Учёный совет выдвинул кандидатуру А. А. Суханова для участия в конкурсе на премию им. Е. К. Завойского для молодых учёных. Приятно отметить, что А. А. Суханов занял в этом конкурсе первое место.

У нас также стало уже традицией в начале года выдвигать один из коллективов на премию Республики Татарстан в области науки и техники. В 2016 году Учёный совет выдвинул работу “Создание инновационных лантаноидсодержащих материалов с управляемыми фотофизическими свойствами для оптоэлектроники и биомедицины” авторского коллектива в составе Лобкова В.С., Никифорова В.Г., Лапаева Д.В., Сафиуллина Г.М., Князева А.А., Селивановой Н.М., Романовой К.А. Работу презентовал Лапаев Д.В. Члены Учёного совета горячо поддержали выдвижение этой работы на государственную премию РТ. Выступающие отметили, замечательный авторский коллектив, сочетающий молодость и опыт, подчёркивали, что авторами проделана большая работа и получены интересные результаты. Но, к сожалению, из-за большой конкуренции работа не была удостоена государственной премии 2016 года.

В январе Учёный совет выдвинул ряд кандидатур для награждения Почётной грамотой ФАНО и “Благодарностью ФАНО” в ознаменование 70-летия образования института. Здесь тоже не всё прошло так, как планировали, только в конце года из ФАНО прислали одну Почётную грамоту Воронковой В.К. и одну Благодарность Аджалиеву Ю.А.

Сам юбилей праздновали, как и в предыдущие годы, в начале февраля. Празднование юбилея состояло из нескольких мероприятий: выездная сессия ОФН, торжественное заседание в здании Академии наук РТ и поздравления от коллег физтеха в неформальной обстановке. Эти мероприятия будут отражены в отдельных сообщениях. Отмечу только, что программа празднования обсуждалась и утверждалась Учёным советом. Кроме того, по решению Учёного совета в программу итоговой конференции была включена сессия, посвящённая обсуждению наиболее ярких результатов, полученных за последние 5 лет. С одной стороны такое обсуждение – это некоторое подведение итогов в связи с юбилейной датой института, с другой стороны – это смотр перспективной тематики института на ближайшие годы. Такое заседание состоялось 11 февраля, на нём было представлено 17 докладов ведущих сотрудников КФТИ.

2016 год – это год юбилея К. М. Салихова. В апреле 2016 года Учёный совет выдвинул кандидатуру К. М. Салихова на награждение орденом “За заслуги перед Отечеством” III степени. Эпопея по оформлению и продвижению наградного дела Салихова К.М. ещё продолжается.

Весной Учёный совет провёл большую и важную работу по обсуждению и утверждению новых тем госзадания на 2017–2019 гг. В предыдущие года институт выполнял исследования по семи основным темам, на новый период утвердили шесть тем.

В конце года после обсуждения и были утверждены планы работы по бюджетным темам. Затем обсуждались важнейшие результаты института за 2016 год. На последнем заседании года рассматривали и утверждали отчёты по государственному заданию на 2016 год.

Важный вопрос, к обсуждению которого неоднократно возвращался Учёный совет, вопрос о реструктуризации института. На заседании 2 марта Учёный совет принял решение согласиться с участием КФТИ КазНЦ РАН в реализации интеграционного проекта по созданию Федерального исследовательского центра “Казанский научный центр РАН”, но сформулировал ряд условий, при соблюдении которых считать реструктуризацию в ФИЦ возможной.

На заседаниях также обсуждались вопросы о финансовой деятельности института и об изменении в структуре института. Было принято решение о создании группы “Нанооптики и наноплазмоники” под руководством А. Л. Степанова. Учёный совет рекомендовал ведущих научных сотрудников КФТИ для включения в реестр “Эксперты РАН”. Все рекомендованные сотрудники включены в реестр. Как всегда, осенью утверждались планы и темы аспирантов первого года обучения. На заседаниях Учёного совета неоднократно поднимался вопрос об аккредитации, утверждались различные положения о деятельности института в этом направлении и программы обучения аспирантов. В 2016 году институт получил аккредитацию образовательной деятельности. Следует отметить большую роль Т. Г. Митрафановой

в подготовке документов по аккредитации, во многом именно ей институт обязан положительному решению по этому вопросу.

В ноябре дирекция на заседании Учёного совета информировала о ситуации с жидким гелием. Учёный совет поддержал предложение администрации о сокращении в 2017 году закупки газообразного гелия за счёт бюджета на 400000 рублей. Было принято решение о создании комиссии по расходу жидкого гелия. Обсуждался также вопрос о сокращении подписки на научные журналы в связи с увеличением стоимости подписки.

В ноябре Учёный совет выбрал лауреатов премии им. М .Л. Блатта. По решению Совета присудили две премии. Лауреатами стали Лисин Н.А. и Хабибуллина В.И.

На научных сессиях Учёного совета сотрудники института докладывали статьи, подготовленные к печати, делали обзорные доклады, а также информировали о работе конференций, в которых принимали участие. Особый интерес вызвал доклад аспиранта А. А. Шухина об участии в Совещании Нобелевских лауреатов.

В 2016 году Учёный совет заслушал и рекомендовал к защите три кандидатские диссертации наших сотрудников: К. Б. Конова, А. А. Камашева и Т. Ф. Ханипова. К. Б. Конов и А. А. Камашев успешно защитили диссертации в 2016 году. На заседаниях Учёного совета обсуждались также материалы докторских диссертаций гостей института: Е. В. Ерёмина из Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН, Красноярск и К. Е. Приходько из ФГБУ Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт". На заседаниях Учёного совета были представлены также интересные доклады гостей института. Г. Н. Гольцман из МПГУ (Москва) выступил с докладом "Сверхпроводниковые наноструктуры – основа приёмных устройств терагерцового и оптического диапазонов", Р. Хасанов из института Поля Шеррера (Швейцария) представил доклад об изучении магнитных и сверхпроводящих явлений с помощью мюонной спиновой спектроскопии. М. В. Рауцкий представил отчёт о выполнении проекта РФФИ под руководством Р. М. Ерёминой.

В. К. Воронкова

Аспирантура как третья ступень высшего образования

Я не волшебник. Я только учусь…
Е. Шварц

В соответствии с распоряжением Рособрнадзора № 1171-06 от 06.05.2016 в период с 30 мая по 3 июня 2016 года в КФТИ им. Е. К. Завойского КазНЦ РАН успешно прошла аккредитационная экспертиза профессиональной образовательной программы аспирантуры по направлению подготовки 03.06.01 "Физика и астрономия", представленному двумя специализированными профилями: 01.04.11 "Физика магнитных явлений" и 01.04.05 "Оптика". Результатом её стало получение в июле этого года свидетельства о государственной аккредитации и включение нашего института в реестр организаций, осуществляющих образовательную деятельность по имеющим государственную аккредитацию образовательным программам. Предшествовавший этому полугодовой подготовительный период потребовал немалых усилий как со стороны вновь созданного отдела аспирантуры, так и со стороны целого ряда подразделений института. Особую благодарность хотелось бы выразить нашим коллегам, выступившим в качестве разработчиков программ учебных дисциплин и практик, сотрудникам научно-технической библиотеки, научно-организационного отдела, группы информационной безопасности, телекоммуникационных и сетевых технологий, инженеру по ОТ и ТБ, руководителям финансово-экономической группы, группы по работе с кадрами и бухгалтерии, а также дирекции института.

Зачем же нужны были эти усилия и что вообще представляет собой современная аспирантура в научной организации в свете реформ последних лет? Вступивший в силу в сентябре 2013 года, новый закон об образовании в Российской Федерации принципиально изменил подход к подготовке кадров высшей квалификации. Если ранее обучение в аспирантуре было, по сути, первой ступенью научной карьеры, ориентированной, в первую очередь, на самостоятельную исследовательскую работу и защиту кандидатской диссертации, то в своём новом статусе аспирантура становится третьей, завершающей ступенью высшего образования, вслед за бакалавриатом и магистратурой. Такая трансформация является логическим продолжением реформ, вызванных присоединением России к Болонскому процессу. Согласно европейским стандартам высшее профессиональное образование традиционно подразделяется на три уровня, последним и наивысшим из которых является докторантура (аналог нашей отечественной аспирантуры).

На практике, переход аспирантуры в единую систему непрерывного высшего образования приводит к целому ряду новшеств. Во главу угла теперь ставится сам учебный процесс со всеми вытекающими отсюда последствиями. Значительный вес приобретает образовательная составляющая, а именно: знакомые всем с университетских времен лекции, практические занятия, семинары, зачёты и экзамены. Обязательными становятся научно-исследовательская и педагогическая практики, а также две полноценные экзаменационные сессии в год. Не сдавший экзамены и зачёты или не прошедший

практику аспирант приобретает академическую задолженность и лишается стипендии.

Исследовательская составляющая, хотя и претерпевшая некоторый секвест, всё же продолжает занимать значительный объём и направлена на подготовку выпускной научно-квалификационной работы (НКР), некоего прообраза будущей кандидатской диссертации.

В конце четырёхлетнего периода обучения аспирантам предстоит пройти государственную итоговую аттестацию, которая состоит из собственно государственного экзамена и представления доклада об основных результатах подготовленной НКР.

Успешно прошедшим аттестацию присваивается квалификация "Исследователь. Преподаватель-исследователь" и выдаётся государственный диплом установленного образца об окончании аспирантуры, позволяющий его обладателю преподавать в высшей школе и работать в научных организациях. Ранее выпускник аспирантуры получал только удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов. Собственно, кроме кандидатского минимума по специальности, иностранному языку и философии никаких иных форм контроля в дореформенной аспирантуре не было. Основной и первостепенной задачей аспиранта в недавнем пошлом являлось получение диплома кандидата наук. Заметим, что исходя из буквы закона, защита кандидатской диссертации на сегодняшний день формально более не является целью обучения и никак не связана с присвоением вышеупомянутой квалификации. Аспирантура сегодня рассматривается как специализированная образовательная программа, направленная на формирование у обучающихся определённых знаний, умений и навыков, необходимых для будущей профессиональной деятельности.

Итак, "учиться, учиться и ещё раз учиться…" и, соответственно, учить. Чему и как? Основным регламентирующим документом, определяющим структуру образовательной программы аспирантуры по направлению "Физика и астрономия", условия реализации этой программы и требования к результатам её освоения, является федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования (ФГОС ВО), утверждённый приказом Министерства образования и науки РФ 30 июля 2014 года. Данный документ ставит перед теми, кто поступил в аспирантуру в 2014 году и позднее, глобальные цели. Так, выпускник аспирантуры отныне должен обладать: 1) пятью универсальными компетенциями, применимыми во всех сферах интеллектуальной деятельности, а именно: способностями к критическому анализу, генерации новых идей, проектированию и реализации комплексных и междисциплинарных исследований, научной коммуникации, решению задач личностного и профессионального роста; 2) двумя общепрофессиональными компетенциями: способностью самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность и готовностью к преподавательской деятельности в высшей школе; 3) профессиональными компетенциями, перечень которых устанавливает сама образовательная организация (как правило, на основе паспортов научных специальностей, соответствующих профилям подготовки). Здесь также не обошлось без пресловутого Болонского процесса. Формулировки универсальных и общепрофессиональных компетенций явственно коррелируют с требованиями, предъявляемыми к выпускникам PhD-программ Европейской системой квалификаций высшего образования (Дублинские дескрипторы) и профессиональными стандартами высшей школы Великобритании и США.

Кроме того, ФГОС ВО содержит требования к материально-технической базе организации, осуществляющей образовательную деятельность, кадровому составу преподавателей, квалификации научных руководителей и электронной информационно-образовательной среде (ЭИОС) организации. Последняя должна обеспечивать полное отражение хода учебного процесса, включая формирование электронного портфолио обучающегося, доступ к учебным планам, рабочим программам изучаемых дисциплин и практик, к электронным библиотечным системам, наукометрическим и образовательным ресурсам.

Каждая организация, осуществляющая образовательную деятельность по подготовке кадров высшей квалификации в аспирантуре, обязана разработать и утвердить свою образовательную программу аспирантуры и пройти процедуру аккредитации этой программы на предмет её соответствия государственному стандарту в Рособрнадзоре РФ. Процесс этот хотя и довольно хлопотный, но вместе с тем совершенно необходимый. Помимо всего прочего, наличие аккредитации позволяет, во-первых, получать отсрочку от прохождения службы в армии для аспирантов очной формы обучения, во-вторых, собственно выдавать дипломы об окончании аспирантуры, без чего пребывание в ней, вообще говоря, теряет смысл.

Очевидно, что вся вышеизложенная концепция современной аспирантуры по своей сути не вполне согласуется с исторически сложившимися традициями обучения аспирантов в академических институтах. А с точки зрения организации учебного процесса, подобный подход ближе и понятнее образовательным организациям высшей школы. С необходимостью соответствовать новым правилам и связаны все сложности, с которыми физтеху уже пришлось столкнуться при подготовке к аккредитации и ещё предстоит встретиться в ходе дальнейшей работы аспирантуры.

Первое и, пожалуй, главное – это рациональное наполнение тех обязательных 756 академических часов, которые отведены на лекции, семинары и самостоятельную работу аспиранта над изучаемыми дисциплинами вариативной части программы. Для того, чтобы они не превратились в формальное повторение, пусть и на более высоком уровне понимания, уже не раз пройденного на этапах бакалавриата и магистратуры, преподавателям потребуется приложить немало усилий. И это при том, что научные сотрудники института, любезно согласившиеся выступить в роли педагогов (в основном, научные руководители сегодняшних аспирантов) не имеют и в ближайшей перспективе не будут иметь сколько-нибудь значимых преференций за свой труд. В то же время, будь

у физтеха возможность достойно оплачивать педагогическую деятельность своих сотрудников в собственных стенах, список преподаваемых в аспирантуре дисциплин мог бы пополниться многими полезными спецкурсами.

Отдельного внимания требует необходимость формирования у аспирантов педагогических и организационно-коммуникационных компетенций. Помимо обязательного теперь прохождения педагогической практики на базе университета, приветствуется чтение аспирантами самостоятельно подготовленных лекций в рамках регулярного аспирантского семинара, их активное участие в подготовке заявок на финансирование научных исследований, в разработке и реализации плана научных исследований подразделений института, развитие навыков презентации и коммерциализации результатов научной деятельности. В ходе государственного экзамена выпускники аспирантуры физтеха должны будут представить на суд государственной аттестационной комиссии самостоятельно разработанную программу учебной дисциплины, а также сформированную заявку на участие в конкурсе инициативных научных исследований.

С организационной стороны наибольшую тревогу вызывает вопрос о финансировании аспирантуры. Уже на этапе подготовки к аккредитации рабочая группа столкнулась с невозможностью обеспечить аспирантам свободный доступ к основным научным базам данных и наукометрическим системам, к полнотекстовым версиям профильных научных периодических изданий и электронным библиотекам. В результате, образовательная программа нашей аспирантуры официально базируется исключительно на источниках и ресурсах свободного доступа. Справедливости ради следует сказать, что уже после прохождения процедуры аккредитации КФТИ получил доступ к некоторым электронным ресурсам. Однако актуальными остаются проблемы развития материально-технической базы аспирантуры, отсутствия необходимых площадей, оплаты труда преподавателей-физтеховцев, приобретения лицензионного программного обеспечения и т.п.

В заключение хотелось бы вновь вернуться к вопросу о конечной цели обучения в аспирантуре. Парадоксальная ситуация с отсутствием у нынешних аспирантов прямой мотивации к защите кандидатской диссертации наконец привлекла внимание российских законодателей. В середине декабря в Государственной Думе состоялся круглый стол на тему “Подготовка научно-педагогических кадров: проблемы и пути совершенствования”. На нём прозвучало предложение считать выпуск аспирантов без последующей защиты диссертации нецелевым расходованием бюджетных средств, а мерилом эффективности работы образовательных организаций, реализующих программы аспирантуры, вновь сделать не присвоение квалификации, а диплом кандидата наук. Участники дискуссии констатировали, что назрела необходимость изменения законодательства в данной сфере. “Грядут перемены!” – повторяем мы крылатую фразу вслед за героем культового фильма “Покровские ворота”. Будем надеяться, что это перемены к лучшему.

Т. Г. Митрофанова

XI Международная научная школа “Наука и инновации-2016”: от фундаментальных достижений до уникальных технологических компетенций

В 2016 году с 3 по 12 июля в республике Марий-Эл на территории пансионата “Яльчик” состоялась XI Международная научная школа “Наука и инновации-2016”. Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН был одним из организаторов Школы и принял активное участие в её работе. В частности, КФТИ КазНЦ РАН полностью сформировал научную программу одного из мероприятий Школы – VIII Международной школы-семинара “Фундаментальные исследования и инновации: нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия”. В её работе приняли участие специалисты научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений РФ, а также представители зарубежных научных организаций и университетов из Болгарии, Украины, Туркмении, – всего 92 участника из 18 организаций, в том числе 37 молодых учёных, студентов и аспирантов возрасте до 35 лет. Было сделано 15 пленарных лекций, 36 устных докладов и 10 стендовых докладов от лица 96 авторов.

Одной из первоочередных задач инновационной экономики является генерация идей создания высокотехнологичного инновационного бизнеса. Возникает вопрос: как подать результаты фундаментальных и поисковых научных исследований таким образом, чтобы вызвать интерес у организаторов инновационного бизнеса? Ответ на этот вопрос позволит придать научной деятельности особую мотивацию и мобилизовать творческую активность научного сообщества на развитие инновационной экономики. Целью школы-семинара было выявление тенденций развития фундаментальных исследований по заявленной проблематике, перспективных с позиции вклада в развитие национальной экономики и потенциальной капитализации результатов научных исследований.



Молодые учёные и лекторы VIII международной школы-семинара.

Работа VIII международной школы-семинара была направлена на решение фундаментальных проблем когерентной и нелинейной оптики, квантовой оптики, когерентной оптической спектроскопии, а также посвящена разработке перспективных методов создания новых материалов (в том числе и наноразмерных) с уникальными оптическими свойствами. На ней обсуждались вопросы оптоинформатики (включая квантовую память) и принципы получения нанооптических элементов и квантовых точек.

Приглашённые лекторы познакомили участников школы-семинара с актуальными проблемами современных научных исследований, обладающими потенциалом инновационной деятельности. В их числе были почётные лекторы Школы: академик РАН, проф. К. М. Салихов, проф. В. В. Самарцев, проф. А. В. Наумов, проф. Р. Ф. Полищук, проф. И. И. Попов, проф. В. Г. Голенищев-Кутузов, а также: директор КФТИ КазНЦ РАН А. А. Калачёв, директор Квантового центра КНИТУ, проф. С. А. Моисеев, член-корр. РАН, проф. Е. А. Виноградов, проф. МарГУ А. Н. Леухин, проф. И. С. Осадько и другие.

Кратко остановимся на содержании некоторых лекций. Так, академик РАН, д.ф.-м.н., проф. К. М. Салихов (КФТИ КазНЦ РАН, Казань) прочитал лекцию, посвящённую физическим основам спиновых технологий, в которой особое внимание было уделено спиновой химии и спинтронике, а также обсуждению потенциала явления магнитного резонанса в развитии таких технологий. Член-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор Е. А. Виноградов (ИСАН, Москва) раскрыл содержание и возможности новой области исследований физики поверхности на основе спектроскопии поверхностных поляритонов в своём докладе “Определение оптических констант ультратонких плёнок методом спектроскопии поверхностных поляритонов”. Проф. И. С. Осадько (ИСАН, Москва) прочитал лекцию о роли фононов в физике резонансных явлений, протекающих в полупроводниковых средах, а также о применении одиночных донор-акцепторных пар в исследовании конформационной динамики макромолекул. Проф. А. Н. Леухин (МарГУ, Йошкар-Ола) в лекции “Оптимальные бинарные последовательности и их применение” познакомил слушателей с состоянием исследований по применению бинарных импульсных последовательностей в широкополосных информационных системах, в криптографических системах защиты информации и системах определения “свой-чужой”. Проф. А. В. Наумов (ИСАН, Москва) свой доклад “Спектроскопия и микроскопия одиночных полупроводниковых квантовых точек” посвятил технике биспиральной аппаратной функции точечного излучателя, совмещённой с техникой регистрации бесфононных спектральных линий и флуоресцентных изображений одиночных молекул. Этот материал хорошо дополнил проф. А. А. Роженцов (ПГТУ, Йошкар-Ола) своим докладом “Компьютерный анализ флуоресцентных изображений одиночных точечных излучателей: фундаментальные аспекты и приложения для оптической наноскопии”. А. А. Калачёв (КФТИ КазНЦ РАН, Казань) в своей лекции “Оптическая квантовая память на основе нерезонансного рамановского взаимодействия в изотопически чистых примесных кристаллах”, а также проф. С. А. Моисеев (КНИТУ-КАИ, Казань) в лекции “Многокубитовая квантовая память: перспективы



Академик РАН К. М. Салихов во время чтения лекции по спиновым технологиям.

создания и использования в квантовых коммуникациях и вычислениях" познакомили слушателей с современным состоянием исследований и перспективами построения оптической квантовой памяти. Проф. И. И. Попов (ПГТУ, Йошкар-Ола) в своём докладе "Фемтосекундная магнитооптика на основе фотонного эха" показал тенденции современного развития фемтосекундной магнитооптики и привёл оригинальные результаты по экспериментальному обнаружению и исследованию при комнатной температуре эффекта нефарадеевского поворота плоскости поляризации фотонного эха в тонкой полупроводниковой плёнке.

Большой интерес у слушателей вызвали устные доклады, подготовленные молодыми участниками школы-



На школе-семинаре встретились три поколения учёных: проф. А. Н. Леухин (слева) – бывший аспирант И. И. Попова; проф. И. И. Попов (справа) – бывший аспирант В. В. Самарцева и родоначальник этой научной династии – проф. В. В. Самарцев (в центре).

семинара. Среди них: доклад А. В. Шкаликова с соавторами (КФТИ КазНЦ РАН, Казань) "Проблемы генерации однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом для атмосферной оптической квантовой связи", доклад А. А. Баева с коллегами (ПГТУ, Йошкар-Ола и ИСАН, Москва) "Методы и алгоритмы обработки наноскопических изображений в реальном масштабе времени", доклад М. М. Миннегалиева с соавторами (КНИТУ-КАИ и КФУ, Казань) "Кинетика оптических переходов ионов эрбия в кристалле $^{7}LiYF_4$ и перспективы использования в квантовой памяти", доклад В. В. Федянина и К. Р. Каримуллина (ИСАН, Москва) "Сверхбыстрая дефазировка в примесных твёрдотельных средах: численное моделирование и эксперимент", доклад Н. С. Вашурина с соавторами (ПГТУ, Йошкар-Ола) "Влияние дефектной структуры поверхности кристаллических волокон тонких текстурированных плёнок на свойства фотонного эха" и доклад А. Р. Сахбиевой с коллегами (КФУ, Казань) "Логические операции с изображением в оптической эхо-голографии". В процессе подготовки докладов, выступлении с ними перед аудиторией Школы, в ходе научных дискуссий молодые специалисты творчески растут и со временем становятся активными учёными. Ярким примером может служить проф. А. Н. Леухин, ныне проректор по науке МарГУ, а в прошлом – аспирант проф. И. И. Попова, который, в свою очередь, был аспирантом проф. В. В. Самарцева.

В рамках работы Школы состоялись заседания Клуба профессорской мысли, проводимого в форме "Выставки-конкурса инновационных разработок на основе уникальных научно-поисковых компетенций". Дипломом за второе место в этом конкурсе был награждён авторский коллектив из КФТИ КазНЦ РАН за разработку в области атомсферных оптических линий связи, пропустивший вперёд только авторов разработки по люминисцетным наноскопам из Института спектроскопии РАН.

В заключение следует отметить, что на сегодняшний день ежегодная международная научная школа "Наука и инновации" разработала свои традиции воспитания молодых учёных, способных трансформировать результаты собственных научных исследований в идеи инновационного бизнеса, а также достигла определённых успехов в междисциплинарной кооперации учёных, работающих в различных областях знаний. Материалы всех школ размещены на сайте ФГБОУ ВО ПГТУ http://old.volgatech.net/about_the_university/departments/846/ и в Российской базе научного цитирования (РИНЦ). По результатам работы Школы подготовлен выпуск журнала "Известия Российской академии наук. Серия физическая".

И. И. Попов, профессор, председатель Программного и Организационного комитетов Школы;
В. В. Самарцев, профессор, сопредседатель Программного комитета Школы;
К. Р. Каримуллин, член Программного комитета Школы

Двадцатая Международная молодёжная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”

Уже двадцатая (юбилейная) международная молодёжная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (КООС-2016) проходила в Казани 18–20 октября 2016 года. Начало проведения этих школ пришлось на “лихие” девяностые годы (а именно на 1997 год), когда всё было непросто и, говоря словами профессора И. Р. Габитова, “это была пора полного безденежья, когда даже мысль о подобных школах казалась очень смелой”.

Возвращаясь к XX школе КООС, отметим, что ректорат Школы в составе заведующего кафедрой оптики и нанофотоники КФУ, проф., президента Академии наук РТ М. Х. Салахова (ректора Школы), руководителя лаборатории нелинейной оптики Казанского физико-технического института КазНЦ РАН, проф., академика РАЕН В. В. Самарцева (проректора Школы) и проф. кафедры оптики и нанофотоники КФУ Д. И. Камаловой (учёного секретаря Школы) организовал подготовку и проведение Школы. В состав Программного комитета вошли: д.ф.-м.н., проф. Университета Аризоны, США и Сколковского института науки и технологий И. Р. Габитов – сопредседатель; д.ф.-м.н., проф., заместитель директора Института спектроскопии РАН А. В. Наумов – сопредседатель; и члены ректората школы.

Весьма разнообразной и продуманной была программа Школы. В итоге, были прочитаны следующие лекции: “Статистика ошибок в когерентных линиях связи” (проф. И. Р. Габитов, Университет Аризоны, США и Сколковский институт науки и технологий, Россия); “К вопросу об экспериментальной реализации источника неклассического света на основе единичных органических молекул красителей” (проф. А. В. Наумов, ИСАН, Троицк, Москва); “Стрейнтроника” (проф. А. А. Бухараев, КФТИ КазНЦ РАН, Казань); “О приближениях медленно меняющейся огибающей и медленно меняющегося профиля в нелинейной оптике” (проф. С. В. Сазонов, НИЦ “Курчатовский институт”, Москва); “Квантовая память в изотопически чистых примесных кристаллах” (проф. А. А. Калачёв, КФТИ КазНЦ РАН, Казань); “Стохастические дифференциальные уравнения в нелинейной и квантовой оптике” (к.ф.-м.н., с.н.с. А. М. Башаров, НИЦ “Курчатовский институт”, Москва); “Спектроскопия атома водорода и проблемы современной физики” (проф. Р. Х. Гайнутдинов, КФУ, Казань); “Оптическая спектроскопия в астрофизике” (проф. И. Ф. Бикмаев, КФУ, Казань); “Фотофизические процессы в одиночных радиационных дефектах и их ансамблях” (к.ф.-м.н., с.н.с. В. П. Дресвянский, Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН); “Applications of coherent spectroscopy” (prof. G. Hermann, University of Giessen, Germany). Ректор Школы, проф. М. Х. Салахов, сделал доклад по итогам работы Школы за 20 лет.

Информационные сообщения о проведении Школы были разосланы в университеты и научные центры городов России. Научные статьи для опубликования в материалах Школы рецензировались и редактировались. Программным комитетом были отобраны 63 доклада молодых учёных. Были решены организационные вопросы проведения лекционных и секционных заседаний, размещения и питания участников Школы. Заседания Школы проводились в конференц-зале Научной библиотеки им. Н. И. Лобачевского КФУ. География участников Школы охватывала города: Москва, Санкт-Петербург, Казань, Троицк, Йошкар-Ола, Иркутск и другие. Общее число участников составило 76 человек.

Работали следующие секции: а) нанооптика, б) проблемы квантовой оптики, в) оптическая спектроскопия. Кроме того, работала стендовая секция, на которой были представлены 33 стендовых доклада. Научный уровень докладов молодых учёных свидетельствовал об их высокой квалификации.



Участники Школы в зале заседаний.



На стендовой секции.

Секция “Нанооптика” была посвящена проблемам субдифракционного определения координат одиночных квантовых точек, определению собственно-энергетической поправки к энергии атома водорода в одномерном фотонном кристалле, природе неоднородного уширения контура люминесценции нанокомпозита с квантовыми точками CdSe, подходу к нанодиагностике трековых мембран с помощью биспиральной схемы, фотоиндуцированной токсичности наночастиц Pr:LaF_3, характеризации углеродных нанопокрытий оптического волокна с помощью атомно-силовой микроскопии и спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света, вынужденному комбинационному рассеянию света с плазмонной накачкой в планарном микрорезонаторе из нитрида титана.

Доклады на секции “Проблемы квантовой оптики” содержали результаты моделирования квантовой памяти на основе нерезонансного рамановского взаимодействия в примесных кристаллах, практической реализации протокола с состояниями-ловушками для системы квантовой коммуникации на боковых частотах, исследований ширины керровской частотной гребёнки в область нормальной дисперсии с помощью образования дисперсионной волны в оптическом микрорезонаторе, оптимизации параметров кольцевых микрорезонаторов для наблюдения спонтанного четырёхволнового смешения.

На секции “Оптическая спектроскопия” были представлены доклады, посвящённые исследованию спектров люминесценции примесных центров Ce^{3+} в кристаллах $LiCaAlF_6$ и $LiSr_{0.8}Ca_{0.2}AlF_6$, ИК-Фурье-спектроскопии конформационных зондов в бинарной смеси полимеров, исследованию свойств микрочастиц диоксида кремния оптическими методами, определению нелинейно-оптических коэффициентов тонких полимерных плёнок на основе хромофор-содержащих метакриловых сополимеров, флуоресцентным свойствам одиночных квантовых излучателей и их ансамблей в диэлектрических средах.

Среди молодых учёных был проведён конкурс на лучший доклад. По результатам конкурса шесть молодых участников были награждены дипломами и подарками. Среди них: А. В. Козубов (Университета ИТМО, С.-Петербург) за доклад “Практическая реализация протокола с состояниями-ловушками для системы квантовой коммуникации на боковых частотах”, М. Ю. Еремчев (ИСАН, Троицк, Москва) за доклад “Субдифракционное определение координат одиночных квантовых точек”, А. Р. Газизов (КФУ, Казань) за доклад “МРЧ-оптимизация усиления широкополосного оптического поля плазмонных конусных наноантенн с решёткой”, И. Н. Чуприна (КФУ, Казань) за доклад “Оптимизация параметров кольцевых микрорезонаторов для наблюдения спонтанного четырёхволнового смешения”, А. С. Волошин (Российский квантовый центр, Сколково, Москва) за доклад “Оптимизация устройств, основанных на МШГ-микрорезонаторах с элементом связи в виде двух скошенных волокон”, С. И. Кулик (ИСАН, Москва) за доклад “Подход к нанодиагностике трековых мембран с помощью биспиральной схемы”.

В принятом на заключительном заседании Решении Школы отмечена отличная организация её работы и высокий научный уровень. Уже опубликованы и находятся в библиотеке КФТИ КазНЦ РАН Труды Школы.

М. Х. Салахов, профессор, ректор Школы;
В. В. Самарцев, профессор, проректор Школы;
Д. И. Камалова, профессор, учёный секретарь Школы

Annual International Conference “Modern Development of Magnetic Resonance-2016” (October 31–November 4, 2016, Kazan, Russia)

В ноябре 2016 года Казань приветствовала учёных из Российской Федерации (Москва, Новосибирск, Калининград, Красноярск, Н. Новгород, Черноголовка), Германии, Японии, Франции, Великобритании, Австрии, Австралии, Канады и США, собравшихся для обсуждения достижений и новых тенденций в применении магнитного резонанса в рамках ежегодной международной конференции “Современные достижения магнитного резонанса”, приуроченной к церемонии вручения Международной премии имени Е. К. Завойского. В этом году премию разделили профессор Майкл Боуман (Университет Алабамы, Тускалуса, США) и профессор Арнольд Райцимринг (Университет Аризоны, Тусон, США).

Конференция была организована Казанским физико-техническим институтом имени Е. К. Завойского Российской академии наук совместно с Академией наук Республики Татарстан и Казанским федеральным университетом под эгидой Амперовского общества. Как всегда, конференция продемонстрировала высокий интерес к исследованиям, проводимым методами магнитного резонанса в различных областях науки. В этом году программа конференции включала в себя шесть пленарных лекций и около тридцати приглашённых и устных докладов на секциях: “Химические и биологические системы”, “Сильно коррелированные электронные системы”, “Низкоразмерные и наносистемы”, “Теория магнитного резонанса”, “Современные методы магнитного резонанса”, “Другие приложения магнитного резонанса”, “Перспективы магнитного резонанса в науке и спиновых технологиях”, а также на симпозиуме “Обработка информации на спинах”.



На открытии конференции один из пленарных докладов сделал профессор Т. Такуи.

Конференция открылась пленарными лекциями В. А. Ацаркина “Электронный спиновый резонанс на границе между пара- и ферромагнетизмом: соотношение классического и квантового” и Т. Такуи “Молекулярная спиновая технология для квантовых компьютеров и квантовой обработки информации”. На следующий день лекции прочитали Дж. Х. Фрид, рассказавший о новых методах шумоподавления для повышения чувствительности магнитно-резонансных измерений, и Х. Охта, сделавший обзор последних достижений и перспектив развития в области экстремального терагерцового электронного спинового резонанса. Второго ноября состоялись ещё две пленарные лекции: “Новые молекулы порфирина с топологией листа Мёбиуса: исследование современными методами магнитного резонанса” К. Мёбиуса и “Почему ЭПР спасёт мир?” К. Салихова.

В этом году большое внимание было привлечено к докладам, посвящённым обработке информации на основе спинов, которые были представлены в рамках специального симпозиума “Обработка информации на спинах”. Ведущие специалисты в этой области, среди которых – П. Берте, Дж. Мортон, Й. Майер, М. Тобар, Д. Сутер, А. Тырышкин, сделали доклады о различных направлениях ЭПР-исследований, связанных с разработкой квантовых информационных технологий. В частности, обсуждались спиновые кубиты на основе доноров в кремнии, гибридные квантовые системы – центры окраски в алмазе, связанные со сверхпроводящими микроволновыми резонаторами, резонаторные структуры с высокой добротностью для создания сильной спин-фотонной связи, магнитный резонанс на квантовом пределе чувствительности и выше, а также другие актуальные вопросы.

Несомненно, ярким событием этой конференции явилось чествование академика К. Салихова в связи с его восьмидесятилетием.

С большой благодарностью хочется отметить финансовую поддержку проведения конференции правительством Республики Татарстан, Российским фондом фундаментальных исследований и фирмой Брукер БиоСпин.

А. А. Калачёв
Председатель Оргкомитета конференции

Встреча с нобелевскими лауреатами по физике

"Try not to become a man of success,
but rather try to become a man of value."
Albert Einstein, Nobel Prize in Physics, 1921

Раз в год, начиная с 1951 года, Нобелевские лауреаты собираются вместе, чтобы встретиться с ведущими учёными нового поколения – студентами, аспирантами и молодыми учёными со всего мира. Встречи способствуют обмену опытом между учёными разных поколений, культур и дисциплин. Принять участие во встрече можно только один раз; второй раз только в качестве Нобелевского лауреата.

66-я Встреча с Нобелевскими лауреатами по физике (66th Lindau Nobel Laureate Meeting) проходила с 25 июня по 2 июля 2016 года в островной части города Линдау, Германия. Остров расположен в Баварском районе страны на Боденском озере, находящемся на границе Германии, Австрии и Швейцарии.

На встрече присутствовало 32 Нобелевских лауреата, 400 молодых учёных из 18 стран и более 200 приглашённых гостей (учёные из CERN и NASA, бизнесмены, политики, олимпийские чемпионы, работники культуры и образования, комики, музыканты и др.). Среди Нобелевских лауреатов, присутствовавших на встрече, были такие как Стефан Хэлл (Нобелевская премия по химии за создание флуоресцентной микроскопии сверхвысокого разрешения, 2014), Рой Глаубер (Нобелевская премия по физике за вклад в квантовую теорию оптической когерентности, 2005), Уильям Филипс (Нобелевская премия по физике за создание методов охлаждения и пленения атомов с помощью лазерного света, 1997), Брайан Шмидт (Нобелевская премия по физике за открытие ускоренного расширения Вселенной посредством наблюдения дальних сверхновых звёзд, 2011), Брайан Джозефсон (Нобелевская премия по физике за теоретическое предсказание свойств тока сверхпроводимости, проходящего через туннельный барьер, 1973), Клаус Клицинг (Нобелевская премия по физике за открытие квантового эффекта Холла, 1985), Серж Арош и Дэвид Вайнленд (Нобелевская премия по физике за создание прорывных технологий манипулирования квантовыми системами, которые сделали возможными измерение отдельных квантовых систем и управление ими, 2012), Теодор Хэнш (Нобелевская премия по физике за вклад в развитие лазерной прецезионной спектроскопии, включая технику прецизионного расчёта светового сдвига в оптических стандартах частоты (оптических гребёнок), 2005) и др.

Следуя девизу встреч – "Educate. Inspire. Connect." – всё, что происходило на данной встрече, преследовало три цели: обучить, вдохновить и объединить между собой как молодых учёных с Нобелевскими лауреатами, так и молодых учёных между собой. Перечисленные далее различные сессии были направлены на то, чтобы активизировать обмен знаниями, идеями и опытом между Нобелевскими лауреатами и молодыми учёными.

Научные завтраки. Каждый день на завтрак выносилась тема для обсуждений: 1) Значение мягкой материи в современной науке; 2) Научное лидерство: развитие потенциала для ведения научных исследований в быстро меняющемся мире с невероятными возможностями и вызовами; 3) Превосходство в науке и спорте; 4) Квантовая информация: от фундаментальной науки к новым технологиям. На научных завтраках, как правило, присутствовал ведущий, один Нобелевский лауреат и три приглашённых гостя, достигших значительных успехов в своём деле. Начиная обсуждение, гости и лауреат высказывали своё мнение по предложенной теме, далее слово передавали молодым учёным.

В ходе *панельных дискуссий* четыре Нобелевских лауреата обсуждали одну из актуальных тем, касающихся науки и образования: 1) Будущее образования в науке; 2) Являются ли квантовые технологии будущим 21-го века? 3) Проблески в Стандартной модели. Каждый день состав Нобелевских лауреатов менялся в соответствии с темой дискуссии. Молодые учёные имели возможность задать интересующие их вопросы устно, либо через мобильное приложение.

Семинары. Молодые учёные, в соответствии со своими предпочтениями, посещали встречи с каждым Нобелевским лауреатом по-отдельности.

Объединяющие вечера – неограниченные по времени вечерние мероприятия, нацеленные на общение молодых учёных со всеми Нобелевскими лауреатами по очереди. 400 молодых учёных и 32 Нобелевских лауреата рассаживались за столами по десять человек. В течение вечера участники перемещались от одного стола к другому.



Таким образом, к концу вечера можно было пообщаться со всеми Нобелевскими лауреатами и наладить контакты с коллегами со всего мира.

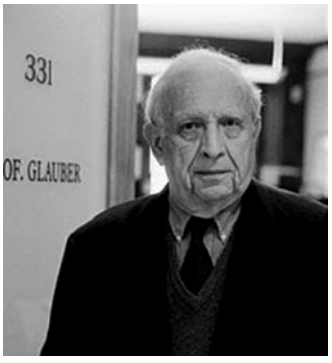
На *мастер-классах* молодые учёные представляли свои устные доклады (~15 докладов) Нобелевским лауреатам и своим коллегам – молодым учёным из разных стран. Мастер-классы были посвящены пяти различным темам, каждую из которых возглавлял Нобелевский лауреат: 1) Измерение изменения климата (со Стивеном Чу); 2) Ультра-холодные газы нейтральных атомов и молекул (с Уильямом Филипсом); 3) Большие вопросы, большие инструменты, большие идеи (с Брайаном Шмидтом); 4) Квантовая информация и квантовые измерения (с Дэвидом Вайнлендом); 5) Физика в структурной биологии, медицинская диагностика, физические упражнения и реабилитация (с Куртом Вютрихом).

Стендовая сессия. Молодыми учёными было представлено 30 стендовых докладов, посвящённых передовым научным исследованиям.

Академические ужины. Молодым учёным предоставлялась возможность посетить торжественный ужин с Нобелевским лауреатом. Для более тесного общения с лауреатами, мероприятие проходило в разных местах, так что в одном помещении был только один стол, рассчитанный на ~7 молодых учёных и одного Нобелевского лауреата. Во время ужина, в неформальной обстановке, мы общались и обсуждали интересующие нас вопросы. На ужин отводилось неограниченное время, поэтому лауреаты, никуда не спеша, делились историей своей жизни и своих открытий, взглядами на науку и жизнь. Также за ужином нам посчастливилось подержать в руках Нобелевскую медаль, которую принёс Клаус Клицинг, сидевший за нашим столом.

На этом список мероприятий, организованных в рамках 66-й встречи, не заканчивается. За неделю нашего пребывания в Линдау мы также побывали на баварском вечере национальных одежд, на теплоходной прогулке по Боденскому озеру, на экскурсии по острову Минау, в парке бабочек и на выставке картин Пабло Пикассо, на выставке передовых технологий Австрии и Германии, на выступлениях музыкантов и на пикнике в парке секвой.

Лекции Нобелевских лауреатов



Рой Глаубер является последним живым участником Манхэттенского проекта, существовавшего в годы второй мировой войны. Его лекция “Некоторые воспоминания о Лос-Аламосе и ядерная эра” была посвящена годам работы с его друзьями – выдающимися учёными, такими, как Альберт Эйнштейн, Роберт Оппенгеймер, Ричард Фейнман, Нильс Бор, Джон фон Нейман и другие.

Стефан Хэлл рассказывал о его нелёгком, но чрезвычайно интересном пути к преодолению дифракционного предела. Идея создания оптической сверхразрешающей микроскопии возникла, когда он был ещё аспирантом в Германии, но там её не восприняли всерьёз. Впоследствии, переехав в Финляндию, ему удалось поставить первые эксперименты, доказав, что созданный им метод действительно работает. На вопрос: “Что помогло Вам добиться таких выдающихся результатов?” он отвечал: “Несмотря на то, что, порой, было трудно “выжить”, и никто не верил в сверхразрешение с помощью микроскопов, основанных на линзах, я работал над проблемой, которая вдохновляла меня, и это помогло мне преодолеть скептицизм других учёных”.

Винтон Сёрф, ставший в 2004 году лауреатом премии Тьюринга за его пионерские работы по созданию базовых интернет-протоколов и вдохновляющее лидерство в создании сети интернет, посвятил свою лекцию прошлому, настоящему и будущему компании Google, вице-президентом которой он является в настоящее время. Он сообщил, что по оценкам Google на 2016 год человечество использует 10–15 миллиардов устройств, подключённых к сети интернет (ноутбуки, планшеты, телефоны, облачные хранилища данных), а людей, использующих эти устройства, насчитывается около 3–3.5 миллиардов. Таким образом, на человека приходится 3–5 устройств. В планах Google на 2036 год оснастить интернетом 1 триллион устройств. При этом, на человека будет приходиться 100 устройств, среди которых появятся домашние роботы и автомобили, управляемые по сети. Также в своём докладе Сёрф рассказывал об истории создания интернета и об основных принципах работы интернет-протоколов. Упоминались и роботы-собаки, которые уже созданы компанией Boston Dynamics, и межпланетный интернет, который только планируется создать в сотрудничестве с NASA.

Лекции Нобелевских лауреатов были чрезвычайно интересными и мотивирующими. Все мы пытались получить от лауреатов не столько знания, сколько перенять их опыт и подход к науке. Они же, в свою очередь, пытались нас вдохновить и заинтересовать настолько, насколько это было возможно. После лекций лауреатов оккупировали толпы заинтересованных молодых учёных, стараясь задать максимальное количество вопросов. Благо на это было время не только после лекций, но и во время завтраков, обедов, ужинов, прогулок и между ними. Вопросы были разные: начиная с того, за чем будущее и заканчивая тем, как совмещать личную жизнь и науку. Стараясь получить от встречи максимум пользы, мы проводили время в кругу наших коллег – молодых учёных и Нобелевских лауреатов с раннего утра и до позднего вечера. Тем не менее, приходя затемно в гостиничный номер, мы старались ещё раз обдумать всё, что произошло за этот насыщенный событиями день и

отложить у себя в памяти моменты, цитаты и мысли этого дня. Утром всё начиналось заново, как будто это был первый день.

К концу встречи в Линдау мы пообщались практически со всеми Нобелевскими лауреатами, были на интереснейших лекциях, обсуждениях и вечерах. Мы стали более воодушевлёнными, амбициозными, целеустремлёнными. У нас появилось множество контактов с учёными по всему миру. Мы взглянули на мир по-новому и сами стали другими. Чтобы заниматься наукой. Чтобы постигать этот мир. Они напомнили нам о том, насколько высокими должны быть цели, насколько великими должны быть идеи, насколько ярок должен быть в глазах огонь. Это то, чего нам так часто не хватает, когда мы работаем над повседневными задачами, порой теряя из виду общий ход вещей, забывая, к чему мы движемся. Мы получили этот бесценный опыт, проведя неделю с величайшими людьми современности, которые смогли расширить границы познания человечества.

А. А. Шухин

Премия им. М. Л. Блатта 2016

Премия им. М. Л. Блатта для работников вспомогательных подразделений КФТИ КАЗНЦ РАН за доброжелательное отношение к научным работникам и добросовестный многолетний труд вручается уже девятнадцатый раз и в этом году была присуждена Учёным советом КФТИ электромонтёру по ремонту и обслуживанию электрооборудования Лисину Николаю Александровичу и заместителю главного бухгалтера Хабибуллиной Валентине Ивановне.



Николай Александрович Лисин



Валентина Ивановна Хабибуллина

Общий стаж работы Лисина Николая Александровича в нашем институте – более 14 лет. Научные работники института отмечают, что Лисин Николай Александрович – квалифицированный специалист, свою работу выполняет всегда качественно, без нареканий и в срок. Его отличает доброжелательное отношение к просьбам сотрудников, даже если это не относится к его прямым обязанностям. Он коммуникабелен, к нему всегда можно обратиться за помощью и консультацией.

Стаж работы Хабибуллиной Валентины Ивановны в институте составляет более 12 лет. Она отличный работник высокой квалификации, всегда доброжелательна к сотрудникам. Когда идёшь в нашу бухгалтерию – знаешь, что Валентина Ивановна обязательно найдёт время и поможет решить порой непростые для нас финансовые проблемы.

Поздравляем Николая Александровича и Валентину Ивановну, благодарим за многолетнюю квалифицированную работу, чуткое и доброжелательное отношение к сотрудникам института. Желаем крепкого здоровья и благополучия.

В. Н. Лисин,
председатель комитета по присуждению
премии им. М. Л. Блатта

Международная премия им. Е. К. Завойского 2016

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.

Церемония вручения этой престижной премии в 2016 году проходила в традиционном формате. Лауреат был выбран международным комитетом в следующем составе: К. М. Салихов (Казань, Россия), председатель, и члены: Данте Гаттески (Флоренция, Италия), К. А. МакЛохлан (Оксфорд, Великобритания), К. Мёбиус (Берлин, Германия), Дж. Х. Фрид (Итака, США), и Б. М. Хоффман (Чикаго, США). В начале 2016 года комитет обратился примерно к 50 самым авторитетным специалистам в области ЭПР с письменной просьбой назвать кандидата. Одновременно объявление о приёме выдвижений было опубликовано в Амперовском бюллетене и “EPR newsletter”, официальном органе Международного общества ЭПР (ЭСР). Были рассмотрены все кандидатуры, названные до 1 апреля 2016 года. В результате широкого обсуждения всех кандидатур решение комитета было единодушным – премию 2016 разделили профессор Майкл Боуман (Университет Алабамы, Тускалуса, США) и профессор Арнольд Райцимринг (Университет Аризоны, Тусон, США).

Лауреаты были отмечены за выдающийся вклад в развитие импульсного ЭПР и его приложений в радиационной химии и молекулярной биофизики.

За двадцать пять лет существования этой премии, высокого звания лауреата был удостоен 31 выдающийся учёный из разных стран мира (в 1994 году, в ознаменование 50-летней годовщины открытия ЭПР, было названо три лауреата, в 2004 году, в ознаменование 60-летней годовщины открытия ЭПР, было названо два лауреата, в 2014 году, в ознаменование 70-летней годовщины открытия ЭПР, было названо два лауреата, и в 2015 тоже два лауреата), среди них три представителя России – проф. Я. С. Лебедев, проф. В. А. Ацаркин и наши земляки, акад. К. А. Валиев и акад. К. М. Салихов, а также фирма Брукер БиоСпин.

Вручение премии им. Е. К. Завойского является значительным событием в культурной жизни Республики Татарстан и сопровождается рядом мероприятий. К церемонии вручения приурочивается ежегодная международная конференция “Современные достижения магнитного



Вручение премии им. Е. К. Завойского. Слева направо: Василь Габтелгаязович Шайхразиев, Арнольд Моисеевич Райцимринг, Майкл Боуман, Кев Минуллинович Салихов. Фото С. Камалетдинова.

резонанса". В 2016 году она проходила в период с 31 октября по 4 ноября. Церемония вручения премии проходила 31 сентября в здании Академии наук Республики Татарстан. В ней участвовали докладчики конференции, а также учёные и студенты университетов и научно-исследовательских институтов Казани. Председатель собрания академик К. М. Салихов объявил решение международного комитета. Заместитель Премьер-министра Республики Татарстан Василь Габтелгаязович Шайхразиев вручил профессору Майклу Боуману и профессору Арнольду Райцимрингу дипломы лауреатов, медали и денежные чеки, и поздравил их. Лауреатов тепло поздравили вице-президент АН РТ проф. В. В. Хоменко, проректор КФУ Д. А. Таюрский, и президент Международного общества ЭПР (ЭСР) проф. Х. Охта. Лауреатам были переданы поздравления от имени издательства Шпрингер, президента Амперовского комитета проф. Б. Блюмиха и президента Международного общества магнитного резонанса проф. Д. Гольдфарб.

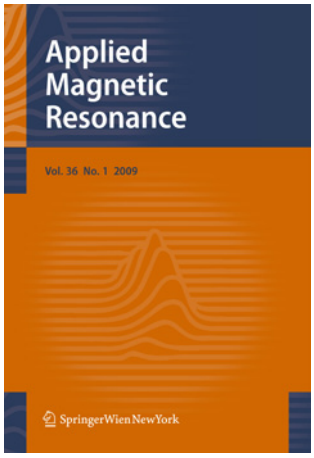
Профессор М. Боуман сделал доклад "Электронный транспорт и преобразование энергии: уроки протеинов". Профессор А. М. Райцимринг сделал доклад "Многочастотный ЭПР/ЭНДОР для структурных приложений в биологии".

Торжественное собрание сопровождалось выступлением струнного квартета "Кантилена".

Во время своего пребывания в Казани лауреаты посетили музей истории КФУ, где экспонируется экспериментальное оборудование Е. К. Завойского, и достопримечательности Казани.

Л. В. Мосина,
ученый 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: 2015 – 0.884.

Журнал индексируется в Science Citation Index, Science Citation Index Expanded (SciSearch), Journal Citation Reports/Science Edition, SCOPUS, INSPEC, Chemical Abstracts Service (CAS), Google Scholar, Academic OneFile, Current Contents/Physical, Chemical and Earth Sciences, EI-Compendex, Gale, GeoRef, INIS Atomindex, OCLC, Referativnyi Zhurnal, SCImago, Summon by Serial Solutions.

"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 2016 году редакцией подготовлен 47-й том журнала, состоящий из двенадцати выпусков. Среди них – специальный выпуск, посвящённый роли методов магнитного резонанса для исследований в области спиновой физики, спиновой химии и спиновой технологии (гостевые редакторы профессора Павел Г. Баранов (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Российская академия наук, Санкт-Петербург, Россия) и Владимир Дьяконов (Университет Вюрцбурга, Вюрцбург, Германия). В этом выпуске собраны оригинальные статьи, демонстрирующие все аспекты магнитного резонанса и разнообразие применений его методов.

Л. В. Мосина,
заместитель главного редактора

“EPR newsletter”: на пороге 15-летнего юбилея Казанской редакции издания

“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 www.epr-newsletter.ethz.ch (с любезного согласия руководства Федеральной Технической Высшей Школы, Цюрих, Швейцария), а печатные копии изготавливает типография “Печатное Дело ЛаПлум и Сыновья” (Лоуренс, Массачусетс, США). Филиал фирмы Брукер БиоСпин в Биллерике (Массачусетс, США) занимается распространением печатных копий вестника. В конце 2002 года по решению МОЭ редакция “EPR newsletter” была переведена из Центра ЭПР в Милуоки (Висконсин, США) в Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН.

В декабре 2015 года нас настигла печальная весть о кончине профессора Линна Белфорда, выдающегося исследователя, великолепного наставника, потрясающей личности и основателя-редактора. Поэтому естественно, что в первом выпуске 2016 года колонка In Memoriam [2, с. 10–14] посвящена Линну Белфорду и содержит статьи его коллег и друзей: Лоуренс Берлинер, Денни Частин, Гидеон Френкель, Марк Нилджес, Джон Пилброу, Александер Шилайн, Алекс Смирнов и Харольд. Свортс отдали должное его многим талантам и разнообразной деятельности. Детальная информация о профессиональной карьере Линна Белфорда содержится на сайте www.chemistry.illinois.edu/news/in-memoriam/2015belford-linn.html.

Напоминаю, что Артур Швайгер собрал в электронном виде все двенадцать томов “EPR newsletter”, подготовленных под редакцией Линна Белфорда. Четыре выпуска тома 12 находятся на сайте www.eprnewsletter.ethz.ch. Обращайтесь ко мне, если вы хотели бы получить тома 1–11.

Нам очень повезло, что в колонке Tips and Techniques [3, с. 13–17] Аарон Бланк пригласил нас в турне по своей лаборатории, описывая актуальные усилия по преодолению ограничений низкой чувствительности, грубого спектрального разрешения в томографии, и высокой сложности и дороговизны оборудования. Это путешествие оказалось исключительно вдохновляющим и поучительным. Присоединяйтесь!

Регулярная колонка Awards, как всегда, стала местом встречи для умудрённых исследователей и молодого поколения: Мурали К. Черукури (Серебряная медаль МОЭ за по биологии/медицине 2015) как представитель первых и Илия Каминкер (Премия МОЭ для молодых учёных 2015), Тошихиде Ямасаки (Премия Азиатско-тихоокеанского общества ЭПР для молодых учёных 2014), Юта Мацуока (Премия Общества спиновой науки и технологии для молодых учёных 2014) и Шунсуке Фуруя, Хидето Мацуока, Хиронори Ямагучи, Хиронобу Ясуи (все Премия Общества спиновой науки и технологии для молодых учёных 2015) в качестве последних [3, с. 4–12].

Кстати, в 2016 году Клаудия Тейт [4, с. 4, 5] сделала хет-трик, получив три престижные награды для молодых ЭПР-исследователей: Брукеровскую премию за PhD диссертацию, премию Джона Вайля и премию Улдерико Сегре (последнюю она разделила с Джорджем Катсейлом). Этот уникальный, на сегодня, результат задаёт высокую планку для следующего поколения молодых учёных.

Чтобы отметить 80-летний юбилей Кева Минуллиновича Салихова (статья к его 70-летнему юбилею была написана Юрием Дмитриевичем Цветковым и Юрием Николаевичем Молиным (см. 16/4, с. 9)), Вольфганг Любитц пригласил Кева Минуллиновича написать статью на произвольную тему в колонку Guest of the Issue [4, с. 6–8]. В своей статье Кев Минуллинович размышляет о роли шанса в научном исследовании и делится с нами своим алгоритмом успешного исследования. Судя по великолепным результатам, которые он получил, используя его, этот алгоритм, несомненно, работает.

Рады сообщить, что Елена Багрянская, вице-президент МОЭ (Азиатско-тихоокеанскому регион) и президент Российского общества ЭПР, избрана президентом Азиатско-тихоокеанского общества ЭПР, а Сабина Ван Доорслаер, помощник редактора (Европа), избрана президентом Европейской федерации групп ЭПР.

По-прежнему, наша редакция видит своей задачей найти хорошую балансировку различных колонок журнала, чтобы сделать его и поучительным, и занимательным, и вовлекать всё больше молодых учёных в сферу наших интересов, что нам и удаётся делать.

Отчёт о работе Общего годичного собрания МОЭ 2016 (озеро Байкал, Листвянка, Россия) [5, с. 3–5] детализирует деятельность МОЭ и даёт наглядную картину тенденций развития общества.

Надеюсь, что этот краткий путеводитель по просторам нашего издания разожжёт твоё любопытство, дорогой читатель, и ты предпримешь попытку узнать все подробности жизни ЭПР сообщества. Добро пожаловать на наш сайт (www.eprnewsletter.ethz.ch)!

Как и исследовательская работа, выпуск “EPR newsletter” – это работа команды. Будучи редактором “EPR newsletter”, я исключительно счастлива, что сотрудничаю с



командой замечательных коллег: членами правления МОЭ; помощниками редактора Кандис Клуг (Северная и Южная Америки) (также колонка New EPR Faculty), Хитоши Охта (Азиатско-тихоокеанский регион), and Сабина Ван Доорслаер (Европа) (также колонка Present Meets Present); Кис Эрл (колонка Tips and Techniques), Вольфганг Любитц (колонка Guest of the Issue), Джон Пилброу (колонка "EPR newsletter" Anecdotes), и Штефан Штоль (колонка Software); Сергей Ахмин, наш технический редактор, чьей креативностью нельзя не восхищаться; Евген Полыгач, наш очень ответственный вебмастер; и Скотт Мортон (типография "Печатное Дело ЛаПлум и Сыновья").

Мы рады, что сохранили всех спонсоров на страницах наших выпусков: Bruker BioSpin, GMW, JEOL Japan & USA, L&M EPR Supplies, Molecular Specialties, Norell, Research Specialties, Scientific Software Services, Wilmad-LabGlass, Keycom, Cryogenic Ltd., Adani Systems, Magnettech GmbH, Active Spectrum, и Virginia Diodes, Inc., довольны качеством презентации их рекламных материалов, а богатое разнообразие содержания "EPR newsletter", привлекая внимание научного содружества учёных, применяющих методы магнитного резонанса в своих исследованиях, делает информацию о продукции наших спонсоров доступной широкому кругу научной общественности.

Несомненно, это так называемая "win-win" ситуация.

Казанская редакции на пороге своего пятнадцатилетия, возраста энергии и задора, и мы открыты всем вызовам нового времени.

Литература

1. Мосина Л.В.: Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2015. Ежегодник (Салихов К.М., ред.), с. 181–182. Казань: КФТИ 2016.
2. EPR Newsletter **26**, no. 1 (2016)
3. EPR Newsletter **26**, no. 2 (2016)
4. EPR Newsletter **26**, no. 3 (2016)
5. EPR Newsletter **26**, no. 4 (2016)

Л. В. Мосина,
главный редактор

Репортаж с торжественного заседания, посвящённого проводам старого и встрече Нового 2017 года

Несмотря на то, что 2016 год был достаточно тяжёлым, на праздновании наступающего Нового года это никак не могло отразиться и поэтому большинство сотрудников института собрались в актовом зале 29 декабря, чтобы по доброй традиции встретить 2017 год в дружном коллективе.

Перед торжественным заседанием был организован небольшой фуршет и каждый желающий мог приподнять себе настроение бокалом шампанского и сфотографироваться с нашей нарядной красавицей – Ёлочкой. Торжественное заседание открыл директор института Алексей Алексеевич Калачёв. Он поздравил сотрудников с наступающим Новым годом и отметил самые важные события в жизни института в уходящем году.

Торжественную часть продолжил дуэт всем уже знакомых ведущих Сергея Хантимерова и Валерии Воробьёвой.



Фотосессия у нарядной Ёлочки: Альбина Сиафетдинова, Татьяна Гаврилова и Артемий Шмелёв.



Вручение почётной грамоты и бессрочного удостоверения сотрудника КФТИ ветерану КФТИ с.н.с. Г. С. Шакурову от председателя профкома Р. М. Ерёминой.

По сложившейся традиции ведущие начали с поздравления наших юбиляров, разделив их на группы по временам года, где большинство юбиляров (7 сотрудников) пришлось на летний период. Далее были вручены премии им. М. Л. Блатта, лауреатами которых стали Валентина Ивановна Хабибуллина и Николай Александрович Лисин. Затем ведущие перешли к представлению новых сотрудников, а также тех, кто год назад был ещё аспирантом, а теперь стал полноценным сотрудником института.

Какой же торжественный вечер без музыкального номера? На сцену была приглашена Людмила Мингалиева (лаб. СХСФ), которая спела замечательную песню из репертуара Тамары Гвардцители. После музыкальной паузы ведущие представили и познакомили институт с новыми аспирантами, которые только-только начинают делать свои первые серьёзные шаги в науке, а также поздравили лауреатов стипендии им. Б. М. Козырева – Николая Лядова и стипендии им. Н. С. Гарифьянова – Тимура Салихова, и призёров грантов КФТИ.

Для поздравления ветеранов института слово было передано председателю профкома КФТИ Рушане Михайловне Ерёменой и члену профкома Владимиру Алек-



Шуточное поздравление с наступающим Новым годом от в.н.с. Николая Константиновича Соловарова.



Музыкальное поздравление от Людмилы Мингалиевой.



Спортивный конкурс, в котором были задействованы абсолютно все гости торжественного вечера.

сеевичу Шустову. Ветеранам института были вручены почётные грамоты и бессрочные удостоверения, позволяющие в любое время посещать институт.

Увлекательно прошла спортивная часть вечера. Слово было передано председателю Совета молодых учёных КФТИ Линару Гафиятуллину, который поздравил победителей соревнований по лыжным гонкам, волейболу и настольному теннису, а также вручил специальную грамоту “Спортсмен года КФТИ” Валентине Ивановне Хабибуллиной. В завершении спортивной части был проведён конкурс с воздушными шарами, в котором были задействованы абсолютно все гости вечера.

Затем желающим было предложено поздравить своих коллег с наступающим Новым годом, и с данной ролью замечательно справился Николай Константинович Соловаров, который прочитал поздравительный шуточный стих.

По доброй традиции торжественный вечер завершился гимном КФТИ и коллективными фотографиями. Затем официальная часть вечера плавно перетекла в не-



Коллективное фото сотрудников института на торжественном вечере.

формальное празднование, где всех сотрудников ожидала дискотека с конкурсами и призами.

Торжественный вечер (подготовка программы, создание презентации, праздничное оформление института, музыкальная и техническая поддержка) и дискотека были организованы силами Совета молодых учёных КФТИ при активном участии всех молодых учёных и аспирантов института, а также при поддержке дирекции и профкома КФТИ КазНЦ РАН. Фотографии предоставлены Иваном Яцыком.

Л. Г. Гафиятуллин, Т. П. Гаврилова

Выступление А. А. Калачёва на торжественном собрании, посвящённом проводам старого и встрече Нового года (29 декабря 2016 года)

Дорогие друзья!

В канун Нового 2017 года позвольте мне подвести итоги нашей работы и отметить наиболее значимые события, которые произошли в институте за прошедший год.

И, в первую очередь, прошу вас почтить минутой молчания память наших коллег, покинувших нас в уходящем году: Алексея Анатольевича Коновалова и Максута Мухамедзяновича Зарипова.

В начале февраля наш институт праздновал День Науки и день рождения КФТИ. 4 февраля состоялась выездная сессия Отделения физических наук РАН. В качестве докладчиков на ней выступили наши коллеги из академических институтов, с которыми за многие годы сложились наиболее тесные научные связи. На следующий день в Академии наук РТ состоялось торжественное заседание, посвящённое Дню российской науки и юбилею КФТИ. В зале присутствовали представители правительства Республики Татарстан, представители Российской академии наук, научная общественность города Казани, гости из Москвы, Черноголовки, Нижнего Новгорода, Санкт-Петербурга и других городов. От ОФН РАН на юбилей института приехали заместитель академика-секретаря, член-корреспондент РАН Кведер Виталий Владимирович и начальник отдела, заместитель академика-секретаря ОФН РАН, д.ф.-м.н. Истомина Наталья Леонидовна. От Правительства РТ выступил заместитель премьер-министра Республики Татарстан Шайхразиев Василь Габтелгаязович. Поздравляя всё научное сообщество республики с праздником, он особо остановился на достижениях и успехах Казанского физтеха. В связи с 70-летием институт был награждён Благодарственным письмом Президента Республики Татарстан. Кроме того, звания “Заслуженный деятель науки РТ” были присвоены Р. Н. Шахмуратову и А. А. Калачёву, а наградой “Благодарность Президента РТ” были отмечены Л. В. Мосина, С. Я. Хлебников и Р. Р. Гусева.

Важным событием уходящего года стало получение государственной аккредитации образовательной деятель-



Шайхразиев В.Г. поздравляет Р. Н. Шахмуратова с присвоением звания “Заслуженный деятель науки РТ”.



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО НАДЗОРУ В СФЕРЕ ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ

СВИДЕТЕЛЬСТВО
О ГОСУДАРСТВЕННОЙ АККРЕДИТАЦИИ

Свидетельство о государственной аккредитации образовательной деятельности КФТИ.





Благодарность Президента РТ вручается гл. бухгалтеру КФТИ Р. Р. Гусевой и к.ф.-м.н.. С. Я. Хлебникову.

ности нашего института. Это стало возможным благодаря большой работе, проведённой в течение нескольких месяцев группой наших сотрудников: Воронковой В.К., Валидовым А.А., Митрофановой Т.Г., Коноваловым Д.А., Коноваловой Т.А., Аджалиевым Ю.А., Хлебниковой А.Ф.

Летом прошли выборы экспертов РАН. В этой связи так и хочется процитировать Нильса Бора: “Эксперт – это человек, совершивший все возможные ошибки в очень узкой специальности”. Таковыми стали десять сотрудников нашего института.

Значимым событием в жизни института явилось проведение осенью этого года ставших уже традиционными церемонии вручения премии им. Е. К. Завойского и конференции “Modern Development of Magnetic Resonance”. На этот раз лауреатами премии им. Е. К. Завойского стали профессор Майкл Боуман (США) и профессор Арнольд Райцимринг (США) за выдающийся вклад в развитие импульсного электронного парамагнитного резонанса и его приложений в радиационной химии и молекулярной биофизике. Несомненно, ярким событием прошедшей конференции явилось чествование доктора физико-математических наук, профессора, действительного члена Российской академии наук, академика Академии наук Республики Татарстан, лауреата Ленинской и государственной премий, научного руководителя нашего института Кева Минуллиновича Салихова в связи с его восьмидесятилетием.

В уходящем году научная деятельность наших сотрудников была отмечена премиями и почётными наградами. За безупречный труд и высокие достижения в профессиональной деятельности ФАНО России наградило почётной грамотой учёного секретаря института Воронкову В.К. и объявило благодарность заместителю директора Аджалиеву Ю.А. 26 октября 2016 г. состоялась церемония награждения лауреатов Казанской молодёжной научной премии им. Е. К. Завойского в области физики. Лауреатом премии стал сотрудник КФТИ Суханов А.А., награждённый дипломом 1 степени.

В этом году был получен ряд новых грантов. Начались работы по инициативным проектам РФФИ под руководством Р. М. Баязитова, В. К. Воронковой, Х. Л. Гайнутдинова, А. Л. Степанова и А. В. Шкаликова. Получен грант РФФИ на проведение исследования молодым учёным под руководством Р. М. Ерёминой. Мне особенно приятно отметить гранты, полученные нашими молодыми сотрудниками: А. Г. Шмелёвым, А. В. Леонтьевым и Т. П. Гавриловой в рамках конкурса РФФИ “Мой первый грант”, а также победителей конкурса программы “Умник” Д. О. Акатьева и Д. А. Турайханова.

Желаю всем здоровья и успехов в наступающем 2017 году. С Новым годом!

СМИ О СОТРУДНИКАХ ИНСТИТУТА

День российской науки и 70-летие Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского отметили в Казани*



5 февраля в Академии наук Республики Татарстан состоялось торжественное собрание, посвящённое Дню российской науки и 70-летию Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского.

В мероприятии приняли участие Мякзюм Салахов, президент Академии наук РТ; Василь Шайхразиев, заместитель премьер-министра Татарстана; Ильшат Гафуров, ректор Казанского федерального университета; Наталья Истомина, начальник отдела, заместитель академика-секретаря Отделения физических наук РАН по научно-организационной работе; академики и сотрудники аппарата Академии наук РТ, учёные и преподаватели казанских вузов.

Василь Шайхразиев поздравил учёных Татарстана с Днём российской науки от имени Президента республики Р. Н. Минниханова. За вклад в развитие науки были вручены именные премии, государственные награды. Заместитель премьер-министра РТ и президент Академии наук РТ также наградили победителей Республиканского молодёжного конкурса научных грантов и премии. По традиции на мероприятии по случаю Дня российской науки чествовали научные династии Татарстана. В этом году в центре внимания были династии Песошиных и Асылгараевых.

Значительным событием, отмеченным вниманием на торжественном собрании, стал 70-летний юбилей Казанского физико-технического института, который носит имя выдающегося учёного Евгения Константиновича Завойского. Институт является одним из ведущих мировых центров в области развития радиоспектроскопии и применения радиоспектроскопических методов в физике, химии, материаловедении и медицине. В настоящее время в КФТИ продолжают активно развиваться иссле-



* Статья размещена на сайте журнала “Элита Татарстана” 5 февраля 2016 г. (http://www.elitat.ru/?rub=39&st=18365&type=3&s=1) и приводится с любезного разрешения редакции журнала. Автор Диана Галлямова. Фото Виталия Яечишина.

дования, связанные с синтезом и модификацией новых функциональных материалов, оптическими квантовыми технологиями, нанотехнологиями.

Коллектив института поздравили со знаменательным юбилеем первый Президент Татарстана Минтимер Шаймиев, Председатель Государственного Совета республики Фарид Мухаметшин, коллеги из Российской академии наук. Говоря о современных перспективах знаменитого института, отдавали должное ветеранам науки, в частности, директору КФТИ, выдающемуся учёному, подвижнику Кеву Минуллиновичу Салихову.

В финале мероприятия прозвучал гимн физтеха, который вся собравшаяся аудитория слушала стоя в знак уважения и солидарности многолетней работе коллег на благо российского общества и науки.

Юбилей института*

8 февраля в стране будет отмечаться день российской науки. Учёные – народ непростой, потому спорят даже по поводу своего профессионального праздника. Некоторые из них всё ещё считают таковым день советской науки, что приходится на третье воскресенье апреля. Мы же решили накануне официально действующего дня науки обратиться к 70-летней истории знаменитого казанского института имени Завойского.

Именно погружаясь в историю этого института, его основателя, учёных, что работали и работают в его стенах, можно проследить и славную историю казанской физической школы, а самое главное – выявить образ того самого нетривиального, талантливого и востребованного во всех отношениях учёного, что был, есть и будет славой российской державы. О жизни крупнейшего физического института России рассказывает корреспондент Алсу Ахметзянова.

Военные годы... Зарплаты не хватало на буханку хлеба. Учёный Евгений Завойский работал неистово. С помощью приборов, большую часть из которых собрал сам, искал ядерный магнитный резонанс. Однако выяснилось, что наблюдал за электронным парамагнитным резонансом.

Так, благодаря одному только физическому явлению, в Казани открыли целый научный институт, названный именем самого Завойского, что само по себе уже демонстрирует важность открытия.

Применение электромагнитного излучения ограничено разве что фантазией и оборудованием для исследований. Первое, что приходит на ум, – это томографы, которые уже активно используются в татарстанских больницах. Второе – окрашивание драгоценных камней, что можно применить в ювелирной промышленности. Но важнее, что алмазы и сапфиры при этом меняют свои физические свойства, что оценят в области промышленных технологий. Вообще, с помощью излучения можно выявить структуру любого вещества.

“Белок – например, в кристалле, и в естественной среде – например, в жидкости, функционирует по-разному, – рассказывает Руслан Зарипов, с.н.с. лаборатории спиновой физики и спиновой химии. – Мы можем пометить разные участки белка парамагнитными метками, которые мы видим. И если мы наберём большое количество этих данных, то мы можем говорить уже о микроструктуре этого белка”. Как заставить одну молекулу доставить лекарство другой молекуле – вопрос и к этой лаборатории в том числе.

Расчёты прочности беспилотников и КамАЗов, создание прибора для очистки водоёмов – это лишь малая часть прикладных разработок, которых становится всё больше. Но не всегда исследования фундаментальной науки находят своё применение на рынке. Такого и быть не может.

“Поэтому важно, на мой взгляд, поддерживать самые разные направления, – считает директор КФТИ Алексей



С корреспондентом беседует директор института Алексей Калачёв.

* Сюжет показан в передаче “Итоги недели” 7 февраля 2016 г. на телеканале “KZN”. Корреспондент Алсу Ахметзянова. Операторы Шавкат Ахманов и Рустем Зилялиев.





Сотрудники лаборатории спиновой физики и спиновой химии Андрей Суханов и Руслан Зарипов.



Сотрудник лаборатории быстропротекающих молекулярных процессов Артемий Шмелёв.

Калачёв. – Какое из них выйдет вперёд – пока непонятно, но в каком-то направлении, что называется, “выстрелит”.

Перспективы есть у квантового компьютера. Кто его реализует, тот и будет владеть миром – по аналогии с расхожей фразой.

“Мы исследуем новый кристалл. Он используется для оптического квантового компьютера, мы же исследуем его методом ЭПР для характеризации его структуры”, – рассказывает Андрей Суханов, с.н.с. лаборатории спиновой физики и спиновой химии.

В институте изучаются сверхбыстрые явления – например, как повернётся молекула за фемтосекунду, а это десять в минус пятнадцатой степени.

“Сейчас в науке это очень востребованные времена, хочется узнать, что происходит в химических веществах на этих временах. Более того, химической реакцией можно управлять при помощи света – это новое, интересное, неизведанное”, – рассказывает Артемий Шмелёв, н.с. лаборатории быстропротекающих молекулярных процессов

Юным учёным опыт и знания передать не жалко корифею Института Завойского Кеву Салихову.

Кев Салихов руководил институтом почти три десятка лет. Помнит времена, когда престиж учёного зашкаливал. Но грустные моменты пережить тоже пришлось.

“Так не окажется, что все разбегутся, никто наукой заниматься не будет. Этого не произойдёт точно. Дело в том, что быть учёным – это быть немного больным”, – считает К. М. Салихов.

Однако ничто человеческое учёным не чуждо. Впервые за последние четверть века в Казани построили дом для молодых специалистов. Руслан Зарипов, который на работе с воодушевлением рассказывал о своих исследованиях, с некоторым смущением показал будущие аппартаменты, куда он переедет с семьёй.

В служебные квартиры въедут молодые учёные институтов Российской академии наук. Осталось найти дом для ещё одного наследия Евгения Завойского – его приборов. В музее-лаборатории представлена лишь малая часть оборудования, причём до сих пор работающего, несмотря на семь десятков лет.

“Остальное пылится в подвалах, – сетует создатель и хранитель музея-лаборатории Завойского в КФУ Игорь Силкин. – Иностранцы говорят, что у них тоже кое-что есть, но их удивляет, что у нас всё работает!”

К своим 70-ти годам Институт имени Завойского помолодел. Всё чаще учёному около 35 лет. А мы успели побывать лишь в трёх лабораториях из двух десятков, услышать о небольшой толике открытий и исследований, но здесь верится в то, что фундаментальная наука продолжает жить.

Наука в радость*



Кев Салихов, научный руководитель Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского Казанского научного центра РАН.

Казань прославили многие известные учёные – Николай Лобачевский, Александр Бутлеров, Александр Арбузов, Евгений Завойский… Этот список можно продолжать, но важно то, что город не живёт былой славой, в его новейшей истории немало блестящих специалистов. Среди них – Кев Салихов, действительный член Российской академии наук и Академии наук Татарстана, научный руководитель Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского Казанского научного центра РАН, главный редактор международного журнала "Applied Magnetic Resonance", почётный гражданин Казани, один из лидеров мировой науки в области электронного парамагнитного резонанса. В этом году он будет отмечать своё 80-летие.

– Кев Минуллинович, прежде чем переехать в Казань и посвятить свою дальнейшую судьбу физико-техническому институту им. Е. К. Завойского, Вы практически 25 лет проработали в Академгородке Новосибирска, где прошли все послевузовские ступени научного становления, добились больших успехов, получили почётные награды. С чем же был связан Ваш переезд в Казань?

– Сначала отмечу, что важной вехой в моём послевузовском становлении как учёного стала учёба в аспирантуре Института высокомолекулярных соединений Академии наук СССР в Ленинграде. Моими замечательными учителями были Михаил Волькенштейн и Юлий Готлиб. После Ленинграда в течение года по распределению я проработал в Политехническом институте в Караганде. Там успел создать семинар по теоретической физике. Но вскоре стал научным сотрудником лаборатории Владислава Воеводского в Институте химической кинетики и горения Сибирского отделения Академии наук СССР. В лаборатории и во всём Академгородке была исключительно творческая атмосфера. С большим удовольствием и признательностью вспоминаю моих коллег. Особо хотел бы отметить плодотворное сотрудничество с Николаем Бажиным, Кириллом Замараевым, Татьяной Лешиной, Александром Марьясовым, Александром Миловым, Юрием Молиным, Петром Пуртовым, Арнольдом Райцимрингом, Ренадом Сагдеевым, Юрием Цветковым, Валерием Юдановым. В качестве физика-теоретика мне удалось внести ощутимый вклад в реализацию нескольких крупных научных проектов, в создание физических основ магнитных и спиновых эффектов в химических реакциях, теоретических основ современной импульсной спектроскопии электронного парамагнитного резонанса. Книги, написанные по этим проблемам с моим участием, были изданы и в нашей стране, и за рубежом, они широко используются.

Всё хорошо складывалось. К моменту, когда мне предложили принять участие в конкурсе на должность директора Казанского физико-технического института, я уже был лауреатом Ленинской премии, которая являлась одним из высших знаков признания достижений учёного в СССР. Самое главное, мне очень импонировала сама атмосфера Академгородка. Но любому человеку всегда даются в жизни шансы на что-то новое, и надо принимать оптимальное решение. Если вам предложили новую работу или какой-то интересный проект, не отвергайте сразу, обдумайте, взвесьте все за и против и только тогда откажитесь или согласитесь. Мне предложили поехать в Казань в самый разгар перестройки, в 1988 году. А перед этим, буквально за месяц, я получил приглашение уехать в США, заниматься наукой в одном из университетов. Это предложение не вызвало у меня энтузиазма, ведь от добра добра не ищут, меня устраивали условия работы в Новосибирске. Но когда услышал про Казань, не мог остаться равнодушным. Во-первых, это город, где я учился в университете. А самое главное, основная область моей научной деятельности – электронный парамагнитный резонанс, который открыт именно в Казани (КГУ) Евгением Завойским. И вдруг меня приглашают сюда, на родину знаменитого открытия, в институт, который основал и где трудился сам Евгений Константинович! Такой подарок судьбы нельзя было игнорировать. И я приехал в Татарстан. В Новосибирске у меня были аспиранты, но я не руководил лабораторией или группой. Аспиранты приходили, защищали диссертацию и уходили в другие места

* Статья размещена на сайте журнала "Элита Татарстана" 5 августа 2016 г. (http://www.elitat.ru/?rub=51&st=18975&type=3) и приводится с любезного разрешения редакции. Корреспондент Альбина Хазиева.

работать. Многие не верили в благополучный исход моей затеи. Думали, что или я не выдержу долго, или меня не выдержат долго в качестве директора. Однако судьба распорядилась так, что ещё четыре раза меня переизбирали директором института, всего – 27 лет руководства. Работа мне в радость.

В 70-е и 80-е годы прошлого века у некоторых учёных сложилось впечатление, что ЭПР как бы исчерпывает себя. Но я был убеждён, что ЭПР имеет неограниченный потенциал для развития и, прежде всего, для применения в физике, химии, биологии, медицине, материаловедении, археологии и так далее. Как директор Института имени Завойского поставил перед собой цель создать в институте центр совершенства (Center of excellence) ЭПР спектроскопии, спин-зависящих процессов и спиновых технологий. Мне хотелось доказать вселенское значение открытия электронного парамагнитного резонанса. Коллеги в институте поддержали. Думаю, у нас многое получилось. Когда истёк срок моих полномочий директора, я выступил на учёном совете института с отчётом. При этом испытал чувство удовлетворения от хорошо проделанной работы.

Переезд в Казань преподнёс мне подарок судьбы. Мне посчастливилось принять самое активное участие в создании Академии наук Татарстана. Она была учреждена Указом Президента Татарстана Минтимера Шариповича Шаймиева. 30 сентября этого года исполняется 25 лет столь историческому событию. Академия наук РТ дала мне совершенно новые степени свободы, дала возможность вносить вклад в реализацию крупных проектов, например, в создание Фонда НИОКР, создание Татарской Энциклопедии и Атласа Татарстана, позволила общаться с учёными разных областей науки.

– А как Вас принял в то время коллектив института? Вы ведь для них были человеком со стороны, хотя и известным учёным…

– Приняли сначала настороженно. Это естественно, новому руководителю надо доказывать на практике, что он из себя представляет. Сотрудникам не столько важны прежние достижения директора, сколько то, как он проявит себя на деле здесь и сейчас. Меня знали заочно, с некоторыми мы пересекались на конференциях раньше, но одно дело общаться как коллеги и другое дело – как руководитель с подчинёнными. Я понимал, что должен сделать что-то очень значимое для института за небольшой срок для того, чтобы в меня поверили.

В академическом институте почти с 50-летней историей и с хорошей репутацией не было своего учёного совета по защите кандидатских и докторских диссертаций. О нём ходатайствовали, но безрезультатно. Поэтому, когда я поднял тему о необходимости создания учёного совета, на меня посмотрели скептически: мол, очередная утопическая идея молодого директора. Я добился поддержки в отделении физических наук АН СССР, был на приёме у председателя ВАКа и убедил его в обоснованности нашего предложения. В результате уже через два месяца после старта было принято решение о создании в институте учёного совета по защите диссертаций. Думаю, это способствовало появлению единомышленников в моей работе как директора.

Ещё одним важным шагом в этом же направлении стало создание международного журнала по магнитному резонансу “Applied Magnetic Resonance” (“Применение магнитного резонанса”). Когда я выступил с этой идеей, в институте к ней отнеслись без особого энтузиазма. Все знали, что тогда создание нового журнала было очень непростым делом. Я провёл переговоры с коллегами из ГДР, ФРГ, Швейцарии и заручился их поддержкой. Собрав целый пакет документов, отправился в отдел Академии наук СССР, который занимался изданием научных журналов. Меня там огорошили: мол, лет через пять рассмотрим вашу заявку, но обещать ничего не можем. Пришлось идти к начальнику отдела и “нажимать” на то, что речь идёт об издании международного уровня. Предстояло добиваться разрешения через президиум РАН, отдел ЦК КПСС, Министерство связи РФ. Во время осеннего общего собрания Академии наук СССР в 1988 году сумел получить поддержку президента Академии наук СССР Гурия Марчука и встретиться с заведующим отделом пропаганды и агитации ЦК КПСС. Именно его поддержка играла решающую роль. Я сказал ему, что нам не нужна бумага (она в то время была в дефиците), мы сами её найдём, просто разрешите выпускать журнал. Объяснил, что в стране – родине электронного парамагнитного резонанса нет специализированного научного издания, которое бы способствовало поддержанию нашего приоритета в этой важной области науки. Он тут же дал указания своему помощнику. Вот так и получилось. Потом представители Министерства связи страны высказывали своё недовольство: как это так, без нашего ведома сразу обращаетесь в ЦК. С тех пор прошло 26 лет. Журнал по своим показателям в России среди лидеров, и в мире нас хорошо знают. Вот сегодня по Интернету присылают свои работы учёные, а ведь мы начинали эту деятельность, когда не было Интернета и в помине. Представьте, где-нибудь в Южной Африке местный физик запечатывает свою статью в конверт и пишет адрес: Казань, ул. Сибирский тракт… Для него это тогда всё равно что в космос отправить весточку. И, конечно, многим любопытно было, где же находится Казань.

В связи с 25-летием журнала академик РАН Юрий Николаевич Молин сказал, что это издание стало одним из немногих успешных проектов перестройки. Перестройка нам всем запомнилась скорее печальным опытом, нежели положительным, но некоторые проекты того времени оказались удачными.

– Вы упомянули про особую атмосферу в Академгородке Новосибирска. Что Вы имели в виду – хорошую материально-техническую базу или что-то ещё? В Казани было по-другому?

– Я имел в виду не столько материально-техническую базу, хотя это тоже важно, сколько научную свободу, возможность не зацикливаться на себе и своём мнении, а желание и умение выслушать коллег, умение дать научный отпор оппоненту, не переходя на личности. Если бы вы видели, как проходили и сегодня проходят семинары, конференции в Академгородке Новосибирска, вы бы меня поняли. Там бывает такая "рубка", такие жаркие дискуссии, что, кажется, воздух воспламенится. Никто не боится задавать вопросы или противостоять коллеге, отстаивать свою точку зрения. Но это не означает, что вы будете врагами до конца жизни. Нет, после семинара, как ни в чем ни бывало, оппоненты общаются, забыв о разногласиях по науке. В Казани я постарался сделать всё для того, чтобы перенести эту атмосферу в институт. В определённой степени это удалось. К нам приходили на семинары из вузов Казани, и многие не понимали, как аспиранты не боятся оппонировать профессорам. А в науке это надо, так же как и задавать вопросы, даже самые глупые. Только так и рождается истина.

– Кев Минуллинович, мы нередко ругаем чиновников, говоря, что они многого не понимают в реальных запросах учёных, врачей, педагогов. Но Вам удалось получить их поддержку и при издании журнала, и при создании учёного совета…

– Можно, конечно, просто обратиться с ходатайством, запросом в нужные структуры, как многие и делают, и считать, что совесть чиста, даже если ничего не получилось. Некоторые рассуждают так: "Я ведь попытался что-то сделать, обратился с письмом, как положено, а раз игнорируют, значит, не судьба". Но это пассивная позиция. Если вы действительно болеете за свой коллектив как руководитель, если вам важен исход дела, тогда не отступайте. Чиновники тоже люди, им надо объяснять, приводить чёткие аргументы, анализировать. Как правило, они закончили те же университеты, что и учёные. Да, в моём случае, скажем, чиновник ничего не понимает в электронном парамагнитном резонансе, но он и не должен в нём разбираться, это совсем не его задача. Объясните, зачем ваш проект нужен, какую пользу принесёт для общества, города, республики. Тогда он поймёт. Обязательно поймёт. К примеру, когда я доказывал необходимость создания учёного совета в нашем институте, у меня был главный козырь: Казань – родина электронного парамагнитного резонанса, в нашем институте трудился первооткрыватель этого явления, у которого остались ученики и т.д. То есть, понимаете, нужны аргументы, а не просто желание.

– Вы почти 30 лет возглавляли институт, но директорская должность подразумевает решение, в первую очередь, организационных, хозяйственных вопросов. А у Вас хватало времени на то, чтобы плодотворно при этом заниматься наукой?

– Безусловно, я не прекращал заниматься наукой и не согласился бы руководить институтом, если бы лишился возможности на собственные исследования, разработки, открытия. Именно в конце 1980-х – начале 1990-х годов я активно стал изучать ЭПР при фотосинтезе и даже получил за свои результаты в этой области Гумбольдтовскую премию (государственная награда Германии). Также был избран членом (феллоу) института проблемных исследований Берлина, что дало мне возможность целых девять месяцев вместе с семьёй находиться в этом институте и заниматься там наукой. Если говорить конкретно, то в исследовании механизма превращения солнечной энергии в химическую методами спектроскопии ЭПР мне удалось сделать несколько интересных теоретических предсказаний, которые получили экспериментальное подтверждение.

Фотосинтезом продолжаю заниматься и сейчас, к примеру, следующей проблематикой. Есть растения и низшие организмы, которые выдерживают длительную засуху и низкие температуры: не погибают, а терпеливо ждут неделями, месяцами, когда пойдёт дождь. Оживают потом, как случилось в сказке со спящей красавицей. Вот мы пытаемся сейчас понять молекулярный механизм выживаемости таких систем, и если сможем раскрыть секрет, тогда его реально можно будет использовать, например, для защиты сельскохозяйственных культур, которые боятся засухи. Ещё одна идея, которая меня давно увлекает – создание квантового компьютера с использованием электронных спинов в качестве элементной базы. Для этого надо уметь синтезировать специальные молекулярные архитектуры. Теоретически мы всё рассчитали, проанализировали и знаем, что именно надо сделать. Но, к сожалению, в России трудно найти химика, который владеет секретом синтезирования молекул с заданной архитектурой расположения парамагнитных центров. Импульсные методы современной ЭПР-спектроскопии позволяют управлять состоянием спинов в ходе реализации квантовых вычислений. Нами разработаны необходимые протоколы для квантовых вычислений на электронных спинах.

– Будем надеяться, что выход будет найден. А кто обеспечивает Вам надёжный тыл? Расскажите, пожалуйста, о Вашей семье.

– Моя супруга – тоже учёный, и до переезда в Казань она тоже работала, мы вместе трудились в Академгородке. Став пенсионером, она увлеклась живописью. Её картины выставлялись в нескольких странах. У нас двое детей. Дети нас очень радуют тем, что выросли трудолюбивыми. А воспитывать детей (сына и дочь) помогала тёща, замечательная женщина. И поэтому, когда слышу анекдоты про тёщу, категорически с ними не согласен. Я всё время в работе, не удавалось должное время детям уделять. А сегодня у нас уже внуки взрослые. Общаемся с ними чуть ли ни ежедневно по телефону и по скайпу. Внуки также радуют нас своими успехами в учёбе.

Старшая внучка в возрасте 17 лет опубликовала книгу о её видении проблемы взаимоотношений взрослых с подростками. Книга вызвала немалый интерес.

– Вы наверняка объездили полмира. Где Вам больше всего понравилось?

– Да, конечно, я неоднократно бывал за границей. С детства мечтал увидеть голубое небо Адриатического моря, родину Вальтера Скотта (Эдинбург) и волны Тихого океана. Эдинбург так и не увидел. Пока. Но мне очень нравятся Байкал, природа Сибири, Волга и Кама, марийские леса, многие другие места. Россия настолько необъятна и многогранна, что её надо познавать и познавать. А поскольку я ещё и рыбак, то не упускаю возможности во время мероприятий в других регионах порыбачить на новом озере или речке. Мечтаю порыбачить в верховьях Вятки, в речках северного Урала.

– Кев Минуллинович, какой подарок от коллег Вы бы хотели получить на своё 80-летие?

– Вы меня сильно озадачили, не знаю, что и сказать. К счастью, у меня много коллег. Это и сотрудники в родном физтехе, и члены родной Академии наук Татарстана, и сотрудники институтов Казанского научного центра РАН, многие профессора университетов Казани. Я убеждён, что для меня лучше, если мои коллеги, все, кто меня окружает, с кем мне приходится взаимодействовать по работе и по жизни, преуспевают во всём и имеют хорошее здоровье. Моя "корысть" при этом состоит в надежде, что у них будет возможность протянуть мне руку помощи, если это понадобится.

– Спасибо Вам, Кев Минуллинович, за содержательную беседу, и дальнейших успехов Вам в научных поисках!

Премию им. Завойского вручили молодым казанским учёным*



26 октября в Казанском университете в девятнадцатый раз вручили Премию имени Е. К. Завойского. Её лауреатами стали молодые учёные-физики, чьи теоретические и практические наработки получили высокую оценку авторитетного жюри.

Церемония состоялась в Музее истории Казанского университета. Приветствуя участников, первый проректор КФУ Рияз Минзарипов рассказал о заслуге Евгения Константиновича Завойского – знаменитом открытии явления парамагнитного резонанса – и подчеркнул, что многие из тех, кто в своё время получил молодёжную премию его имени стали известными учёными, руководителями научных проектов. Того же он пожелал и сегодняшним лауреатам: все они находятся в начале своей научной карьеры, однако успехи, которых им удалось достичь, уже показывают их талант и высокий профессионализм. "А "вложения" в "молодую науку" в виде таких конкурсов и премий в конечном счёте всегда положительно сказываются на успехе всей страны", – добавил гость церемонии, представитель мэрии Казани как соучредителя премии, глава комитета по делам детей и молодёжи исполкома Казани Айрат Фаизов.

С приветственным словом также выступили директор Института физики КФУ Сергей Никитин и врио директора КФТИ КазНЦ РАН Алексей Калачёв.

Среди победителей оказались сразу два представителя КФУ. Так, дипломом второй степени наградили Ларису Нуртдинову, научного сотрудника НИЛ магнитной радиоспектроскопии и квантовой электроники им. С. А. Альтшулера за исследования свойств ультрафиолетового лазера. Победителем же стал исследователь новых

* Статья размещена на сайте КФУ 26 октября 2016 г. (http://astrochallenge.kpfu.ru/515-2/). Заметки на эту тему опубликованы так же на сайтах информационного агенства "Татар-информ" (http://www.tatar-inform.ru/news/2016/10/27/525885/), газеты "Республика Татарстан" (http://rt-online.ru/premiyu-imeni-e-k-zavojskogo-vruchili-molodym-uchenym/), газеты "Комсомольская правда" (http://amp.kazan.kp.ru/online/news/2550566/) и официального портала мэрии Казани (http://www.kzn.ru/news/56242-molodym-uchenym-kazani-vruchili-premiyu-zavojskogo).

областей применения электромагнитного резонанса из НИЛ ЯМР-структур Сергей Ефимов. Свое заслуженное первое место он разделил с коллегой из КФТИ им. Е. К. Завойского Андреем Сухановым.

Всего же на последнем этапе конкурса за премию сражались 10 представителей четырёх высших учебных заведений. Всем финалистам, не попавшим в тройку сильнейших, вручали почётные дипломы: такой получили Тимур Биктагиров (КФУ), Булат Галимзянов (КФУ), Олеся Салихова (КФУ), Нияз Бейсенгулов (КФУ), Радик Зайнуллин (КГЭУ), Сергей Петряков (КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева) и Алексей Чиннов (КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева).

Напомним, что премия была учреждена в 1997 году в честь 90-летия со дня рождения Евгения Завойского. Она присуждается по результатам конкурса, в котором могут принять участие молодые исследователи из Казани и Татарстана, занимающиеся разработками в области прикладной и экспериментальной физики. При этом раньше премией награждали только за достижения в дальнейшем изучении явления парамагнитного резонанса. В последние же годы распространение получили исследования, связанные не с “чистой” физикой, но с пограничными с ней областями: например, физики работают над исследованиями для медицины или нефтехимии. Сегодня такая “междисциплинарность”, благодаря своей результативности, становится всё более востребована, а потому и жюри прошедшего конкурса не могло отметить такие работы.

В Академии наук РТ двум профессорам из США вручили международную премию имени Завойского*



Сегодня в Академии наук Татарстана состоялась торжественная церемония вручения международной премии имени Евгения Завойского 2016 года – её получили американские профессора Майкл Боуман и Арнольд Райцимринг за выдающийся вклад в развитие импульсного электронного парамагнитного резонанса и его приложений в радиационной химии и молекулярной биофизике.

Международная премия имени Завойского была учреждена в 1991 году по инициативе академика РАН и АН РТ Кева Салихова. Насколько она престижна среди физиков мира, говорит уже то, что оба лауреата прилетели в столицу Татарстана, а также то, что в зале АН РТ на церемонии вручения премии находились учёные не только из разных регионов России, но и дальнего и ближнего зарубежья, представители международного общества ЭПР.

Боуман работает в Университете Алабамы, Тускалуса, США. Он получил в 1988 году американскую ежегодную награду в области разработок и исследований R&D-100 – за фурье-спектрометр электронного спинового резонанса и серебряную медаль по химии международного общества ЭПР в 2003 году.

Его научные интересы сфокусированы на реакциях свободных радикалов в протеинах и других упорядоченных, но некристаллических окружениях и на приложениях импульсной спектроскопии ЭПР к определению структуры и функции ферментов, свободных радикалов и материалов.

Райцимринг работает в Университете Аризоны, Тусон, США. Он получил в 1988 году государственную премию СССР за исследования электронного спинового эха и в 2016 году был избран почётным членом международного общества ЭПР. Его научные интересы сфокусированы на комплексном решении проблем, связанных с использованием хелатов Gd (III) для измерения расстояний в биологических объектах методами импульсного электронного парамагнитного резонанса.

Премию лауреатам вручили вице-премьер РТ Василь Шайхразиев и академик Кев Салихов, с поздравлениями выступили представители руководства КФУ, АН РТ, Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского, международного общества ЭПР.

* Статья размещена на сайте газеты “БИЗНЕС Online” 31 октября 2016 г. (https://www.business-gazeta.ru/article/327146) и приводится с любезного разрешения редакции.

Кев Салихов: “Где ещё, кроме науки, человек может полностью реализовать себя!”*



“Вы ведь будете спрашивать о прошлом, а меня больше вдохновляет будущее”, – так немножко неожиданно началось наше интервью с академиком Российской академии наук и Академии наук Татарстана, лауреатом Ленинской премии и Государственной премии РТ, научным руководителем Казанского физико-технического института имени Завойского Казанского научного центра РАН, доктором физико-математических наук Кевом Салиховым (на снимке). 3 ноября учёному исполняется 80 лет.

– Кев Минуллинович, а что именно в будущем вдохновляет?

– У меня много планов, на что ещё можно направить свои усилия. Я для себя пока окончательно не решил, на чём остановлюсь. Знаете, немножко удивляет, когда люди моложе меня высказываются в том духе, что, мол, мы старики, что с нас взять… Взять можно ещё много. Я, возможно, напишу какую-то серию книг. Или буду ездить с лекциями по школам. Готов встречаться со школьниками в самых дальних деревнях и сёлах Татарстана. Мы должны разъяснять, что такое наука, чем она конкретно занимается. Я и в прежние годы был большим активистом общества “Знание” и особенно любил ходить в школы и воинские части. Когда работал в Новосибирском академгородке, было немало случаев, когда приходили студенты и говорили: вот мы вас послушали и пошли на физфак…

– В Вашей жизни были учителя, сыгравшие такую же большую роль?

– В моей жизни много людей сыграло большую роль. Сначала, конечно, семья. Я вырос в маленькой татарской деревне в Башкирии. Нас было четверо братьев (я младший) и две сестры, и у меня очень рано появились обязанности, за выполнение которых я отвечал. В нашем доме был культ работы, не сделать порученное тебе дело было невозможно. Мне всё интересно, я всегда нахожу момент творческой радости в том, чем занимаюсь.

Русскому языку я научился от мальчика, которого в войну к нам эвакуировали из Ленинграда. У нас в деревне школы не было, и в первый класс я пошёл в русскую школу в соседнюю деревню. А после четвёртого класса отец отвёз меня в лучшую школу района, в райцентр, километров за двенадцать от дома. С тех пор я всегда жил на квартире. Мальчика из татарской деревни сначала не хотели в эту школу брать, взяли условно, чтобы после первой четверти посмотреть, на что я способен. А там выяснилось, что у меня лучшие оценки в классе. И потом у меня всегда были только пятёрки в табеле.

– Откуда взялось такое стремление к учёбе?

– Трудно сказать, но я помню, что всегда был среди сверстников немножко белой вороной. Все время внутри шёл напряжённый мыслительный процесс – я что-то продумывал, анализировал… И вот попал в эту школу, где было несколько выдающихся учителей. И первая, кого вспоминаю, – учительница истории Татьяна Константиновна Максимова. Она научила нас главному – как нужно учиться. Составила план, по которому я читал книги. До этого самая толстая книга, которую я прочёл, был “Сын полка”. А тут я какое-то время жил на квартире у заведующей районной библиотекой, квартира была в одном доме с собственно библиотекой, и я просто с ума сходил от счастья и читал всё подряд.

Но любимым предметом у меня была математика. Её нам преподавали тоже замечательные педагоги. У одной из них, Веры Ивановны, муж преподавал физику в районном педучилище, и она водила меня к нему, чтобы тот со мной занимался.

– Так Вы и стали физиком?

– Вообще, в школе меня называли философом. Но что такое философия, я тогда и не знал. Поехал поступать в Казанский университет на физмат, на математическое отделение. Писал заявление, и тут вдруг подходит знакомая девочка, выпускница нашей школы. Говорит: “Да ты что, все мальчики на физике учатся!” Вот так я стал физиком. Самое яркое впечатление от учёбы – время, проведённое в читальном зале университетской библиотеки. Лекции кончались, я шёл туда и до закрытия там сидел. Читал всё – и что нам преподавали, и чего не преподавали…

– Когда поняли, что Вам интересна именно наука?

---

* Статья опубликована в газете “Республика Татарстан” (вып. 161 (28155)) 1 ноября 2016 г. (http://rt-online.ru/kev-salihov-gde-eshhe-krome-nauki-chelovek-mozhet-polnostyu-realizovat-sebya/) и приводится с любезного разрешения редакции. Автор Евгения Чеснокова.

– Вообще, мне было всё интересно, я всегда нахожу момент творческой радости в том, чем занимаюсь. Я и комсоргом курса был, и членом университетского комитета комсомола – заведовал учебным сектором, и в Ленинской эстафете капитаном факультетской команды. На четвёртом курсе писал работу у Семена Александровича Альтшулера на кафедре теоретической физики, и в какой-то момент он мне сказал, что есть решение развивать полимерные технологии, в университете будут готовить соответствующих специалистов, и меня рекомендовали в эту группу. Если я соглашаюсь, то еду писать диплом в Институт высокомолекулярных соединений в Ленинград. И я согласился. А потом остался там в аспирантуре.

Там была редкостная лаборатория, которой руководил Михаил Владимирович Волькенштейн – исключительно талантливый, разносторонний человек. И в этой лаборатории я нашёл себя. Помню, приехал в Казань защищать диплом, и Лев Бажанов – был у нас такой секретарь комитета комсомола – говорит, что его переводят в Москву, в комитет по молодёжным делам, и он хочет меня с собой взять. И вот тогда я сделал выбор в пользу науки. Я понял, что наука даёт человеку практически всё: горечь поражения, радость победы, счастье общения с интересными людьми. Здесь можно творить, переживать самые разные эмоции.

– Вы выбрали довольно сложный путь в науке – теоретическую физику…

– Я глубоко убеждён, что физика учит, как решать жизненные проблемы, как подходить к ним. А квантовая механика – это просто достояние человечества!

– Многие просто не понимают квантовую механику…

– Главное в ней – не какие-то технические вещи. Она учит нас, что работает, и весьма успешно, совершенно другая, непривычная нам логика. Вот мы рассуждаем – о, этот трус, а тот герой. А квантовая механика говорит: возможна суперпозиция состояний, когда он и трус, и герой одновременно. Как тот самый кот Шредингера, который одновременно может быть живым и неживым. То есть в суперпозиции состояний в зависимости от внешних обстоятельств может быть и так, и так.

Ещё одним важнейшим моментом квантовой механики является то, что измерение необратимым образом может изменить состояние системы. Если на людей перевести: можно так провести над человеком какое-то внешнее измерение – в широком смысле, контроль, скажем, или допрос, что он может стать только трусом…

– То, что называется “сломать”…

– Если хотите, один из вариантов. И поэтому правильно делают, что в судебной практике показания, данные под давлением, не принимают во внимание. Или ещё. Если над квантовой системой очень часто проводить какие-то измерения, смотреть, в каком она состоянии, квантовый компьютер перестаёт считать. Вот нам надо контролировать, на каком этапе находится счёт, но если очень часто спрашивать компьютер об этом, он перестаёт считать. Разве не жизненно? Если родители каждые пять минут будут спрашивать ребёнка, выполнил ли он урок, он его не выполнит. Это надо понимать. Есть много систем, которые живут по другой логике. Поэтому я считаю: квантовая механика замечательна тем, что она преподносит нам уроки, она ближе к жизни, чем кажется большинству.

– Будучи выпускником Казанского университета, Вы долгие годы работали в Новосибирске. Как получилось, что снова вернулись в Казань?

– В какой-то момент меня привлекли к научной проблеме, связанной с явлением электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), которое ещё в сороковых годах прошлого века открыл Евгений Константинович Завойский в Казанском университете. И я знал, что именно в Казани очень сильные профессора занимаются этой проблемой. Но в какой-то момент они начали отставать в своих исследованиях – занимались исключительно теорией, не искали новые пути практического применения. С нашей новосибирской группой в мире считались в этом вопросе больше, чем с казанцами. Мне это было несколько обидно. И вот в перестройку, когда начались выборы руководителей, в Казанском физтехе решили поменять директора и мне предложили принять участие в выборах. Я никогда не был никаким начальником, даже завлабом. К тому же когда я на выборы приехал, мне сказали, что тут уже всё решено, изберут кого-то своего. И когда я выступал, то уже знал, что меня не выберут. Поэтому просто сказал всё, что я о них думаю. Что институт, созданный Завойским, должен быть первым в области ЭПР, а считаются в мире с совершенно другими учёными. Высказал весь свой протест. И ушёл потом пить чай. А меня выбрали…

– Чем Вас так увлёк именно электронный парамагнитный резонанс?

– Я считаю, это явление имеет вселенское значение. Но этого не поняли, когда Завойский только сделал своё открытие, поэтому ему не дали Нобелевскую премию. А в последние годы стало приходить понимание возможностей ЭПР. Это выдающийся метод исследования вещества, его строения, динамики химических реакций. На его основе создаются спектрометры, дозиметры, разрабатывается система контроля качества продуктов.

Или вот фотосинтез – важнейший процесс в живой природе. В его изучении и освоении ЭПР играет огромную роль, мы рассчитываем с помощью ЭПР создать искусственную систему, которая могла бы приблизиться к фотосинтезу.

В эти дни у нас в институте проходит конференция “Современные достижения магнитного резонанса”, я там представил пленарный доклад “Почему ЭПР спасёт

мир”. У нашей цивилизации много вызовов – пресная вода, энергетика, глобальное потепление… ЭПР может внести свою лепту в решение этих задач.

Каждый год мы вручаем премию имени Завойского лучшим мировым учёным, внёсшим вклад в исследование ЭПР, проводим конференцию, на которую приезжают учёные со всего мира. Это свидетельство того, что теперь Казанский физтех получил заслуженное признание в этой области.

– Что ещё Вы считаете своим достижением на посту директора КФТИ, который занимали 27 лет?

– Думаю, мы подняли за эти годы стандарты науки. Традиции стали создавать в институте. Премия Завойского и ежегодная конференция – традиция, издание собственного ежегодника и регулярный общеинститутский семинар – тоже. Но главное – мы выстроили нормальные человеческие отношения. Поскольку в основном живём на работе, я всегда считал, что люди здесь должны чувствовать себя комфортно. Я, например, никогда не вмешивался в чужую компетенцию, не устанавливал жёсткий контроль над учёными. Не исключаю, что кто-то мог этим злоупотребить. Но каждый раз, когда я чувствовал, что стою перед выбором – или принять правильное, но конфликтное решение, или не очень правильное, но человеческое, выбирал второе.

Может быть, я сделал здесь не всё, что было можно. Но сколько мог, я сделал. И, думаю, вполне могу ещё быть полезным и науке, и обществу.

– А что Вы думаете о сегодняшних отношениях науки и общества?

– Меня расстраивает сложившаяся ситуация, потому что отношение к науке, считаю, в целом неправильное. Общество должно понять: учёные – это люди, натренированные на то, чтобы решить поставленную задачу. Они социально очень активны и ответственны. И их надо использовать более эффективно. Но в сложившейся ситуации есть и вина самих учёных. Они в последнее время не слишком себя утруждали тем, чтобы объяснять людям, что же они делают. В этом плане, считаю, учёные в большом долгу перед обществом. Я много раз убеждался, что, если по-хорошему разъяснить, например, чиновнику, чем мы занимаемся, он проникнется этим и примет нужное для нас решение. А если ты самому простому человеку не можешь объяснить, что делаешь, то зачем ты этим вообще занимаешься?

Книга “Физическая наука в Татарстане”



В 2016 году в издательстве Академии наук РТ вышла в свет книга Г. Х. Галимуллиной и А. Б. Насибуллиной “Физическая наука в Татарстане”.

Книга посвящена истории развития физической науки в Казанском университете, Казанском физико-техническом институте им. Е. К. Завойского и других научных учреждениях Татарстана и охватывает период с 1804 г. до наших дней. В издании приведены биографические и библиографические данные многих учёных, научные интересы которых были связаны с физикой.

В числе прочих, читатель найдёт в книге главы, посвящённые Казанскому физико-техническому институту, кафедре химической физики физического факультета КФУ, организованной по инициативе профессора К. М. Салихова, а также международной премии им. Е. К. Завойского и журналам “Applied Magnetic Resonance” и “EPR newsletter”.

В главе о КФТИ рассказано об открытии Е. К. Завойским явления электронного парамагнитного резонанса в 1944 г. в Казани, что способствовало учреждению физико-технического института. В главе также приведены биографии директоров института – Н. Г. Чеботарёва, Х. М. Муштари, М. М. Зарипова, К. М. Салихова и дан обзор фундаментальных исследований, которые ведутся в институте в настоящее время.

В главе о международной премии им. Е. К. Завойского расскзано об истории учреждения премии в 1991 году по инициативе директора КФТИ К. М. Салихова и о лауреатах премии.

Главы “Applied Magnetic Resonance” и “EPR newsletter” посвящены международным изданиям, редакции которых расположены в КФТИ.

Монографическое исследование издано в рамках выполнения государственного задания Института татарской энциклопедии и регионоведения Академии наук РТ на 2016 год по теме “Казань. Иллюстрированная энциклопедия”.

ЦИФРЫ И ФАКТЫ

2016 год в цифрах

Кадры (на 31 декабря 2016 г.)

Уволены

1. Гимазов И.И., лаборант-исследователь
2. Саликеев В.А., слесарь-сантехник
3. Тимербулатов Г.Ш., инженер-исследователь
4. Зарипов М.М., г.н.с.
5. Петрушкин С.В., с.н.с.
6. Иванин К.В., н.с.
7. Галялтдинов М.К., инженер-исследователь
8. Симонов А.О., м.н.с.
9. Соколов М.Б., водитель
10. Обухов С.М., слесарь-сантехник
11. Аглуллина С.Ф., уборщик служебных помещений
12. Халикова Т.И., маляр
13. Иряшова А.Б., м.н.с.
14. Гарипов Р.Р., м.н.с.
15. Леонтьев А.В., слесарь-сантехник
16. Коробова Н.С., маляр
17. Милордова Е.О., м.н.с.

Приняты

1. Тиркия А.А., инженер
2. Шарипова Л.А., лаборант-исследователь
3. Гусев А.В., бухгалтер
4. Усманов Р.М., водитель
5. Гарипов Р.Р., м.н.с.
6. Гоенко И.А., м.н.с.
7. Камашев А.А., н.с.
8. Ханипов Т.Р., м.н.с.
9. Шестаков А.В., м.н.с.
10. Алескеров Э.Б., бухгалтер
11. Файзрахманов К.М., слесарь-сантехник
12. Валиуллов Р.В., м.н.с.
13. Тагиров Л.Р., в.н.с.
14. Кривченко А.И., слесарь-сантехник

Численность сотрудников

- Общая численность – 219 (из них 25 совместителя)
- Научных сотрудников – 126 (из них 10 совместителей)
- Действительных членов РАН – 1
- Действительных членов АН РТ – 1
- Член-корреспондентов АН РТ – 1
- Докторов наук – 29 (из них 4 совместителя)
- Кандидатов наук – 69 (из них 8 совместителей)

Средний возраст (лет)

- Докторов наук – 64.3
- Кандидатов наук – 47.8
- Научных сотрудников без степени – 39.9

Финансирование (в тыс. руб.)

Общий объём – 114124.3

- Федеральный бюджет – 83205.0, в т.ч.:
  - выполнение гос. задания – 74701.40
  - Программы фундаментальных исследований (Президиума, ОФН и ОНИТ РАН) – 6578.7
  - услуги по аспирантуре – 497.60
  - организация и проведение научной школы – 111.20
  - выплата стипендий аспирантам – 881.50
  - проведение капитального ремонта недвижимого и особо ценного движимого имущества – 434.50
- Российский научный фонд – 17000.0
- Российский фонд фундаментальных исследований – 2749.2, в т.ч.:
  - компенсация расходов организации, необходимых для выполнения проектов РФФИ – 2249.8
  - инициативный молодёжный проект – 400.0
  - организация всероссийских и международных научных мероприятий (MDMR-2016) – 100.0
- Министерство образования и науки РТ (услуги по организации и проведению международной конференции MDMR-2016) – 1366.7

- Академия наук РТ – 2370.0
- Договора НИР, контракты – 4877.0
- Прочие поступления – 2140.6

Публикации

- Монографии – 2
- Сборники – 5
- Главы в книгах – 4
- Статьи: всего – 145, из них:
  – в зарубежных журналах – 73
  – в отечественных журналах – 39
  – в других изданиях – 33
- Тезисы: всего – 205, из них:
  – в материалах международных конференций – 155
  – в в материалах отечественных конференций – 50

Темы государственного задания на 2016 год

1. Поиск и исследование новых систем, перспективных для квантовых компьютеров, спинтроники, оптоэлектроники и молекулярного магнетизма.
2. Создание новых функциональных нанокомпозитов и структур с улучшенными электрокаталитическими, прочностными и электродными характеристиками и их изучение микроскопическими и магниторезонансными методами.
3. Поиск и исследование новых спин-зависящих эффектов в магнетизме, оптике и акустике магнитных и парамагнитных структур различной размерности методами магниторезонансной, оптической и ультразвуковой спектроскопии.
4. Разработка ионно-лучевых и импульсно-термических методов синтеза новых нанокомпозитных материалов и микроструктур, исследование их оптических, магнитных и электронно-транспортных свойств.
5. Особенности магнитных и транспортных свойств сильнокоррелированных электронных систем, сверхпроводников на основе пниктидов железа, проблемы сверхпроводящей спинтроники.
6. Когерентная оптическая спектроскопия сверхвысокого разрешения, исследование быстропротекающих и релаксационных процессов в примесных твёрдых телах, полупроводниках и нанообъектах, разработка оптимальных режимов генерации и преобразования квантовых состояний света.
7. Разработка и развитие новых методов и средств медицинской физики, основанных на магнитной радиоспектроскопии (ЯМР-томографии, ЭПР-, ЯМР- и ЯКР-спектроскопии).

Проекты, финансируемые на конкурсной основе

Программы фундаментальных исследований Президиума РАН

1. *Актуальные проблемы физики низких температур*
– Квантовая информатика на основе оптических переходных и коллективных процессов при низких температурах. Самарцев В.В., д.ф.-м.н.
– Особенности энергетического спектра в псевдощелевой фазе сверхпроводящих соединений. Тейтельбаум Г.Б., д.ф.-м.н.
2. *Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий*
– Изучение особенностей функционирования спинового клапана для сверхпроводящего тока на основе эффекта близости сверхпроводник/ферромагнетик Гарифуллин И.А., д.ф.-м.н.
3. *Электронный спиновый резонанс, спин-зависящие электронные эффекты и спиновые технологии*
– Развитие теории и экспериментальное исследование спинового обмена между парамагнитными частицами в растворах. Салихов К.М., ак., д.ф.-м.н.
– Поиск систем и реализация квантовых логических операций с использованием электронных спинов в качестве кубитов. Салихов К.М., ак., д.ф.-м.н.
– Исследование структуры, магнитных и оптических свойств парамагнитных центров, образованных примесными ионами переходных групп в диэлектрических кристаллах. Тарасов В.Ф., д.ф.-м.н.

– Термо- и фотопереключение спиновых состояний ($S = 1/2 \leftrightarrow S = 5/2$) молекулярных спин-переменных соединений Fe(III) из основных в стабильные основные, квазистационарные и динамически неравновесные состояния с изменённым спином. Овчинников И.В., д.ф.-м.н.
– Неравновесная суперполяризация электронных спинов, индуцированная в ходе спин-зависящих молекулярных процессов. Суханов А.А., к.ф.-м.н.
– Контроль ферромагнетизма в оксидных полупроводниках, легированных 3d-элементами, путём электромиграции или инжекции кислородных вакансий. Хайбуллин Р.И., к.ф.-м.н.
– Разработка методики ЭПР-исследований неоднородных свойств материалов с сильными электронными корреляциями (сверхпроводников, топологических изоляторов и квантовых магнетиков). Таланов Ю.И., д.ф.-м.н.
– Исследования структурных, магнитных и электрических особенностей в низкоразмерных мультиферроиках. Ерёмина Р.М., д.ф.-м.н.
– Поиск и исследование новых молекулярных магнитов. Воронкова В.К., д.ф.-м.н.
– Развитие методологии определения архитектуры расположения спиновых меток в группах с помощью импульсных методов ЭПР. Зарипов Р.Б., к.ф.-м.н.
– Применение метода ЭПР-спектроскопии для исследования баланса оксида азота и супероксиддисмутаз в механизмах восстановления функций организма после экспериментальной гипокинезии. Гайнутдинов Х.Л., д.б.н.
– Разработка методики применения ЭПР-спектроскопии для контроля обмена железа в организме профессиональных спортсменов. Петухов В.Ю., д.ф.-м.н.
– Характеристики сигналов ЭМР в биологических системах и их информативность для медико-биологических исследований и медицинской диагностики. Юртаева С.В., к.-ф.-м.н.

Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН

1. *Физика новых материалов и структур*
– Создание и исследование новых материалов для оптоэлектроники и информатики. Салихов К.М., д.ф.-м.н.
– Синтез перспективных нанокомпозитных материалов на основе кремния, широкозонных полупроводников, углеродных нанотрубных слоёв и металлических наночастиц и исследование их физико-химических свойств. Сулейманов Н.М., д.ф.-м.н.; Файзрахманов И.А.
2. *Спиновые явления в твёрдотельных наноструктурах и спинтроника*
– Развитие научных основ управления оптическими, спиновыми и магнитными свойствами соединений на основе светопоглощающих и излучающих систем. Воронкова В.К., д.ф.-м.н.; Лобков В.С., к.ф.-м.н.
3. *Электронные корреляции в системах с сильным взаимодействием*
– Изучение особенностей электронных состояний в псевдощелевой фазе купратных соединений. Тейтельбаум Г.Б., д.ф.-м.н.
4. *Фундаментальная оптическая спектроскопия и её приложения*
– Когерентная оптическая спектроскопия примесных кристаллов, аморфных сред, полупроводников и гетероструктур. Самарцев В.В., д.ф.-м.н.

Программа фундаментальных исследований Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН

Элементная база квантовых компьютеров
– Синтез и исследование магнитных наноразмерных систем наноэлектроники, квантовой информатики и оптоэлектроники. Салихов К.М., д.ф.-м.н.
– Квантовый процессор на нановолоконных кольцевых резонаторах, связанных через управляемую квантовую точку. Моисеев А.С., д.ф.-м.н.

Конкурсы Российского научного фонда (РНФ)

"Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами"

Калачёв А.А., д.ф.-м.н.: Разработка базовых устройств дальнодействующей оптической квантовой связи (№ 14-12-00806)

"Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований по приоритетным тематическим направлениям исследований"

1. Гольцман Г.Н., д.ф.-м.н.: Интегральные однофотонные источники света с мультиплексированием (№ 16-12-00045)
2. Тарасов В.Ф., д.ф.-м.н.: Изотопически чистые примесные кристаллы для квантовой памяти (№ 16-12-00041)

Конкурсы Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ)

1. Бухараев А.А., д.ф.-м.н.: Изучение влияния упругих напряжений на термоассистируемый процесс перемагничивания ферромагнитных частиц (№ 15-02-02728)

2. Вавилова Е.Л., к.ф.-м.н.: Новые состояния низкоразмерных квантовых магнетиков (№ 14-02-01194)
3. Воронкова В.К., д.ф.-м.н.: Синтез и исследование фотофизических свойств функционально замещённых металлопорфиринов (MeP, Me = Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn) и полипорфириновых соединений на их основе (№ 16-03-00586)
4. Галяметдинов Ю.Г., д.х.н.: Гибридные жидкокристаллические среды с управляемой люминесценцией на основе квантовых точек и нанокластеров лантаноидов (№ 14-03-00136)
5. Гарифуллин И.А., д.ф.-м.н.: Сверхпроводящий спиновый клапан и триплетная сверхпроводимость (№ 14-02-00350)
6. Калачёв А.А., д.ф.-м.н.: Оптическая квантовая память и однофотонные источники на основе многоатомных систем и нановолокон (№ 15-02-05478)
7. Лобков В.С., к.ф.-м.н.: Новые гибридные оптические наноматериалы с высокой фотостабильностью и с управляемыми люминесцентными свойствами (№ 15-03-02544)
8. Мамин Р.Ф., д.ф.-м.н.: Размытые фазовые переходы и фазовое разделение, связанное с зарядовыми неоднородностями (№ 14-02-01154)
9. Моисеев С.А., д.ф.-м.н.: Высокоэффективная долгоживущая квантовая память на рамановском эхе в резонаторе (№ 14-02-00903)
10. Самарцев В.В., д.ф.-м.н.: Фемтосекундная когерентная спектроскопия полупроводников и гетероструктур с участием коррелированных фотонов, рождённых при двухквантовом возбуждении переходных процессов скрещенными лазерными пучками (№ 14-02-00041)
11. Шкаликов А.В., к.ф.-м.н.: Генерация однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом в процессе спонтанного параметрического рассеяния в резонаторе (№ 16-02-01055)

Грант РФФИ "Конкурс научных проектов, выполняемых молодыми учёными под руководством кандидатов и докторов наук в научных организациях Российской Федерации в 2016 году"

Ерёмина Р.М., д.ф.-м.н.: Анализ характера обменных взаимодействий в Mn-гетеровалентных оксиборатов со структурой людвигита методом электронного парамагнитного резонанса (16-32-50083 мол_нр)

Ориентированный проект

Степанов А.Л., д.ф.-м.н.: Тонкоплёночные солнечные элементы на основе пористых полупроводниковых 2D-слоёв с металлическими наночастицами (16-29-06137)

РФФИ и Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований

1. Модифицирование зонной структуры тонкоплёночного германия и исследование его оптических и электрофизических свойств (грант РФФИ № 16-52-00021 Бел_а). Руководитель с российской стороны: Баязитов Р.М., д.ф.-м.н.
2. Повышение эффективности функционирования нейронных сетей головного мозга путём контроля уровня монооксида азота после травмы мозга и/или нарушения церебрального кровотока (грант РФФИ № 16-54-00098 Бел-а). Руководитель с российской стороны: Гайнутдинов Х.Л., д.б.н.

Гранты РФ "Мой первый грант"

1. Гаврилова Т.П., к.ф.-м.н.: Создание и исследование наногранулированных композитных материалов на основе $CaCu_3Ti_4O_{12}$ и гексаферрита стронция или лантан-стронциевых манганитов с необычными магнитоэлектрическими свойствами (16-32-00660)
2. Леонтьев А.В.: Исследование динамики возбуждённых состояний ионов Ce^{3+} в кристаллах $LiY_xLu_{(1-x)}F_4$ (x = 0.1) для создания твёрдотельного генератора ультракоротких импульсов УФ диапазона спектра (16-32-00406)
3. Шмелёв А.Г., к.ф.-м.н.: Создание и исследование новых композитных материалов на основе нанокристаллитов халькогенидов кадмия для оптоэлектроники и фотоники (16-32-00397)

Региональные гранты РФФИ

1. Моисеев С.А., д.ф.-м.н.: Разработка квантовой памяти микроволнового диапазона длин волн на электронно-ядерных спиновых ансамблях (№ 15-42-02462_Поволжье)
2. Салихов К.М., д.ф.-м.н.: Исследование молекулярного механизма стабилизирующего и криопротекторного влияния трегалозы на функциональные свойства белков и белковых комплексов фотосинтетических реакционных центров (№ 15-43-02538_ Поволжье)
3. Степанов А.Л., д.ф.-м.н.: Создание при помощи ионной имплантации и исследование фракционных решёток на новых типах полимерных и композиционных наноматериалов для нужд специального машиностроения (№ 15-48-02525_Поволжье)
4. Тарасов В.Ф., д.ф.-м.н.: Димеры редкоземельных ионов для квантовой информатики (№ 15-42-02324_Поволжье)
5. Тейтельбаум Г.Б., д.ф.-м.н.: Разработка физических основ новых элементов спинтроники на базе топологических изоляторов (№ 15-42-02477_Поволжье)

Договора

1. “Экспериментальное исследование ориентационных фазовых переходов в гематите и манганитах, обусловленных воздействием внутренних и внешних магнитных и акустических полей” (рук. Богданова Х.Г.). Договор с Институтом физики металлов УрО РАН в рамках выполнения гранта РФФИ № 14-02-00260.
2. “Электронно-микроскопическое исследование морфологии и локального элементного состава образцов природного глиносодержащего сырья и техногенных отходов-модификаторов” (рук. Файзрахманов И.А.). Договор с ФГАОУ ВПО КФУ.
3. “Разработка модуля сканирования диэлектрических свойств пластового флюида скважинной лаборатории для определения свойств пласта и пластового флюида” (рук. Фаттахов Я.В.). Договор с ФГАОУ ВПО КФУ.
4. “Разработка гидродинамических маркеров для мониторинга разработки месторождений СВН” (рук. Галяутдинов М.Ф.). Договор с ФГАОУ ВПО КФУ.

Публикации сотрудников института

Монографии

1. Glass Nanocomposites: Synthesis, Properties and Applications (Karmakar B., Rademann K., Stepanov A.L., eds.). Amsteradam: Elsevier 2016.
2. Никифоров В.Г., Самарцев В.В.: Оптический эффект Керра и селективная фемтосекундная спектроскопия. М.: Тровант 2016, 185 с.

Главы в монографиях

1. Kavetskyy T.S., Stepanov A.L.: Chapter 11 “Ion-irradiation-induced carbon nanostructures in optoelectronic polymer materials” in book: Radiation Effects in Materials (Monteiro W.A., ed.), p. 287–308. InTech, 2016.
2. Stepanov A.L.: Chapter 4 “Laser annealing of metal nanoparticles synthesized in glasses by ion implantation” in book: Glass Nanocomposites: Synthesis, Properties and Applications (Karmakar B., Rademann K., Stepanov A.L., eds.), p. 115–130. Amsterdam: Elsevier 2016.
3. Stepanov A.L.: Chapter 7 “Nonlinear optical properties of metal nanoparticles in silicate glass” in book: Glass Nanocomposites: Synthesis, Properties and Applications (Karmakar B., Rademann K., Stepanov A.L., eds.), p. 165–179. Amsterdam: Elsevier 2016.
4. Kavetskyy T.S., Stepanov A.L.: Chapter 14 “Effect of gamma-irradiation and ion implantation in chalcogenide glasses” in book: Glass Nanocomposites: Synthesis, Properties and Applications (Karmakar B., Rademann K., Stepanov A.L., eds.), p. 341–358. Amsterdam: Elsevier 2016.

Сборники

1. Abstracts of the International Conference “Modern Development of Magnetic Resonance” (Salikhov K.M., ed.), Kazan, October 31–November 4, 2016. Казань: Изд-во КФТИ КазНЦ РАН 2016. 196 с.
2. Итоговая конференция молодых учёных Казанского физико-технического института КазНЦ РАН, 28 апреля 2016 года. Сб. материалов конф. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2016. 44 с.
3. Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского 2015. Ежегодник (Салихов К.М., ред.). Казань: Изд-во КФТИ КазНЦ РАН 2016. 217 с.
4. Конференция молодых учёных “Молодёжь и инновации Татарстана”, КФТИ КазНЦ РАН, 17–18 ноября 2016 года. Сб. материалов конф. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2016. 101 с.
5. Материалы XI Международной научной школы “Наука и инновации-2016” (Попов И.И., Козлов В.А., Самарцев В.В., ред.), пансионат “Яльчик”, Марий-Эл, Россия, 3–12 июля 2016. Йошкар-Ола: Изд-во ПГТУ 2016. 326 с.

Статьи, не вошедшие в предыдущий выпуск Ежегодника

1. Кадкин О.Н., Домрачева Н.Е., Овчинников И.В.: Металломезогены: ретроспективный и перспективный взгляд. Жидкие кристаллы и их практическое использование **15**, 4 (2015)
2. Новиков Г.А., Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Файзрахманов И.А., Ивлеев Г.Д., Прокопьев С.Л.: Оптическая диагностика лазерно-индуцированных фазовых превращений в тонких плёнках германия на кремнии, сапфире и кварце. ЖТФ **85**, вып. 3, 89–95 (2015)

Статьи*

1. Abdullin A.F., Pyataev A.V., Domracheva N.E., Gruzdev M.S.: Mössbauer study of the surface of core-shell type nanoparticles. J. Surf. Investigation **10**, 35–38 (2016)
2. Akbari M., Kalachev A.A.: Third-order spontaneous parametric down-conversion in a ring microcavity. Laser Phys. Lett. **13**, 115204 (1–5) (2016)
3. Akhmedzhanov R.A., Gushchin L.A., Kalachev A.A., Nizov N.A., Nizov V.A., Sobgayda D.A., Zelensky I.V.: Cavity-assisted atomic frequency comb memory in an isotopically pure $^{143}Nd^{3+}$:Y_7LiF_4 crystal. Laser Phys. Lett. **13**, 115203 (1–5) (2016)
4. Alekseev A.V., Gumarov G.G., Bakirov M.M., Petukhov V.Y., Nuzhdin V.I.: Ferromagnetic resonance investigation of magnetic anisotropy of ion-synthesized iron-silicide thin films. J. Surf. Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques **10**, no. 3, 2608–611 (2016)
5. Andrianov V.V., Pashkevich S.G., Yafarova G.G., Denisov A.A., Iyudin V.S., Bogodvid T.Kh., Dosina M.O., Kulchitsky V.A., Gainutdinov Kh.L.: Changes of nitric oxide content in the rat hippocampus, heart and liver in acute phase of ischemia. Appl. Magn. Reson. **47**, iss. 9, 965–976 (2016)
6. Ashurov M.S., Kazakova T.A., Stepanov A.L., Klimonsky S.O.: The formation of diffraction gratings by the deposition of SiO_2 colloidal microspheres. Appl. Phys. A **122**, 1054 (2016)
7. Balcı E., Rameev B., Acarv H., Mozzhukhin G.V., Aktaş B., Çolak B., Kupriyanov P.A., Ievlev A.V., Chernyshev Y.S., Chizhik V.I.: Development of earth's field nuclear magnetic resonance (EFNMR) technique for applications in security scanning devices. Appl. Magn. Reson. **47**, iss. 1, 87–99 (2016)
8. Baniodeh A., Mondal A., Galeev R., Sukhanov A., Eremina R., Voronkova V., Anson C.E., Powell A.K.: How far can the anisotropy deviate from uniaxiality in a Dy-based single-molecule magnet? Dinuclear Dy(III) complex study. Appl. Magn. Reson., online November 12 (2016) (**48**, no. 1, 101–113 (2017))
9. Batalov R.I., Bayazitov R.M., Lyadov N.M., Faizrakhmanov I.A., Shustov A.V., Ivlev G.D.: Pulsed laser annealing of highly doped Ge:Sb layers deposited on different substrates. J. Phys. D: Appl. Phys. **49**, 396102 (7 pp.) (2016)
10. Batalov R.I., Vorobev V.V., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Bayazitov R.M., Lyadov N.M., Osin Y.N., Stepanov A.L.: Fabrication of composite used on GeSi with Ag nanoparticles using ion implantation. Technical Phys. **61**, no. 12, 1861–1867 (2016)
11. Bazarov V.V., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Vorobev V.V., Osin Y.N., Stepanov A.L.: Spectral ellipsometry and electron backscattering difraction analysis of silicon surfaces implanted with silver ions. J. Appl. Spectrosc. **83**, 47–50 (2016)
12. Bogodvid T.Kh., Andrianov V.V., Muranova L.N., Gainutdinov Kh.L.: Influence of nitric oxide donors on electrical characteristics of the premotor interneurons of terrestrial snails. BioNanoScience **6**, no. 4, 320–321 (2016)
13. Chuklanov A.P., Nurgazizov N.I., Bizyaev D.A., Khanipov T.F., Bukharaev A.A., Petukhov V.Yu., Chirkov V.V., Gumarov G.G.: Investigation of strain-induced magnetization change in ferromagnetic microparticles. J. Phys.: Conf. Ser. **714**, 012006 (1–4) (2016)
14. Domracheva N., Vorobeva V., Pyataev A., Tamura R., Suzuki K., Gruzdev M., Chervonova U., Kolker A.: Magnetic properties of novel dendrimeric spin crossover iron(III) complex. Inorg. Chim. Acta **439**, 186–195 (2016)
15. Domracheva N.E., Vorobeva V.E., Pyataev A.V., Ivanova A.G.: Magnetic properties of novel dendrimericIron(III) complexes of the first generation: EPR and Mössbauer study. Appl. Magn. Reson. **47**, iss. 8, 903–913 (2016)
16. Eremina R., Gavrilova T., Yatsyk I., Fazlizhanov I., Likerov R., Shustov V., Zavartsev Yu., Zagumennyi A., Kutovoi S.: Investigations of Y_2SiO_5:Nd^{143} by ESR method. JMMM, online December 23 (2016)
17. Eremina R.M., Sharipov K.R., Yatsyk I.V., Lyadov N.M., Gilmutdinov I.F., Kiiamov A.G., Kabirov Yu.V., Gavrilyachenko V.G., Chupakhina T.I.: Magnetic properties of $(SrFe_{12}O_{19})\cdot(CaCu_3Ti_4O_{12})_{1-x}$ composites. ЖЭТФ **150**, № 1, 144–150 (2016)
18. Eremina R., Seidov Z., Ibrahimov I., Najafzade M., Aljanov M., Mamedov D., Gavrilova T., Gilmutdinov I., Chichkov V., Andreev N.: Magnetization of manganite thin films on ferroelectric substrates. JMMM, online December 23 (2016)
19. Eremina R.M., Gavrilova T.P., Yatsyk I.V., Zaripov R.B., Sukhanov A.A., Shustov V.A., Lyadov N.M., Chichkov V.I., Andreev N.V.: Magnetic resonance investigations of h-$YbMnO_3$. Appl. Magn. Reson. **47**, iss. 8, 869–879 (2016)
20. Eremina R.M., Sharipov K.R., Yatsyk I.V., Lyadov N.M., Gilmutdinov I.F., Kiiamov A.G., Kabirov Yu.V., Gavrilyachenko V.G., Chupakhina T.I.: Magnetic properties of $(SrFe_{12}O_{19})(CaCu_3Ti_4O_{12})_{1-x}$ composites. ЖЭТФ **123**, 127–133 (2016)
21. Falin M.L., Zaripov M.M., Latypov V.A.: EPR of Nd^{3+} ions in the common position in a cubic single crystal $KZnF_3$. Appl. Magn. Reson. **47**, iss. 5, 471–477 (2016)
22. Falin M.L., Latypov V.A., Leushin A.M., Korableva S.L.: EPR of Ce^{3+} in the Rb_2NaYF_6 single crystal. J. Alloys Comp. **688**, 295–300 (2016)
23. Gimazov I.I., Sakhin V.O., Talanov Yu.I., Adachi T., Noji T., Koike Y.: Superconducting fluctuations above critical temperature in the $Bi_2Sr_2Ca_{1-x}Y_xCu_2O_8$ single crystals. Magn. Reson. in Solids, Electronic Journal **18**, no 2, 16203 (5 pp.) (2016)
24. Golovchenko A.N., Andrianov V.V., Bogodvid T.Kh., Muranova L.N., Gainutdinov Kh.L.: Serotonin modulation

* Статьи, опубликованные в сборнике Ежегодник 2016, не приводятся.

of premotor interneuron excitability in the snail during associative learning. BioNanoScience no. 4, 450–452 (2016)
25. Gorshunov B.P., Torgashev V.I., Zhukova E.S., Thomas V.G., Belyanchikov M.A., Kadlec C., Kadlec F., Savinov M., Ostapchuk T., Petzelt J., Prokleš̆ka J., Tomas P.V., Pestrjakov E.V., Fursenko D.A., Shakurov G.S., Prokhorov A.S., Gorelik V.S., Kadyrov L.S., Uskov V.V., Kremer R.K., Dressel M.: Incipient ferroelectricity of water molecules confined to nano-channels of beryl. Nat. Commun. **7**, 12842 (2016)
26. Iakovleva M.F., Vavilova E.L., Grafe H.-J., Maljuk A., Wurmehl S., Büchner B., Kataev V.: Spin dynamics and ground state of the frustrated diamond lattice magnet $CoAl_2O_4$ as seen by ^{27}Al NMR. Appl. Magn. Reson. **47**, iss. 7, 727–735 (2016)
27. Ivanova T.A., Turanova O.A., Mingalieva L.V., Gilmutdinov I.F., Ovchinnikov I.V.: Electronic and magnetic properties of $[Fe(3\text{-}MeO\text{-}Qsal)_2]Y \cdot n$Solvent ($n$ = 0, 1) complexes. Magn. Reson. in Solids, Electronic Journal **18**, no. 1, 16103–16107 (2016)
28. Kandrashkin Yu.E., Poddutoori P.K., van der Est A.: Electron transfer pathways in a tetrathiafulvalene-aluminum (III) porphyrin-free-base porphyrin triad studied using electron spin polarization. Appl. Magn. Reson. **47**, iss. 5, 511–526 (2016)
29. Kashapov R.N., Peres Khusaenova E.L., Faizrakhmanov I.A., Kashapov L.N.: Ion-beam treatment of glass substrates for creation biomatrices. Indian J. Sci. Technol. **9**, no. 18, 1–5 (2016)
30. Kavetskyy T., Borc J., Rusnak J., Sausa O., Stepanov A.L.: Nanoindentation test of radiation-modified As_2S_3 glass after ^{60}Co gamma-irradiation. J. Chin. Chem. Soc. **40**, no. 11, 1–5 (2016)
31. Kavetskyy T., Nowak J., Borc J., Rusnak J., Sausa O, Stepanov A.L.: Carbonization in boron-ion-implanted polymethylmethacrylate as revealed from Raman spectroscopy and electrical measurements. Spectrosc. Lett. **49**, no. 1, 5–10 (2016)
32. Khafizov N.R., Madzhidov T.I., Kadkin O.N., Tamura R., Antipin I.S.: Quantum chemical calculation of exchange interactions in supramolecularly arranged N,N′-dioxy-2,6-diazaadamantane organic biradical. Int. J. Quantum Chem. **116**, no. 14, 1064–1070 (2016)
33. Khantimerov S.M., Togulev P.N., Kukovitsky E.F., Lyadov N.M., Suleimanov N.M.: Effect of electrochemical treatment on electrical conductivity of conical carbon nanotubes. J. Nanotechnology. Article ID 8034985 (5 pp.) (2016)
34. Knyazev A.A., Krupin A.S., Romanova K.A., Galyametdinov Yu.G.: Luminescence and energy transfer in poly(N-vinylcarbazole) blends doped by a highly anisometric Eu(III) complex. J. Coord. Chem. **69**, no. 9, 1473–1483 (2016)
35. Kokorin A.I., Zaripov R.B., Gromov O.I., Sukhanov A.A., Kálai T., Lamperth É., Hideg K.: Spin density distribution in a nitroxide biradical containing ^{13}C-enriched acetylene groups in the bridge: DFT calculations and EPR investigation. Appl. Magn. Res. **47**, iss. 9, 1057–1067 (2016)
36. Kokorin A.I., Sukhanov A.A., Gromov O.I., Arakelyan V.M., Aroutiounian V.M., Voronkova V.K.: EPR study of TiO_2 (rutile) doped with vanadium. Appl. Magn. Reson. **47**, iss. 5, 479–485 (2016)
37. Kovalchukova O.V., Ryabov M.A., Dorovatovskii P.V., Zubavichus Y.V., Utenyshev A.N., Kuznetsov D.N., Volyansky O.V., Voronkova V.K., Khrustalev V.N.: Synthesis and characterization of a series of novel metal complexes of N-heterocyclic azo-colorants derived from 4-azo-pyrazol-5-one. Polyhedron **121**, 41–52 (2017)
38. Krupskaya Y., Schäpers M., Wolter A.U.B., Grafe H.-J., Vavilova E., Möller A., Büchner B., Kataev V.: Magnetic resonance study of the spin-1/2 quantum magnet $BaAg_2Cu[VO_4]_2$. Z. Phys. Chem. 20160829, ISSN (online) 2196-7156, ISSN (print) 0942-9352 (2016)
39. Krylatykh N.A., Fattakhov Ya.V., Fakhrutdinov A.R., Shagalov V.A., Khabipov R.Sh.: Detection of explosive precursors using low-field magnetic resonance imaging and spectroscopy. Appl. Magn. Reson. **47**, iss. 8, 915–924 (2016)
40. Kutyreva M.P., Gataulina A.R., Kutyrev G.A., Ulakhovich N.A., Newman T., Khasanova E.M., Bondar O.V., Yurtaeva S.V., Ziganshina S.A., Khaldeeva E.V.: Hyperbranched polyester poly(3-diethylaminepropionate) s and their copper(II) complexes: Synthesis, characterization and biological investigation. Inorg. Chim. Acta **450**, 101–111 (2016)
41. Lapaev D.V., Nikiforov V.G., Safiullin G.M., Lobkov V.S., Knyazev A.A., Krupin A.S., Galyametdinov Y.G.: Changes in luminescentproperties of vitrified films of terbium(III) β-diketonate complex upon UV laser irradiation. J. Lumin. **175**, 106–112 (2016)
42. Leksin P.V., Garif'yanov N.N., Kamashev A.A., Validov A.A., Fominov Ya.V., Schumann J., Kataev V., Büchner B., Garifullin I.A.: Isolation of proximity-induced triplet pairing channel in a superconductor/ferromagnet spin valve. Phys. Rev. B **93**, 100502(R) (2016)
43. Leksin P.V., Kamashev A.A., Schumann J., Kataev V.E., Thomas J., Büchner B., Garifullin I.A.: Boosting the superconducting spin valve effect in a metallic superconductor/ferromagnet heterostructure. Nano Research **9**, 1005–1011 (2016)
44. Lisin V.N., Shegeda A.M., Samartsev V.V.: The application of weak electric field pulses to measure the pseudo-Stark split by photon echo beating. Laser Phys. Lett. **13**, 075202 (1–4) (2016)
45. Lyadov N.M., Bazarov V.V., Vagizov F.G., Vakhitov I.R., Dulov E.N., Kashapov R.N., Noskov A.I., Khaibullin R.I., Shustov V.A., Faizrakhmanov I.A.: Structural and magnetic studies of thin Fe^{57} films formed by ion beam assisted deposition. Appl. Surf. Sci. **378**, 114–119 (2016)
46. Mamin R.F., Tayurskii D.A.: The theory of phase transitions in systems with defects and phenomenological theory of relaxors. Ferroelectrics **503**, 133–137 (2016)

47. Mamin R.F., Strle J., Bizyaev D.A., Yusupov R.V., Kabanov V.V., Mihailovic D., Bukharaev A.A.: Magnetic field control of electric-field-induced local domain growth in manganites. Ferroelectrics **499**, 143–149 (2016)
48. Manna Kaustuv, Sarkar R., Fuchs S., Onykiienko Y.A., Bera A.K., Aslan Cansever G., Kamusella S., Maljuk A., Blum C.G.F., Corredor L.T., Wolter A.U.B., Yusuf S.M., Frontzek M., Keller L., Iakovleva M., Vavilova E., Grafe H.-J., Kataev V., Klauss H.-H., Inosov D.S., Wurmehl S., Büchner B.: Non-collinear antiferromagnetism of coupled spins and pseudospins in the double perovskite La_2CuIrO_6. Phys. Rev. B **94**, 144437 (2016)
49. Mikailzade F., Maksutoglu M., Khaibullin R.I., Valeev V.F., Nuzhdin V.I., Aliyeva V.B., Mammadov T.G.: Magnetodielectric effects in Co implanted $TlInS_2$ and $TlGaSe_2$ crystals. Phase Transitions **89**, iss. 6, 568–577 (2016)
50. Novikov H.A., Bayazitov R.M., Batalov R.I., Faizrakhmanov I.A., Ivlev G.D., Prokop'ev S.L.: Experimental study and simulation of the structure-phase transitions in deposited Ge layers during pulsed laser annealing. Solid State Phenom. **249**, 24–29 (2016)
51. Poddutoori P.K., Kandrashkin Yu.E., van der Est A.: A transient EPR study of electron transfer in a tetrathiafulvalene-aluminum(III) porphyrin-anthraquinone supramolecular triad. Z. für Phys. Chem. ISSN (online) 2196-7156, ISSN (print) 0942-9352 (2016)
52. Sakhin V., Kukovitskii E., Garif'yanov N., Talanov Yu., Teitel'baum G.: Inhomogeneous state of the Bi_2Te_3 doped with manganese. J. Supercond. Nov. Magn., online September 21 (2016)
53. Salikhov K.M., Bakirov M.M., Galeev R.T.: Detailed analysis of manifestations of the spin coherence transfer in EPR spectra of ^{14}N nitroxide free radicals in non-viscous liquids. Appl. Magn. Reson. **47**, iss. 10, 1095–1122 (2016)
54. Samartsev V.V., Leontiev A.V., Mitrofanova T.G.: Femtosecond correlated transient holography in CdS crystal under two-quantum excitation. J. Phys.: Conf. Ser. **714**, 012014 (1–5) (2016)
55. Samartsev V.V., Mitrofanova T.G.: Correlated stimulated photon echo signals under three-photon femtosecond excitation of CdSe-CdS colloidal quantum dots. Laser Phys. **26**, 125203 (1–4) (2016)
56. Seidov Z., Krug von Nidda H.-A., Tsurkan V., Filippova I.G., Gunther A., Gavrilova T.P., Vagizov F.G., Kiiamov A.G., Tagirov L.R., Loidl A.: Magnetic properties of the covalent chain antiferromagnet $RbFeSe_2$. Phys. Rev. B. **94**, 134414 (1–8) (2016)
57. Shakhmuratov R.N., Vagizov F.G., Scully M.O., Kocharovskaya O.: Application of the low finesse gamma-ray frequency comb for high-resolution spectroscopy. Phys. Rev. A **94**, 043849 (1–8) (2016)
58. Shakhmuratov R.N.: Transformation of the frequency-modulated continuous-wave field into a train of short pulses by resonant filters. Cornell University Library, arXiv.org > quant-ph > arXiv:1609.06872v1 [quant-ph] September 22, p. 1–32 (2016)
59. Shamilov R.R., Galyametdinov Yu.G., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Stepanov A.L.: The CdSe/CdS quantum dots luminescence enhancement near silver layer with the ion synthesised silver nanoparticles. J. Phys.: Conf. Ser. **735**, 012067 (2016)
60. Smirnov M.A., Mukhtarov A.S., Ivanova N.V., Vakhonina T.A., Nazmieva G.N., Nizameev I.R., Bazarov V.V., Balakina M.Yu., Sinyashin O.G.: Measurements of the electro-optic coefficients of polymer films based on branched methacrylic copolymers containing azo chromophores. Mendeleev Commun. **26**, 518–520 (2016)
61. Sukhanov A.A., Savostina L.I., Voronkova V.K., Mikhalitsyna E.A., Tyurin V.S.: Time-resolved and pulse EPR study of conjuncted porphyrin trimer. Appl. Magn. Reson. **47**, iss. 11, 1295–1304 (2016)
62. Talanov Yu., Sakhin V., Kukovitskii E., Garif'yanov N., Teitel'baum G.: Magnetic resonance study of the Bi_2Te_3 doped with manganese. Appl. Magn. Reson., online December 2 (2016) (**48**, iss. 2, 143–154 (2017))
63. Turanov A., Khitrin A.: Measurement of J-couplings between chemically equivalent nuclei using off-resonance decoupling. J. of Magn. Reson. **270**, 31–34 (2016)
64. Turanov A.N., Khitrin A.K.: Ethanol clusters in gasoline-ethanol blends. Ind. Eng. Chem. Res. **55**, 9952−9955 (2016)
65. Vasiliev A.N., Volkova O.S., Zvereva E.A., Ovchenkov E. A., Munaò I., Clark L., Lightfoot P., Vavilova E.L., Kamusella S., Klauss H.-H., Werner J., Koo C., Klingeler R., Tsirlin A.A.: 1/3 Magnetizaton plateau and frustrated ferrimagnetism in a sodium iron phosphite. Phys. Rev. B **93**, 134401 (2016)
66. Vorobeva V.E., Domracheva N.E., Gruzdev M.S.: EMR searching of quantum behavior of magnetic γ-Fe_2O_3 nanoparticles encapsulated into poly(propylene imine) dendrimer. Magn. Reson. in Solids, Electronic Journal **18**, no. 2, 16208 (2016)
67. Yafarova G.G., Andrianov V.V., Yagudin R.Kh., Shaikhutdinov I.I., Gainutdinov Kh.L.: Nitric oxide production in the rat spinal cord, heart and liver after spinal cord injury. BioNanoScience **6**, no. 4, 332–334 (2016)
68. Yoeun S., Sukhanov A., Han O.: Separation of enzymatic functions and variation of spin state of rice allene oxide synthase-1 by mutation of Phe-92 and Pro-430. Bioorg. Chem. **68**, 9–14 (2016)
69. Yurtaeva S.V., Efimov V.N., Yafarova G.G., Eremeev A.A., Iyudin V.S., Rodionov A.A., Gainutdinov Kh.L., Yatsyk I.V.: EPR detection of iron storage in rat tissues after simulated microgravity model. Appl. Magn. Reson. **47**, iss. 6, 555–565 (2016)
70. Zharkov D.K., Shmelev A.G., Leontyev A.V., Nikiforov V.G., Lobkov V.S.: Coherent control for separation of the librational response through the ultrafast optically-heterodyne-detected optical-kerr-effect (OHD-OKE). J. Phys.: Conf. Ser. **714**. no. 1, 012018 (2016)
71. Zharkov D.K., Shmelev A.G., Leontyev A.V., Nikiforov V.G., Lobkov V.S.: Femtosecond non-resonance double-pulse spectroscopy of molecular librations in

orthodichlorobenzene. Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics **80**, iss. 7, 845–847 (2016)
72. Zhevstovskikh I.V., Bersuker I.B., Gudkov V.V., Averkiev N.S., Sarychev M.N., Zherlitsyn S., Yasin S., Shakurov G.S., Ulanov V.A., Surikov V.T.: Numerical adiabatic potentials of orthorhombic Jahn-Teller effects retrieved from ultrasound attenuation experiments. Application to the SrF_2:Cr crystal. J. Appl. Phys. **119**, 225108 (2016)
73. Ziganshin M.A., Gerasimov A.V., Ziganshina S.A., Gubina N.S., Abdullina G.R., Klimovitskii A.E., Gorbatchuk V.V., Bukharaev A.A.: Thermally induced diphenylalanine cyclization in solid. J. Therm. Anal. Calorim. **125**, no 2, 905–912 (2016)

74. Акатьев Д.О., Калачёв А.А.: Частотная стабилизация однофотонного источника на основе спонтанного параметрического рассеяния света с помощью внешнего электрического поля. Компьютерная оптика **40**, № 1, 26–30 (2016)
75. Ахметов М.М., Петухов В.Ю., Гумаров Г.Г., Конов А.Б., Коныгин Г.Н., Рыбин Д.С.: Изучение пространственного строения глюконата кальция в водном растворе. Хим. физика и мезоскопия (2016) (в печати)
76. Базаров В.В., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Воробьев В.В., Осин Ю.Н., Степанов А.Л.: Анализ поверхности кремния, имплантированного ионами серебра, методами спектральной эллипсометрии и дифракции отражённых электронов. Журн. прикл. спектроскопии **83**, вып. 1, с. 55–59 (2016)
77. Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Файзрахманов И.А., Ивлев Г.Д.: Формирование напряжённых и сильно легированных слоёв германия для микро- и оптоэлектроники. Наноматериалы и наноструктуры – XXI век № 4 (2016) (в печати)
78. Баталов Р.И., Воробьев В.В., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Баязитов Р.М., Лядов Н.М., Осин Ю.Н., Степанов А.Л.: Формирование композиционного материла на основе GeSi с наночастиами Ag методом ионной имплантации. ЖТФ **86**, № 12, 104–110 (2016)
79. Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Кандрашкин Ю.Е., Мингалиева Л.В., Нургазизов Н.И., Ханипов Т.Ф.: Магнитоупругий эффект в микрочастицах пермаллоя. Письма в ЖТФ **42**, вып. 20, 24–32 (2016)
80. Важенин В.А., Потапов А.П., Асатрян Г.Р., Петросян А.Г., Ованесян К.Л., Фокин А.В., Шакуров Г.С.: Парамагнитный резонанс иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами $^{151}Eu^{2+}$. ФТТ **58**, вып. 12, 2406–2410 (2016)
81. Ванина П.Ю., Набережнов А.А., Нижанковский В.И., Мамин Р.Ф.: Температурная эволюция магнитных свойств лантан-стронциевых манганитов. Научно-технические ведомости СПбПТУ. Физ.-мат. науки **2**, № 3, 15–22 (2016)
82. Воробьев В.В., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Осин Ю.Н., Степанов А.Л.: Пористый кремний с наночастицами серебра, полученный ионной имплантацией, как потенциальный материал для солнечных элементов. Сб. трудов "Наноструктуированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики" (Кокшина А.В., Смирнов А.В., Кочаков В.Д., Афанасьева В.П., Тереуков Е.И., Бобыль А.В., ред.), с. 82–87. Чебоксары: Чувашский госуниверситет им. И. Н. Ульянова 2016.
83. Галеев Р.Т.: Проявление антипересечения уровней энергии в спектрах ЭПР спиновых кластеров. ФТТ **58**, вып. 6 (2016)
84. Галяметдинов Ю.Г., Шамилов Р.Р., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Степанов А.Л.: Люминесценции квантовых точек CdSe вблизи слоя наночастиц серебра, ионно-синтезированных в сапфире. Письма в ЖТФ **42**, вып. 21, 15–22 (2016)
85. Галяметдинов Ю.Г., Шамилов Р.Р., Степанов А.Л.: Плазмонно-усиленная люминесценция квантовых точек CdSe на пористом кремнии с наночастиами серебра. Изв. РАН. Сер. хим. № 11, 2773–2775 (2016)
86. Галяутдинов М.Ф., Нуждин В.И., Фаттахов Я.В., Фаррахов Б.Ф., Валеев В.Ф., Осин Ю.Н., Степанов А.Л.: Формирование периодической дифракционной структуры на основе полиметилметакрилата с наночастицами серебра методом ионной имплантации. Письма в ЖТФ **42**, вып. 4, 30–37 (2016)
87. Дерягин О.Г., Гаврилова С.А., Буравков С.В., Андрианов В.В., Яфарова Г.Г., Гайнутдинов Х.Л., Кошелев В.Б.: Роль АТФ-чувствительных калиевых каналов и оксида азота в защитном эффекте прекондиционирования мозга. Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова **116**, № 8, 17–23 (2016)
88. Жарков Д.К., Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Никифоров В.Г., Лобков В.С.: Фемтосекундная двухимпульсная нерезонансная спектроскопия молекулярных либраций в орто-дихлорбензоле. Изв. РАН. Сер. физ. **80**, № 7, 924–926 (2016)
89. Зиганшин М.А., Губина Н.С., Горбачук В.В., Зиганшина С.А., Чукланов А.П., Бизяев Д.А., Бухараев А.А.: АСМ тонких плёнок олигопептида L-валил-L-валин до и после взаимодействия с парообразными соединениями. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **2**, 55–61 (2016)
90. Зиганшина С.А., Чукланов А.П., Бизяев Д.А., Бухараев А.А.: Морфология поверхности и электрокаталитические свойства наночастиц никеля, сформированных в трековых порах. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **2**, 63–69 (2016)
91. Иванова Т.А., Мингалиева Л.В., Овчинников И.В., Туранова О.А., Иванова Г.И., Гильмутдинов И.Ф.: Лабильность спинового состояния комплексов Fe(III) с тетрадентантными основаниями Шиффа. ЖОХ **86**, вып. 7, 1170–1176 (2016)
92. Иванова Т.А., Овчинников И.В., Гильмутдинов И.Ф., Мингалиева Л.В., Туранова О.А., Иванова Г.И.: Особенности спин-переменных свойств $[Fe(acen)pic_2]BPh_4 \cdot nH_2O$. ФТТ **58**, вып. 2, 273–277 (2016)

93. Кусмарцев Ф.В., Кревчик В.Д., Семёнов М.Б., Филатов Д.О., Шорохов А.В., Бухараев А.А., Дахновский Ю.И., Николаев А.В., Пятаев Н.А., Зайцев Р.В., Кревчик П.В., Егоров И.А., Ямамото К., Арынгазин А.К.: Резонансное туннелирование с участием фононов и его фононный контроль. Письма в ЖЭТФ **104**, вып. 6, 406–412 (2016)
94. Лексин П.В., Камашев А.А., Гарифьянов Н.Н., Валидов А.А., Фоминов Я.В., Schumann J., Катаев В.Е., Büchner B., Гарифуллин И.А.: Экспериментальное исследование роли триплетного спаривания в эффекте сверхпроводящего спинового клапана. ФТТ **58**, вып. 11, 2094–2103 (2016)
95. Лядов Н.М., Гумаров А.И., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Шустов В.А., Базаров В.В., Файзрахманов И.А.: Влияние режимов имплантации ионов серебра на структуру и оптические свойства нанокристаллических плёнок оксида цинка. ЖТФ **86**, вып. 8, 118–124 (2016)
96. Лядов Н.М., Гумаров А.И., Кашапов Р.Н., Носков А.И., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Базаров В.В., Хайбуллин Р.И., Файзрахманов И.А.: Структура и оптические свойства ZnO с наночастицами серебра. ФТП **50**, вып. 1, 44–50 (2016)
97. Мамин Р.Ф., Бизяев Д.А., Юсупов Р.В., Бухараев А.А.: Магнитоэлектрические свойства и локально-индуцированные состояния в манганитах. Изв. РАН. Сер. физ. **80**, № 9, 1196–1199 (2016)
98. Мамин Р.Ф., Таюрский Д.А.: Феноменологическая модель релаксорного поведения. Изв. РАН. Сер. физ. **80**, № 9, 1141–1144 (2016)
99. Мигачев С.А., Куркин М.И., Смородинский Я.Г.: Бесконтактное возбуждение звука в металле видеоимпульсом электрического поля. Дефектоскопия № 11, 46–49 (2016)
100. Моисеев С.А., Губайдуллин Ф.Ф., Кириллов Р.С., Латыпов Р.Р., Перминов Н.С., Петровнин К.В., Шерстюков О.Н.: Мультирезонаторная квантовая память как управляемый квантовый интерферометр. Изв. РАН. Сер. физ. (2016) (в печати)
101. Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А.: Устройство для подачи жидкого азота в систему охлаждения низкотемпературного приёмника ионного ускорителя ИЛУ. Приборы и техника эксперимента № 6, 135–136 (2016)
102. Нургазизов Н.И., Бизяев Д.А., Бухараев А.А.: Магнитная структура никелевой нанопроволоки после воздействия импульса тока высокой плотности. ФТТ **58**, № 5, 917–922 (2016)
103. Сагдеев Д.О., Шамилов Р.Р., Воронкова В.К., Суханов А.А., Галяметдинов Ю.Г.: Коллоидный синтез и характеризация парамагнитных квантовых точек Mn:CdSe в водной среде. Вестн. Казан. технолог. ун-та **19**, № 14, 36–38 (2016)
104. Соловаров Н.К., Тарасов В.Ф., Жариков Е.В.: Эффекты спиновой динамики в субмиллиметровой ЭПР-спектроскопии примесных ионов тулия в синтетическом форстерите. Письма в ЖЭТФ **104**, вып. 2, 91–96 (2016)
105. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Галяутдинов М.Ф.: Алмазная дифракционная решётка. Сб. науч. статей "Наноструктуры в конденсированных средах", с. 243–249. Минск: ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси 2016.
106. Тарасов В.Ф., Соловаров Н.К., Жариков Е.В.: Проявление эффекта Ханле в субмиллиметровой ЭПР-спектроскопии примесных ионов тулия в синтетическом форстерите. Оптика и спектроскопия **121**, вып. 4, 614–620 (2016)
107. Фаттахов Я.В., Фаррахов Б.Ф., Галяутдинов М.Ф.: Динамическая термотометрия твёрдых тел на основе комбинации методов оптической дифракции и интерференции. Изв. РАН. Сер. физ. **80**, № 2, 154–156 (2016)
108. Шамилов Р.Р., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Галяметдинов Ю.Г., Степанов А.Л.: Усиление фотолюминесценции квантовых точек CdSe/CdS на кварцевых подложках с наночастицами серебра. ЖТФ **86**, № 11, 95–100 (2016)
109. Шухин А.А., Калачёв А.А.: Генерация чистых однофотонных состояний в режиме спонтанного четырёхволнового смешения в нановолокнах с переменным сечением. Изв. РАН. Сер. физ. **80**, № 7, 861–864 (2016)
110. Шухин А.А., Калачёв А.А.: Спектральные особенности спонтанного четырёхволнового смешения в нановолокнах с переменным сечением. Компьютерная оптика **40**, № 2, 141–146 (2016)
111. Яфарова Г.Г., Андрианов В.В., Зарипова Р.И., Зефиров Т.Л., Июдин В.С., Ситдиков Ф.Г., Юртаева С.В., Гайнутдинов Х.Л.: ЭПР исследование изменения продукции оксида азота в сердце и печени крыс при нарастающей гипокинезии: эффекты блокаторов NO-синтаз. Биорадикалы и антиоксиданты **3**, № 3, 222–224 (2016)
112. Яфарова Г.Г., Андрианов В.В., Ягудин Р.Х., Шайхутдинов И.И., Гайнутдинов Х.Л.: Влияние блокатора NO-синтазы L-NAME на функциональное состояние нейромоторного аппарата при травматической болезни спинного мозга. Бюлл. экспер. биол. мед. **162**, № 9, 295–299 (2016)

Материалы и тезисы конференций

1. Domracheva N.E., Vorobeva V.E., Gruzdev M.S.: EMR searching of quantum behavior of superparamagnetic γ-Fe_2O_3 nanoparticles encapsulated into poly(propylene imine) dendrimer. Abstracts of Int. Symp. "Magnetic Resonance: from Fundamental Research to Practical Application", p. 126–127. Казань: Изд-во Казан. ун-та.
2. Güler A., Boyraz C., Shulgin D., Mozzhukhin G., Rameev B.: Synthesis and characterization of tetrahedrite compounds for thermoelectric applications. Proceed-

ings of 2016 9th Int. Kharkiv Symp. on Physics and Engineering of Microwaves “Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)”, p. 1–4. IEEE Conference Publications, 2016.
3. Rameev B.Z., Aktaş B.: NMR & MW techniques for detection of explosive and illicit materials. Proceedings of 2016 9th Int. Kharkiv Symp. on Physics and Engineering of Microwaves “Millimeter and Submillimeter Waves” (MSMW), pp. 1–3. IEEE Conference Publications, 2016.
4. Shakhmuratov R.N., Vagizov F.G., Scully M.O., Kocharovskaya O.: Application of the low finesse frequency comb for high resolution spectroscopy. Proceedings of VI Int. Conf. “Frontiers of Tonlinear Physics” (FNP’2016), p. 301–302. Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics RAS 2016.
5. Акатьев Д.О., Калачёв А.А.: Разработка метода высокоскоростной стабилизации спектральных характеристик однофотонного источника, основанного на спонтанных параметрических процессах. Сб. материалов конф. молодых учёных “Молодежь и инновации Татарстана”, с. 7–10. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2016.
6. Бардасова А.Е., Суханов А.А., Воронкова В.К., Тюрин В.С.: ЭПР исследование агрегации медь порфирина. Сб. материалов конф. молодых учёных “Молодежь и инновации Татарстана”, с. 47–51. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2016.
7. Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Файзрахманов И.А., Ивлев Г.Д.: Применение импульсных воздействий для создания сильнолегированных и напряжённых слоёв Ge для микро- и оптоэлектроники. Сб. докладов Междунар. научн. конф. “Актуальные проблемы физики твёрдого тела (ФТТ-2016)”, с. 193–195. Минск: Ковчег 2016.
8. Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Кандрашкин Ю.Е., Горев Р.В., Мингалиева Л.В., Миронов В.Л., Нургазизов Н.И., Ханипов Т.Ф.: Исследование влияния упругих напряжений на магнитную анизотропию микрочастиц пермаллоя методом ферромагнитного резонанса. Труды XX Междунар. симп. “Нанофизика и наноэлектроника”, т. 1, с. 161–163. Н. Новгород: Изд-во ННГУ 2016.
9. Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Нургазизов Н.И., Ханипов Т.Ф.: Исследование трансформации доменной структуры при механической деформации микрочастиц пермаллоя. Сб. статей XX Междунар. молодёжной науч. школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Салахов М.Х., ред.), с. 57–60. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2016.
10. Бумай Ю.А., Валеев В.Ф., Долгих Н.И., Лукашевич М.Г., Нуждин В.И., Оджаев В.Б., Попов И.В., Хайбуллин Р.И., Харченко А.А.: Оптические характеристики плёнок полиэтилентерефталата, имплантированных ионами никеля. Сб. докл. Междунар. науч. конф. “Актуальные проблемы физики твёрдого тела” (Олехнович Н.М., пред. редколлегии), т. 2, с. 126–128. Минск: Ковчег 2016.
11. Бухараев А.А., Бизяев Д.А., Зиганшина С.А., Нургазизов Н.И., Ханипов Т.Ф., Чукланов А.П.: Исследование методами магнитно-силовой микроскопии магнитной анизотропии микрочастиц, наведённой механической деформацией. Тезисы докладов XXVI Российской конф. по электронной микроскопии (РКЭМ-2016), с. 244–245. Черниголовка: Изд-во ИПТМ РАН 2106.
12. Бухараев А.А., Бизяев Д.А., Нургазизов Н.И., Чукланов А.П., Ханипов Т.Ф.: Изучение с помощью МСМ распределения локальных упругих напряжений, вызванных механической деформацией. Труды XX Междунар. симп. “Нанофизика и наноэлектроника”, т. 1, с. 277–278. Н. Новгород: Изд-во ННГУ 2016.
13. Вахитов И.Р., Беграмбеков Л.Б., Гумаров А.И., Евсин А.Е., Каплевский А.С., Лучкин А.Г., Никитин Н.П., Янилкин И.В., Тагиров Л.Р., Хайбуллин Р.И.: Применение РФЭС для исследования поверхностей и покрытий, модифицированных плазменным и ионным облучением. Сб. статей VII Всероссийской (с междунар. участием) научно-технической конф. “Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий”, с. 274–275. Казань: Отечество 2016.
14. Гайнутдинов Х.Л., Пашкевич С.Г., Яфарова Г.Г., Андрианов В.В., Денисов А.А., Хотянович М.О., Кульчицкий В.А.: Исследование продукции оксида азота в гиппокампе, сердце и печени крыс при ишемическом инсульте: эффекты блокатора NO-синтазы L-NAME. Тезисы докладов VI Всероссийской с междунар. участием школы-конф. “Физиология кровообращения” (Бугачева Е.М., гл. ред.), с. 33–34. Москва: МАКС Пресс 2016.
15. Гафиятуллин Л.Г., Иванова Т.А., Мингалиева Л.В., Овчинников И.В., Суханов А.А., Туранова О.А., Фролова Е.Н.: Исследование комплекса [4-азагептаметилен-1,7-бис(салицилидениминато)] (имидазол) железа (III) тетрафенилбората методами ЭПР и УФ спектроскопии. Тезисы докладов Междунар. симп. “Магнитный резонанс: от фундаментальных исследований к практическим приложениям”, с. 122–123. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2016.
16. Гимазов И.И., Сахин В.О., Таланов Ю.И.: Исследование влияния сверхпроводящих флуктуаций на состояние $Bi_2Sr_2Ca_{1-x}Y_xCu_2O_{8+\delta}$ вблизи критической температуры. Сб. материалов конф. молодых учёных “Молодежь и инновации Татарстана”, с. 56–57. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2016.
17. Головчук В.И., Карпович В.А., Лукашевич М.Г., Харченко А.А., Хайбуллин Р.И., Оджаев В.Б.: Магнетизм нанокластеров 3d-металлов, полученных методом ионной имплантации в диэлектрической и полупроводниковой матрицах. Сб. трудов VII Междунар. науч. конф. “Материалы и структуры современной электроники”, посвящённой 50-летию кафедры физики полупроводников и наноэлектроники (Оджаев В.Б., отв. ред.), с. 232–234. Минск: Изд. центр БГУ 2016.

18. Зиганшин М.А., Герасимов А.В., Горбачук В.В., Зиганшина С.А., Бухараев А.А.: Взаимодействие тонких плёнок олигопептидов с парообразными соединениями. Тезисы докладов XXVI Российской конф. по электронной микроскопии (РКЭМ-2016), с. 606–607. Черниголовка: Изд-во ИПТМ РАН 2106.
19. Зиганшина С.А., Морозова А.С., Бухараев А.А., Зиганшин М.А.: Самоорганизация в тонкой плёнке дипептида l-глицил-l-глицин под действием парообразных органических соединений. Тезисы докладов XXVI Российской конф. по электронной микроскопии (РКЭМ-2016), с. 608–609. Черниголовка: Изд-во ИПТМ РАН 2106.
20. Милордова Е.О., Туранова О.А., Иванова Т.А., Фролова Е.Н., Овчинников И.В.: Жидкокристаллические прекурсоры для синтеза материалов со спин-переменными свойствами. Тезисы докладов I Всероссийской молодёжной школы-конф. “Успехи синтеза и комплексообразования”, с. 259–260. Москва: Изд-во РУДН 2016.
21. Морозова А.С., Зиганшина С.А., Бухараев А.А., Зиганшин М.А.: Исследование методами атомно-силовой микроскопии процессов самоорганизации в плёнках дипептида при взаимодействии парообразных органических соединений. Сб. статей XX Междунар. молодёжной науч. школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Салахов М.Х., ред.), с. 118–121. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2016.
22. Мухаметшин А.В., Гумаров А.И., Вагизов Ф.Г., Хайбуллин Р.И., Лопатин О.Н.: Мёссбауэровская спектроскопия природного кварца, имплантированного ионами железа. Материалы VIII Всероссийской молодёжной науч. конф. “Минералы: строение, свойства, методы исследования”, с. 119–120. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН 2016.
23. Никифоров В.Г., Лапаев Д.В., Лобков В.С., Князев А.А., Галяметдинов Ю.Г.: Влияние структуры плёнок β-дикетонатного комплексов лантаноидов (III) на геометрию их координационного узла и механизмы внутримолекулярного переноса энергии. Тезисы докладов XIII Междунар. конф. “Спектроскопия координационных соединений”, с. 104–105. Краснодар: Изд-во КГУ 2016.
24. Салихов К.М.: Фундаментальные исследования и инновации. Нанооптика, фотоника, когерентная спектроскопия. Материалы XI Междунар. науч. школы “Наука и инновации-2016” ISS “SI-2016”, с. 20–21. Йошкар-Ола: ПГТУ 2016.
25. Самарцев В.В., Митрофанова Т.Г.: Коррелированные сигналы аккумулированного фотонного эха на квантовых точках CdSe-CdS. Сб. статей XX Междунар. молодёжной науч. школы “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия” (Салахов М.Х., ред.), с. 145–150. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2016.
26. Самарцев В.В., Митрофанова Т.Г.: Коррелированные сигналы стимулированного фотонного эха при трёхквантовом возбуждении коллоидных квантовых точек CdSe-CdS. Материалы XI Междунар. науч. школы “Наука и инновации-2016” ISS “SI-2016”, с. 41–45. Йошкар-Ола: ПГТУ 2016.
27. Таланов Ю.И., Гимазов И.И., Шапошникова Т.С., Валидов А.А., Agachi T., Noji T., Koike Y.: Флуктуации сверхпроводящего параметра порядка в $B_i = 2212$ при $T > T_c$. Труды XX Междунар. симп. “Нанофизика и наноэлектроника”, т. 1, с. 130–131. Нижний Новгород: Изд-во НГУ 2016.
28. Турайханов Д.А.: Разработка способа генерации однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом. Сб. материалов конф. молодых учёных “Молодежь и инновации Татарстана”, с. 18–21. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2016.
29. Фатыхов Р.Р., Хантимеров С.М., Гарипов Р.Р., Сулейманов Н.М.: Разработка электродных материалов для литий-ионных аккумуляторов с улучшенными удельными характеристиками. Сб. материалов конф. молодых учёных “Молодежь и инновации Татарстана”, с. 66–67. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2016.
30. Хундиряков В.Е., Баязитов А.А., Валлиулов Р.В.: Разработка радиочастотного приёмного датчика повышенной чувствительности. Сб. материалов конф. молодых учёных “Молодежь и инновации Татарстана”, с. 75–77. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2016.
31. Шкаликов А.В., Латыпов И.З., Д.А. Турайханов, Калачёв А.А., Самарцев В.В.: Проблемы генерации однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом для атмосферной оптической квантовой связи. Материалы XI Междунар. науч. школы “Наука и инновации-2016” ISS “SI-2016”, с. 46–49. Йошкар-Ола: ПГТУ 2016.
32. Юртаева С.В., Ефимов В.Н., Сальников В.В., Фахрутдинов А.Р.: Сигналы ЭМР в биологических тканях. Тезисы докладов Междунар. симп. “Магнитный резонанс: от фундаментальных исследований к практическим приложениям”, с. 190–191. Казань: Изд-во Казан. ун-та 2016.
33. Яфарова Г.Г., Ягудин Р.Х., Шайхутдинов И.И., Андрианов В.В., Июдин В.С., Гайнутдинов Х.Л.: Продукция оксида азота и система антиоксидантной защиты при травматической болезни спинного мозга. Сб. материалов научно-практической конф. “Кислород и свободные радикалы” (Зинчук В.В., отв. ред.), с. 195–197. Гродно: Изд-во ГрГМУ 2016.

Патенты



1. Нуждин В.И., Валеев В.Ф.: Патент РФ на полезную модель № 159660 “Устройство для подачи хладагента в камеру холода”. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 25.01.2016.
2. Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А.: Патент на изобретение № 2588231 “Блок управления стационарного устройства подачи хладагента”. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 03.06.2016.
3. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Галяутдинов М.Ф.: Патент на полезную модель № 163672 “Оптическое термометрическое устройство на полимерной основе”. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 12.07.2016.
4. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф. (КФТИ КазНЦ РАН), Осин Ю.Н. (КФУ): Патент на изобретение № 2593912 “Способ изготовления дифракционной периодической микроструктуры на основе пористого кремния”. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 18.07.2016.
5. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф. (КФТИ КазНЦ РАН), Осин Ю.Н. (КФУ): Патент на изобретение № 2597801 “Дифракционная периодическая микроструктура на основе пористого кремния”. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 24.08.2016.
6. Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А.: Патент на изобретение № 2599822 “Блок управления устройства подачи хладагента”. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 21.09.2016.
7. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Галяутдинов М.Ф., Курбатова Н.В. (КФТИ КазНЦ РАН), Воробьев В.В. (КФУ), Осин Ю.Н. (КФУ): Патент на полезную модель № 166144 “Алмазная дифракционная решётка”. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 26.10.2016.
8. Нуждин В.И., Петухов В.Ю.: Патент на полезную модель № 2604045 “Стационарное устройство для подачи хладагента в камеру холода. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 16.11.2016.
9. Нуждин В.И., Валеев В.Ф.: Патент РФ на изобретение № 2605671 “Устройство для подачи хладагента в камеру холода”. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 02.12.2016.

Защиты, награды

Защита диссертаций

В 2016 году кандидатскую диссертацию защитили:

– Камашев Андрей Андреевич
Экспериментальное исследование роли триплетного спаривания в эффекте сверхпроводящего спинового клапана
01.04.11 – физика магнитных явлений

– Конов Константин Борисович
Исследование методами ЭПР воздействия криопротекторов сахарозы, трегалозы, глицерина и сорбита на структуру и динамику модельной липидной мембраны
01.04.11 – физика магнитных явлений

Награждения

В связи с 70-летием Казанскому физико-техническому институту им. Е. К. Завойского направлено Благодарственное письмо Президента Республики Татарстан Р. Н. Минниханова и Благодарственное письмо Председателя Государственного Совета Республики Татарстан Ф. Х. Мухаметшина.

Проф. К. М. Салихов, научный руководитель Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского, в связи с 80-летием со дня рождения, награждён медалью Республики Татарстан "За доблестный труд", а так же ему направлены Благодарственные письма от Министерства образования и науки Республики Татарстан и от мэра г. Казани И. Р. Метшина.

Звание "Заслуженный деятель науки РТ" присвоено д.ф.-м.н. А. А. Калачёву и д.ф.-м.н. Р. Н. Шахмуратову.

Наградой "Благодарность Президента РТ" отмечены гл. бухгалтер Р. Р. Гусева, к.ф.-м.н. Л. В. Мосина и к.ф.-м.н. С. Я. Хлебников.

Почётной грамотой ФАНО России за безупречный труд и высокие достижения в профессиональной деятельности награждена д.ф.-м.н. В. К. Воронкова.

Благодарность ФАНО России объявлена Ю. А. Аджалиеву.

Почётным членом Академии наук республики Башкортостан избран проф. Салихов К.М.

Премия им. М. Л. Блатта (КФТИ КазНЦ РАН) присуждена:
- Лисину Н.А., электромонтеру по ремонту и обслуживанию электрооборудования,
- Хабибуллиной Валентине Ивановне, заместителю главного бухгалтера.

Звание "Ветеран КФТИ" за многолетний добросовестный труд на благо института присвоено следующим сотрудникам:
- Гарифьянову Н.Н., в.н.с.,
- Фаттахову Я.В., в.н.с.,
- Шагалову В.А., н.с.
- Шакурову Г.С., с.н.с.

Участие сотрудников института в преподавательской деятельности

В 2016 году сотрудники КФТИ КазНЦ РАН, помимо основной научно-исследовательской работы, занимались преподавательской деятельностью в различных вузах г. Казани, где читали следующие учебные курсы:

Баязитов Р.М., проф. каф. приборостроения и автоматизации электропривода КГЭУ
- Элементы систем автоматики
- Автоматизированный электропривод
- Источники и приёмники излучений

Бухараев А.А., проф. каф. оптики и нанофотоники Института физики КФУ
- Спектроскопические и зондовые методы исследования наноструктур
- Современные методы синтеза и исследования наноструктур

Воробьёва В.Е., ассистент кафедры вычислительной физики и моделирования физических процессов Института физики КФУ
- Информационные технологии
- Инженерная графика
- Концепция современного естествознания
- Естественнонаучная картина мира

Гайнутдинов Х.Л., проф. каф. физиологии Института фундаментальной медицины и биологии КФУ
- Медицинская биофизика

Ерёмина Р.М., доц. каф. общей физики Института физики КФУ
- Оптика
- Электричество и магнетизм
- История и методология физики

Житейцев Е.Р., доц. каф. высшей математики КНИТУ-КХТИ
- Высшая математика

Калачёв А.А., проф. каф. оптики и нанофотоники Института физики КФУ
- Квантовая оптика
- Квантовые компьютеры
- Физика лазеров

Петухов В.Ю., проф. каф. физики твёрдого тела Института физики КФУ
- Радиационная физика
- Радиационная физика в медицине
- Физика поверхности и тонких плёнок

Савостина Л.И., доц. каф. хим. физики Института физики КФУ
– Гидравлика
Салихов К.М., проф., каф. хим. физики Института физики КФУ
– Химическая кинетика и катализ
Сулейманов Н.М., проф. каф. физики КГЭУ
– Физические основы энергетики
Тарасов В.Ф., проф. каф. пром. электроники КГЭУ
– Измерительно-информационная техника и электроника
– Физические основы электроники

Конференции, организованные КФТИ и при участии КФТИ

1. XI Международная научная школа "Наука и инновации-2016" ISS "SI-2016", 3–12 июля 2016, Йошкар-Ола, Россия (совместно с Казанским (Приволжским) федеральным университетом, Поволжским государственным технологическим университетом, Марийским государственным университетом, Чувашским государственным университетом им. И. Н Ульянова, Российским фондом фундаментальных исследований)
2. XX Международная молодёжная научная школа "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия", 18–20 октября 2016, Казань, Россия (совместно с Казанским (Приволжским) федеральным университетом, Академией наук Республики Татарстан, Российским фондом фундаментальных исследований)
3. XXI Международная молодёжная научная школа "Актуальные проблемы магнитного резонанса и его применений" (Школа-2016), 24–28 октября 2016, Казань, Россия (совместно с Казанским (Приволжским) федеральным университетом)
4. International Symposium "Modern Development of Magnetic Resonance", October 31–November 4, 2016, Kazan, Russia (совместно с Казанским (Приволжским) федеральным университетом, Академией наук Республики Татарстан)
5. Республиканская конференция молодых учёных "Молодёжь и инновации Татарстана", 17–18 ноября 2016, Казань (совместно с Казанским (Приволжским) федеральным университетом, Министерством образования и науки Республики Татарстан, Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, Академией наук Республики Татарстан)
6. Итоговая научная конференция КазНЦ РАН, 5–6 декабря 2016 г. (стендовая сессия), 7 февраля 2017 г. (устная сессия), Казань
7. Итоговая конференция молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН, 13 апреля 2017, Казань

Программы конференций, организованных институтом

International Symposium "Modern Development of Magnetic Resonance"

October 31, 2016

Zavoisky Award 2016 Lectures

Bowman M.K.: Electron Transport and Energy Transduction: Lessons From Proteins

Raitsimring A.: Practical Aspects of Multi-Frequency (from S Band to D Band) Pulsed EPR/ENDOR Spectroscopies for Biological Applications: Structure of Metalloenzymes, Characterization of MRI Contrast Agents, Distance Measurements with Gd(III) Tags and More…

Plenary Session

Chair: H. Ohta

Atsarkin V.A.: Electron Spin Resonance on the Border between Para- and Ferromagnetism: Quantum versus Classical

Sato K., Yamamoto S., Shibata T., Hosseini E., Mori N., Yamane T., Nakagawa T., Sawada S., Sugisaki K., Nakazawa S., Maryama K., Toyota K., Shiomi D., Morita Y., Nishida S., Suzuki S., Okada K., Takui T.: Molecular Spin Technology for Quantum Computers and Quantum Information Processing

November 1, 2016

Plenary Session
Chair: S. V. Demishev
Srivastava M., Georgieva E.R., Dzikovski B., Freed J.H.: Overcoming Insufficient Signal Strength in ESR
Ohta H., Okubo S., Ohmichi E., Sakurai T., Hara S., Takahashi H.: Multi-Extreme THz ESR: Recent Developments and Future

Session: Chemical and Biological Systems
Chair: H. W. Spiess
Invited Talks
Grampp G., Mladenova B., Rasmussen K., Kattnig D.: ESR-Spectroscopy in Ionic Liquids: High Pressure Investigations on the Dynamics and Kinetics of Organic Radicals
Bagryanskaya E.: Application of Trytil Radicals in Biology and Materials Science
Savitsky A.: ELDOR-Detected NMR: a Powerful EPR Technique for Hyperfine and Polarization Transfer Studiess
Oral Talks
Audran G., Brémond P., Marque S.: Intramolecular Hydrogen Bonding and Solvent Effect in β-Phosphorylated Nitroxides
Volkov V.I.: Ionic and Molecular Transport in Ion Exchange Systems Studied by NMR

Session: Strongly Correlated Electron Systems
Chair: G. B. Teitel'baum
Invited Talk
Klauss H.-H.: Complex Electronic Order in Fe-Based Superconductors Studied by Nuclear Probe Spectroscopy
Oral Talks
Demishev S.V., Semeno A.V., Gilmanov M.I., Bogach A.V., Glushkov V.V., Krasnorussky V.N., Samarin A.N., Samarin N.A., Sluchanko N.E., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B.: Magnetic Resonance Anisotropy in CeB_6
Semeno A.V., Gilmanov M.I., Krasnorusski V.N., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B., Samarin A.N., Demishev S.V.: Anomalous ESR Behavior of Lanthanum Doped CeB_6
Iakovleva M., Vavilova E., Grafe H.-J., Kataev V., Kaustuv M., Vogl M., Dey T., Wurmehl S., Büchner B.: NMR Investigation of Ir-Based Double Perovskites

Session: Theory of Magnetic Resonance
Chair: E. B. Fel'dman
Oral Talks
Dzheparov F.S., Lvov D.V.: Impurity Spin in Normal Stochastic Field: Basic Model of Magnetic Resonance
Maryasov A.G., Bowman M.K.: Relaxation and Coherence Transfer in Radicals in Liquids

Session: Modern Methods of Magnetic Resonance. Related Phenomena
Chair: M. S. Tagirov
Invited Talks
Zong F., Spindler N., Ancelet L.R., Hermans I.F., Galvosas P.: Recent Advances in NMR Diffusometry
Eichhoff U.: Novel Applications of MRI: Structural and Functional Connectivity in Brain. Can MRI Contribute to the Understanding of Mental Disorders?
Earle K.A.: Graphical Methods for Spectral Simulation

Chair: P. Galvosas
Oral Talks
Chumakova N.A., Vorobiev A.Kh., Pomogailo D.A., Paramonov N.A., Kuzin S.V.: Capability of Modern X-EPR Spectroscopy in Determining Characteristics of Rotational Mobility of Nitroxide Radicals
Lukzen N.N., Klein J.H., Lambert C., Steiner U.E.: The Quantum Dynamical Basis of a Classical Kinetic Scheme Describing Coherent and Incoherent Regimes of Radical Pair Recombination
Kuzmin V.V., Tastevin G., Nacher P.-J.: Nonlinear Spin Dynamics in Highly Polarised Liquids
Vyalikh A.: Operando NMR Studies of Electrochemical Systems
Bunkov Yu.: Supermagnonics
Weber R., Gromov I., Carl P., Mokeev M.: Bruker BioSpin Latest EPR Developments: Rapid Scan Unit and Fitting Software Anisotropic-SpinFit

Workshop: Spin-Based Information Processing
Chairs: P. Bushev, A. Kalachev
Invited Talks
Bienfait A., Pla J.J., Zhou X., Lo C.C., Weis C.D., Schenkel T., Vion D., Esteve D., Morton J.J.L., Mølmer K., Bertet P.: Magnetic Resonance at the Quantum Limit and Beyond
Morton J., Nur S., Ross P., Lim H.: Spin Qubits Based on Donors in Silicon
Majer J.: Hybrid Quantum Systems – Coupling Color Centers to Superconducting Cavities

Chair: T. Takui
Invited Talks
Tobar M.: High-Q and Novel Cavity Structures for Photon-Spin Strong Coupling
Tyryshkin A.M., Petersen E.S., Sigillito A.J., Jhaveri J., Sturm J.C., Lyon S.A., House M., Simmons M., Lo C.C., Morton J.J.L.: Electron Spin Decoherence of J-Coupled Donor Dimers in Two-Dimentional δ-Layers, 50 nm below Surface in Silicon
Akhmedzhanov R.A., Gushchin L.A., Nizov N.A., Nizov V.A., Sobgayda D.A., Zelensky I.V.: Optically Detected Magnetic Resonance in Diamond NV-Centers under Resonant Optical Excitation at Cryogenic Temperatures
Suter D.: Spins as Qubits: Quantum Information Processing by Magnetic Resonance

November 2, 2016

Plenary Lectures
Chair: W. Lubitz
Möbius K.: New Porphyrin Molecules with Möbius-Strip Topology as Studied by Modern Magnetic Resonance Methods
Salikhov K.: Why EPR Will Save the World?

Workshop: Spin-Based Information Processing
Chair: D. Suter
Invited Talks
Akhmedzhanov R., Gushchin L., Kalachev A., Korableva S., Sobgayda D., Zelensky I.: Optical Quantum Memory in Isotopically Pure Crystals Doped by Rare-Earth Ions
Moiseev S.A., Gubaidullin F.F., Kirillov R.S., Latypov R.R., Perminov N.S., Petrovnin K.V., Sherstyukov O.N.: Impedance-Matched Bragg-Type Microwave Quantum Memory
Bushev P.: Microwave and Optical Coherence of Erbium Doped Crystals below 1 K
Oral Talks
Eremina R., Gavrilova T., Yatsyk I., Fazlizhanov I., Likerov R., Shustov V., Zavartsev Yu., Zagumennyi A., Kutovoi S.: Investigations of Y_2SiO_5:Nd^{143} Isotopically Pure Impurity Crystals for Quantum Memory by ESR Method
Bochkin G.A., Fel'dman E.B., Vasil'ev S.G.: Dipolar Relaxation of Multiple Quantum Coherences of One-Dimensional Systems in Multiple Quantum NMR
Gerasimov K.I., Moiseev S.A., Morozov V.I., Zaripov R.B.: Microwave Pulses Storage by Using Spin-Frequency Comb Protocol Combined with Gradient Pulses of Magnetic Field

Session: Electron Spin Based Methods for Electronic and Spatial Structure Determination in Physics, Chemistry and Biology
Chair: E. G. Bagryanskaya
Invited Talks
Bowman M.K.: Spin Interactions and Structure in the Condensed Phase
Kokorin A.I., Kulak A.I.: EPR Studies of Doped TiO_2 Photocatalysts: Structures, Properties and Dynamics of Paramagnetic Centers in the Lattice and on the Surface
Oral Talks
Golubeva E.: EPR Spectroscopy for Studying the Structure and Dynamics of Supercritical Fluids
Vorobiev A.Kh., Chumakova N.A.: The Development of Nitroxide Spin Probe Technique for Determination of Molecular Orientation Distribution Function
Tarasov V., Sukhanov A., Zharikov E.: Determining the Structure and Magnetic Properties of Ytterbium Impurity Centers in Synthetic Forsterite by X-band EPR Spectroscopy

Session: Low-Dimensional Systems and Nano-Systems
Chair: V. A. Atsarkin
Invited Talk
Romanov N.G., Anisimov A.N., Soltamov V.A., Baranov P.G.: Level-Anticrossing Spectroscopy of Excited States in Semiconductors and Semiconductor Nanostructures
Oral Talks
Asada M., Nakamura T.: Magnetic Investigation of One-Dimensional Organic Conductors, (TMTTF)2X
Smirnov A.I., Soldatov T.A., Kida T., Takata A., Hagiwara M., Petrenko O., Zhitomirsky M.: ESR Reveals Doping-Induced Change of Spin Structure in a "Triangular" Antiferromagnet
Sosin S.S., Sergeicheva E.G., Zaliznyak I.A.: Unusual Magnetic Excitations in a Weakly Ordered Spin-1/2 Chain Antiferromagnet Sr_2CuO_3: Possible Evidence for the Goldstone-Higgs Interaction

Chair: A. I. Smirnov
Oral Talks
Gorev R.V., Sapozhnikov M.V., Skorohodov E.V., Mironov V.L.: Ferromagnetic Resonance of Localized Nonuniform States in Magnetic Nanostructures
Fraerman A.A., Skorohodov E.V., Vdovichev S.N., Gorev R.V., Demidov E.S.: Ferromagnetic Resonance in Exchange-Related Ferromagnet-Paramagnet Multilayer Structures
Zinovieva A.F., Zinovyev V.A., Nenashev A.V., KulikL.V., Dvurechenskii A.V.: ESR Study of Electron States in Ge/Si Heterostructures with Nanodisc Shaped Quantum Dots
Vavilova E., Krupskaya Y., Schäpers M., Wolter A.U.B., Grafe H.-J., Möller A., Büchner B., Kataev V.: Spin-1/2 Chain Magnet $BaAg_2Cu[VO_4]_2$ Studied by Magnetic Resonance Technique
Biziyaev D.A., Bukharaev A.A., Kandrashkin Yu.E., Khanipov T.F., Mingalieva L.V., Nurgazizov N.I.: Application of Ferromagnetic Resonance for Investigation of Magnetic Properties of Strained Permalloy Microparticles

Session: Other Applications of Magnetic Resonance
Chair: A. A. Bukharaev
Invited Talk
Volodin A.: Nanoscale Magnetic Resonance Microscopy
Oral Talks
Rameev B.Z., Çolak B., Ünver İ.S., Mozzhukhin G.V.: Recent Developments in Microwave & Magnetic Resonance Detection of Explosive/Illicit Materials
Safiullin K., Nacher P.-J., Talbot C.: Advantages of SLASH (Slow Low Angle SHot) Sequence in Low-Field MRI of Hyperpolarised Gases
Mozzhukhin G.V., Shulgin D.A., Mershiev I.G., Rameev B.Z.: Double NMR-NQR for Studies of N-14 Nuclei

Chair: B. Z. Rameev
Oral Talks
Ulanov V.A.: EPR Study of Special Cases of the Jahn-Teller Effect Realized in the Fluorite Type Crystals with d-Ion Dopants
Lozovoi A., Mattea C., Fatkullin N., Stapf S.: Proton NMR Dipolar-Correlation Effect as a Method for Investigating Segmental Diffusion in Polymer Melts
Kandrashkin Yu.E., Poddutoori P.K., van der Est A.: Electron Transfer Pathways in Molecular Triads Centered by Aluminum Porphyrin
Lisin V.N., Shegeda A.M., Samartsev V.V.: Beating of Light During Photon Echo. Observation and Application
Rybin D.S.: Conversions and Transformations: Deformation-Induced Chemical Bonding in Pharmaceutics

November 3, 2016

Session: Perspectives of Magnetic Resonance in Science and Spin-Technology. Theory of Magnetic Resonance
Chair: G. Buntkovsky
Invited Talks
Lubitz W.: Advanced Pulse EPR Studies of the Water Oxidation Cycle in Photosynthesis
Kaptein R.: Perspectives of Hyperpolarization and its Role in Structural Biology
Raitsimring A.: Gd(III) Based Markers for Pulsed Dipolar Spectroscopy: Features, Theory, Instrumentation and Optimization of Measurements
Likhtenshtein G.I.: Can Spin Chemistry Explain all Effects of Electromagnetic Fields on Living Organisms?

Chair: J. H. Freed
Invited Talks
Tsvetkov Yu.D.: EPR Spectroscopy of Pulse Double Electron-Electron Resonance (PELDOR). Some Results and Prospects
Buntkowsky G.: Revealing Structures of Immobilized Catalysts by Solid State NMR
Spiess H.W.: Supramolecular Organization: What Can We Learn from Magnetic Resonance
Kokorin A.: Unexpected Changes in EPR Spectra of Liquid Solutions of Nitroxide Biradicals

Poster Sessions

Akhmetov M.M., Gumarov G.G., Petukhov V.Yu., Konygin G.N., Rybin D.S., Konov A.B.: NMR Investigation of Conformational Changes in Calcium Gluconate
Bakirov M.M., Salikhov K.M., Galeev R.T.: Analysis of Manifestations of the Spin Coherence Transfer in EPR Spectra of Nitroxyl Radicals in Liquids
Biktagirov T., Gafurov M., Mamin G., Orlinskii S.: First-Principles Solid-State Calculations and Pulsed EPR Measurements: a Study of Ionic Substitutions in Hydroxyapatite
Bogaychuk A., Dambieva M., Kupriyanova G., Babak S.: Compare Acetonitrile and Solid-Phase Extractions for Sample Preparation of Plasma at Metabolom Study by NMR
Bogdanov A.V., Vorobiev A.Kh.: Orientation Order and Rotation Mobility of Nitroxide Biradicals Determined by Quantitative Simulation of EPR Spectra
Domracheva N.E., Vorobeva V.E., Gruzdev M.S.: EMR Searching of Quantum Behavior of Superparamagnetic γ-Fe_2O_3 Nanoparticles Fabricated in Dendrimeric Matrix
Domracheva N.E., Vorobeva V.E., Ovcharenko V.I., Bogomyakov A.S., Zueva E.M., Gruzdev M.S., Chervonova U.V., Kolker A.M.: Counterion Effect on the Spin-Transition Properties of the Second Generation Iron(III) Dendrimeric Complexes
Dvořák P., Lang J.: Chemical Exchange in Water
Eremina R.M., Yatsyk I.V., Moshkina E.M., Rautskii M.V., Bezmaternykh L.N., Krug von Nidda H.-A., Liodl A.: ESR Study of Mn-Heterovalent Ludwigite $Mn_{3-x}Cu_xBO_5$
Falin M.L., Latypov V.A., Leushin A.M., Korableva S.L.: Electron Paramagnetic Resonance of Ce^+ Ion in Rb_2NaYF_6 Single Crystal: Experiment and Theoretical Calculations of the Optical Spectra
Falin M.L., Latypov V.A., Safiullin G.M., Leushin A.M., Petrov S.V.: EPR and Optical Spectroscopy of Yb^+ in Hexagonal Perovskite $RbMgF_3$ Single Crystal
Galeev R.T.: Spin Dynamics in the Vicinity of Levels Anticrossing
Gavrilova S.A., Deryagin O.G., Gainutdinov Kh.L., Andrianov V.V., Golubeva A.V., Yafarova G.G., Iyudin V.S., Buravkov A.V., Koshelev V.B.: Effect of Activation and Inhibition of K^+ATP-Channels on the NO Production in the Blood of Rats with Ischemic Stroke
Gavrilova T., Yatsyk I., Eremina R., Gilmutdinov I., Kabirov Y., Nikitina J.: Magnetic Resonance Investigations of Core-Shell Composites Based on $CaCu_3Ti_4O_{12}$
Gilmanov M.I., Semeno A.V., Samarin A.N., Demishev S.V.: Measurement of ESR Oscillating Magnetization Value in Strongly-Correlated Metals
Goenko I.A., Petukhov V.Yu., Yatzyk I.V., Konygin G.N., Rybin D.S., Andreeva I.N., Anisimov A.V., Sharafutdinova D.R.: EPR Investigation of the Radiation-Induced Transformation in Calcium Gluconate
Goryunov Yu.V., Nateprov: Electron Spin Resonance on Eu^+ Impurities in 3D Topological Semimetal
Ibragimova M.I., Chushnikov A.I., Cherepnev G.V., Petukhov V.Yu.: Correlation of EPR and Biochemical Results of Iron Metabolism Study in Serum of Professional Athletes
Ischenko T.V., Samarin A.N., Demishev S.V.: Magnetic Susceptibility of an Antiferromagnetic System with Disorder: Griffiths Phase and Phases with an Intermediate Magnetic Order
Ivanova T.A., Ovchinnikov I.V., Turanova O.A., Mingalieva L.V., Gilmutdinov I.F., Shustov V.A.: Influence of the Outer-Sphere Anion on Electronic and Magnetic Properties of $[Fe(3\text{-}CH_3O\text{-}Qsal)_2]Y \cdot n$ Solvent (n = 0, 1) Complexes

Izotov A.V., Belyaev B.A., Solovev P.N.: Determination of Magnetic Anisotropies Parameters and Miscut Angles for Epitaxial Thin Films Grown on Vicinal (111) Substrates Using Ferromagnetic Resonance

Kadkin O.N., Khafizov N.R., Madzhidov T.I., Antipin I.S.: Elucidating Mechanisms of Intramolecular Exchange Interaction in Substituted N,N′-Dioxy-2,6-Diazaadamantane Biradicals

Khabipov R., Sitdikov I., Fattakhov Ya.: Cloud Project for Storage and Processing of Medical Images Obtained by MRI of Zavoisky Kazan Physical Technical Institute

Khairuzhdinov I.T., Zaripov R.B., Salikhov K.M., Gubskaya V.P., Nuretdinov I.A.: Modeling of the Temperature Dependence of the EPR Spectra of Fullerene C60 Nitroxide Derivatives in Liquid

Lozovoi A., Hurlimann M., Kausik R., Stapf S., Mattea C.: High Temperature Fast Field Cycling Study of Crude Oil

Lukzen N.N., Ivanov K.L.: Manipulating Electron Spin Hyper-Polarization by Means of Adiabatic Switching of a Spin-Locking MW Field

Lvov S., Kukovitsky E.: Hyperfine Structure of Er^{+} Ion in Bulk Copper

Mamadazizov S., Kupriyanova G.: NQR Relaxation Times Distribution of 5-Aminotetrazole Monohydrate

Mamatova A., Savostina L.: Investigation of Influence Conformations of Nitroxyl Radicals on EPR Parameters by DFT Method

Maraşlı A., Maksutoğlu M., Öztürk Y., Rameev B.Z.: Development of Permanent Magnet System for Time-Domain NMR

Melnikova D.L., Shipunov T.V., Makarov M.N., Zhou H., Gizatullin B.I.: Molecular Mobility of n-Hexane in Silicailte-1 by 2D NMR Relaxo- and Diffusometry

Murzakaev V., Bragin A., Kirgizov D., Nurgaliev D., Alexandrov A., Ivanov A., Doroginitcky M., Skirda V., FattakhovYa., Shagalov V., Fakhrutdinov A., Khabipov R., Anikin A.: Complex Downhole Apparatus for Magnetic Resonance Logging

Ovchinnikov I., Ivanova T., Suhanov A., Frolova E., Turanova O., Mingalieva L., Gafiyatullin L.: EPR Investigation of Some Complexes of Fe(III) with Pentadentate Ligand

Petrov O.V., Stapf S.: Development of New Approaches to NMR Data Processing in Time-Domain NMR

Popov I., Vashurin N., Bahodurov A.: Effects of Femtosecond Magnetooptics Based on Photon Echo and Practical Significance

Salikhov K.M.: Consistent Paradigm of the Spectra Decomposition into Independent Resonance Lines

Salikhov T., Klysheva E., Iakovleva M., Zvereva E., Shukaev I., Nalbandyan V., Medvedev B., Vavilova E.: Influence of Non-Stoichiometry on the Frustrated Honeycomb System $Li_3Ni_2SbO_6$

Shakurov G.S., Asatryan G.R., Hovhannesyan K.L., PetrosyanA.G.: High-Frequency EPR Spectroscopy of YAG: Fe, Ce

Shukla A.K., Maiti T., Eremina R.M., Yatsyk I.V., Krug von Nidda H.-A.: Synthesis and Characterization of $Gd_{1-x}Sr_xMnO_3$ (x = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8)

Sukhanov A., Galeev R., Voronkova V., Baniodeh A., Powell A.: Dysprosium Containing Clusters: Some Features of EPR of the Polycrystalline Samples

Sukhanov A.A., Voronkova V.K., Tyurin V.S.: Photoinduced Spin States of Copper Porphyrin Dimers

Tarasov V., Solovarov N., Zharikov E.: High Frequency Zero Field EPR Spectroscopy of Thulium Impurity Centers in Synthetic Forsterite

Turanov A., Khitrin A.K.: Ethanol Clusters in Gasoline-Ethanol Blends

Volkov M.Yu., Bakirov M.M., Galeev R.T., Sukhanov A.A., Salikhov K.M.: New Protocol of Experiments for Determining the Rate of the Spin Coherence Transfer in a Course of the Spectral Diffusion when Spectra Have Resolved Multicomponent Structure

Yurtaeva S.V., Efimov V.N., Salnikov V.V., Rodionov A.A., Yatsyk I.V.: Orientation-Dependent EMR Signals in Biological Tissues. Characteristics and Interpretation

Zhiteitsev E.R., Zaripov R.B., Ulanov V.A.: EPR Study of the BaF_2 Crystals Activated by Nb^{+} Ions

Zobov V.E., Kucherov M.M.: The Concentration Dependence of the Wings of a Dipolar-Broadened Line of Magnetic Resonance in a Magnetically Dilute Lattice of Spins

Итоговая конференция КФТИ КазНЦ РАН

Стендовая сессия

5–6 декабря 2016 года

Сессия 1

Шакуров Г.С., Хайбуллин Р.И. (КФТИ КазНЦ РАН), Томас В.Г., Фурсенко Д.А., Машковцев Р.И. (ИГИМ, Новосибирск), Лопатин О.Н., Николаев А.Г. (КФУ), Горшунов Б.П., Жукова Е.А. (ИОФ РАН, Москва): Субмиллиметровые спектры ЭПР ионов Fe^{2+} в кристаллах синтетического и природного берилла

Тарасов В.Ф., Соловаров Н.К. (КФТИ КазНЦ РАН), Жариков Е.В. (ИОФ РАН, Москва): Эффект Ханле в субмиллиметровой ЭПР-спектроскопии примесных ионов тулия в синтетическом форстерите

Ерёмина Р.М., Гаврилова Т.П., Яцык И.В., Мамедов Д.В. (КФТИ КазНЦ РАН), Гильмутдинов И.Ф. (КФУ), Чичков В.И. (МИСиС, Москва): Магнитные свойства h-$YMnO_3$

Ерёмина Р.М., Гаврилова Т.П.: Расчёт параметров кристаллического поля и g-тензора в $LiCu_2O_2$

ШестаковА.В., Фазлижанов И.И., Ибрагимова М.И., Яцык И.В., Ерёмина Р.М.: Квантовые осцилляции в $Hg_{0.76}Cd_{0.24}Te:Ag^{+}$

Мамедов Д.В., Гаврилова Т.П. (КФТИ КазНЦ РАН), Андреев Н.В., Чичков В.И. (МИСиС, Москва), Королёва

Е.Ю. (ФТИ им. Иоффе, Москва), Гильмутдинов И.Ф. (КФУ), Ерёмина Р.М. (КФТИ КазНЦ РАН): Изучение магнитных и диэлектрических свойств мультиферроика объёмного $LuFeO_3$ и в виде тонкой плёнки $LuFeO_3/SrTiO_3$

Фалин М.Л., Латыпов В.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Леушин А.М. (КФУ), Сафиуллин Г.М., Петров С.В. (КФТИ КазНЦ РАН): ЭПР и оптическая спектроскопия ионов Yb^{3+} в кристалле гексагонального перовскита $RbMgF_3$

Фалин М.Л., Латыпов В.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Леушин А.М., Кораблёва С.Л. (КФУ): ЭПР иона Ce^{3+} в монокристалле Rb_2NaYF_6: эксперимент и теоретические вычисления оптических спектров

Гарифуллин И.А., Гарифьянов Н.Н., Лексин П.В., Камашев А.А., Валидов А.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Фоминов Я.В. (ИТФ им. Л. Д. Ландау, МФТИ, Москва), Шуманн Й., Катаев В., Клингелер Р., Шмидт О.Г., Бюхнер Б., Томас Й. (IFW Dresden, Germany): Возможность генерации спин-поляризованного тока в сверхпроводящем слое

Мамин Р.Ф., Мигачев С.А., Садыков М.Ф., Юсупов Р.В.: Фотопроводимость и фотостимулированные явления в релаксорах

Гимазов И.И., Сахин В.О., Таланов Ю.И.: Исследование влияния сверхпроводящих флуктуаций на состояние кристалла $Bi_2Sr_2Ca_{1-x}Y_xCu_2O_8$ вблизи критической температуры

Сахин В.О., Куковицкий Е.Ф., Гарифьянов Н.Н., Таланов Ю.И., Тейтельбаум Г.Б.: Магниторезонансное исследование Bi_2Te_3, допированного марганцем

Салихов Т. (КФТИ КазНЦ РАН), Зверева Е. (МГУ, Москва), Налбандян В. (ЮФУ, Ростов-на-Дону), Клышева Е., Яковлева М., Вавилова Е. (КФТИ КазНЦ РАН): Влияние нестехиометрии на фрустрированную систему $Li_3Ni_2SbO_6$.

Горюнов Ю.В. (КФТИ КазНЦ РАН), Натепров А.Н. (ИПФ МАН, Молдова): Особенности образования и взаимодействия локализованных магнитных состояний в полуметалле Вейля

Иванова Т.А., Овчинников И.В., Туранова О.А., Мингалиева Л.В. (КФТИ КазНЦ РАН), Гильмутдинов И.Ф. (КФУ), Шустов В.А. (КФТИ КазНЦ РАН): Влияние внешнесферного аниона на электронные и магнитные свойства комплексов $[Fe(3\text{-}CH_3O\text{-}Qsal)_2]Y \cdot n$ Solv (n = 0, 1)

Овчинников И.В., Иванова Т.А., Суханов А.А., Фролова Е.Н., Туранова О.А., Мингалиева Л.В., Гафиятуллин Л.Г. (КФТИ КазНЦ РАН), Зуева Е.М., Петрова М.М. (КНИТУ-КХТИ): ЭПР исследование ряда комплексов Fe(III) с пентадентатным лигандом

Кадкин О.Н.: Изучение механизма внутримолекулярного обменного взаимодействия в замещённых органических бирадикалах на основе N,N′-диазаадамантана

Домрачева Н.Е., Воробьёва В.Е. (КФТИ КазНЦ РАН), Пятаев А.В., Иванова А.Г. (КФУ): Магнитные свойства новых дендримерных комплексов Fe(III) первой генерации

Домрачева Н.Е., Воробьёва В.Е. (КФТИ КазНЦ РАН), Груздев М.С. (ИХР РАН, Иваново): ЭМР поиск квантового поведения суперпарамагнитных g-Fe_2O_3 наночастиц инкапсулированных в поли(пропилен иминовый) дендример

Юртаева С.В., Галеев Р.Т., Кадкин О.Н.: Интерпретация структуры координационных узлов в гиперразветвлённых поликарбоксилатах меди(II) по данным ЭПР и квантово-химического моделирования

Юртаева С.В., Фахрутдинов А.Р., Яцык И.В.: Зависящие от ориентации сигналы ЭМР в биологических системах: характеристики и интерпретация

Сессия 2

Кандрашкин Ю.Е. (КФТИ КазНЦ РАН), Поддутоори П.К. (университет острова им. принца Эдварда, Шарлоттаун, Канада), ван дер Ист А. (университет им. Брока, Сант-Катарина, Канада): Исследование электронного транспорта в триадах TTF-AlPor-H_2Por и TTF-AlPor-AQ методами время-разрешённой ЭПР спектроскопии

Зарипов Р.Б.: Изучение распределения спиновой плотности в нитроксильном бирадикале, обогащённым изотопом ядер C^{13}

Суханов А.А., Воронкова В.К., Тюрин В.С. (ИФХЭ, Москва): ЭПР исследование аггрегации металлокомплексов копропорфирина-I

Галеев Р.Т.: Особенности отклика при быстром прохождении антипересечения уровней энергии

Хайруждинов И.Т., Зарипов Р.Б., Салихов К.М. (КФТИ КазНЦ РАН), Губская В.П., Нуретдинов И.А. (ИОФХ КазНЦ РАН): Моделирование температурной зависимости спектров ЭПР нитроксильных производных фуллерена С60 в жидкости

Бакиров М.М., Салихов К.М., Галеев Р.Т.: Анализ проявлений спинового обмена в переносе спиновой когерентности в спектре ЭПР нитроксильного радикала в растворе

Салихов К.М.: Последовательная теория разделения спектров на независимые резонансные линии

Андрианов В.В. (КФУ), Пашкевич С.Г. (Институт физиологии НАН, Минск, Беларусь), Яфарова Г.Г. (КФТИ КазНЦ РАН; КФУ), Денисов А.А. (Институт физиологии НАН, Минск, Беларусь), Июдин В.С. (КФТИ КазНЦ РАН), Досина М.О., Богодвид Т.Х., Кульчицкий В.А. (Институт физиологии НАН, Минск, Беларусь), Гайнутдинов Х.Л. (КФТИ КазНЦ РАН): Изменение содержания оксида азота в гиппокампе, сердце и печени крыс в остром периоде ишемии мозга

Конов А.Б. (КФТИ КазНЦ РАН), Селиванова Н.М., Романова К.А., Губайдуллин А.Т. (КНИТУ-КХТИ), Галяметдинов Ю.Г. (КФТИ КазНЦ РАН): Лиотропная La-содержащая ламеллярная жидкокристаллическая система: фазовое поведение и структурные свойства

Жарков Д.К., Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Никифоров В.Г., Лобков В.С.: Когерентный лазерный контроль молекулярной динамики в жидкостях

Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Кандрашкин Ю.Е., Мингалиева Л.В., Нургазизов Н.И., Ханипов Т.Ф.: Магнитоупругий эффект в микрочастицах пермаллоя

Зиганшина С.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Морозова А.С., Зиганшин М.А. (КФУ), Бухараев А.А. (КФТИ КазНЦ РАН): Самоорганизация дипептида L-глицил-L-глицин в плёнках по данным атомно-силовой микроскопии

Моисеев С.А., Губайдуллин Ф.Ф. (КФТИ КазНЦ РАН), Кирилов Р.С., Латыпов Р.Р. (КФУ), Перминов Н.С. (КНИТУ-КАИ), Петровнин К.В., Шерстюков О.Н. (КФУ): Многорезонаторная квантовая память

Хантимеров С.М., Сулейманов Н.М.: Исследование влияния структурных и геометрических особенностей углеродных нанотрубок на их химическую фукционализацию

Львов С.Г., Куковицкий Е.Ф.: Сверхтонкая структура ионов Er^{3+} в разбавленном сплаве медь-эрбий

Сессия 3

Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Галяутдинов М.Ф., Степанов А.Л.: Термометрия твёрдых тел методом оптической интерференции на примере ПММА и Si

Хабипов Р., Ситдиков И., Фаттахов Я.: Облачный проект для хранения и обработка медицинских изображений, полученных на томографах "ТМР-КФТИ"

Фаттахов Я.В., Шагалов В.А., Фахрутдинов А.Р., Аникин А.А., Коновалов Д.А.: Разработка модуля сканирования диэлектрических свойств пластового флюида скважинной лаборатории для определения свойств пласта и пластового флюида

Rameev B.Z. (KZPhTI RAS, Gebze Technical University, Gebze/Kocaeli, Turkey), Khaibullin R.I., Nuzhdin V.I. (KZPhTI RAS), Ay F., Aktaş B. (Gebze Technical University, Gebze/Kocaeli, Turkey): Magnetic properties of Ni-implanted ITO thin films studied by VSM & FMR techniques

Rameev B.Z. (KZPhTI RAS, Gebze Technical University, Gebze/Kocaeli, Turkey), Maraşlı A., Maksutoğlu M., Öztürk Y. (Gebze Technical University, Gebze/Kocaeli, Turkey): Permanent magnet system for time-domain NMR

Rameev B.Z. (KZPhTI RAS, Gebze Technical University, Gebze/Kocaeli, Turkey), Ay F., Başaran A.C., Aktaş B. (Gebze Technical University, Gebze/Kocaeli, Turkey), Goikhman A.Yu., Kupriyanova G.S. (Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad): Magnetic properties of Fe/SiO_2/Ni and Fe/SiO_2/Co thin film structures

Лядов Н.М., Базаров В.В., Вагизов Ф.Г., Вахитов И.Р., Дулов Е.Н., Кашапов Р.Н., Носков А.И., Хайбуллин Р.И., Шустов В.А., Файзрахманов И.А.: Исследование структуры и магнитных свойств тонких плёнок Fe^{57}, сформированных методом ионно-стимулированного осаждения

Базаров В.В., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Воробьев В.В., Осин Ю.Н., Степанов А.Л.: Анализ поверхности кремния, имплантированного ионами серебра, методами спектральной эллипсометрии и дифракции отражённых электронов

Гумаров А.И., Хайбуллин Р.И., Лядов Н.М., Валеев В.В. (КФТИ КазНЦ РАН), Гильмутдинов И.Ф. (КФУ), Тагиров Л.Р. (КФТИ КазНЦ РАН): К вопросу о природе ферромагнетизма в ZnO, имплантированном ионами железа и кобальта: РФЭС и магнитные исследования

Хайбуллин Р.И., Лядов Н.М., Валеев В.Ф., Нуждин В.И. (КФТИ КазНЦ РАН), Maksutoğlu M., Mikailzade F. (Gebze Technical University, Gebze/Kocaeli, Turkey): Магнитоэлектрические эффекты в тройных халькогенидах$TlInS_2$ и $TlGaSe_2$, имплантированных ионами кобальта

Нуждин В.И., Валеев В.Ф.: Устройства для резки твёрдотельных материалов

Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А.: Усовершенствованная криогенная система низкотемпературного приёмника ионов ускорителя ИЛУ-3

Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Новиков Г.А., Файзрахманов И.А., Лядов Н.М., Шустов В.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Воробьев В.В., Осин Ю.Н. (КФУ), Ивлев Г.Д. (БГУ, Минск): Формирование сильно легированных поли- и монокристаллических слоёв n-Ge:Sb на подложках p-Ge и p-GaAs под действием мощных ионных и лазерных пучков

Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Новиков Г.А., Лядов Н.М., Шустов В.А., Нуждин В.И., Валеев В.Ф. (КФТИ КазНЦ РАН), Ивлев Г.Д. (БГУ, Минск): Особенности люминесценции полупроводниковых кристаллов и стекол с ионами эрбия, подвергнутых импульсным обработкам.

Ibragimova M.I., Chushnikov A.I. (KZPhTI RAS), Cherepnev G.V. (Tat. Resp. Clinical Hospital no. 2), Petukhov V.Yu. (KZPhTI RAS): Correlation of EPR and biochemical results of iron metabolism study in serum of professional athletes

Akhmetov M.M., Gumarov G.G., Petukhov V.Yu. (KZPhTI RAS), Rybin D.S., Konygin G.N. (Physical-Technical Institute UrB RAS, Izhevsk), Konov A.B. (KZPhTI RAS): NMR investigation of conformational changes in calcium gluconate

Алексеев А.В., Гумаров Г.Г., Бакиров М.М., Петухов В.Ю., Нуждин В.И.: Исследование механизма формирования наведённой одноосной магнитной анизотропии в ионно-синтезированных плёнках силицида железа

Чирков В.В., Гумаров Г.Г., Петухов В.Ю., Валеев В.Ф.: Переключение направления ОЛН в ионносинтезированных плёнках силицида кобальта имплантацией малыми дозами

Goenko I.A., Petukhov V.Yu., Yatsyk I.V., Gumarov G.G. (KZPhTI RAS), Konygin G.N., Rybin D.S. (Physical-Technical Institute UrB RAS, Izhevsk), Andreeeva I.N., Anisimov A.V., Sharafutdinova D.R. (IOPC KazSC RAS) ESR study of electron beam irradiated calcium gluconate

Сессия 4

Степанов А.Л., Галяутдинов М.Ф., Нуждин В.И., Валеев В.Ф. (КФТИ КазНЦ РАН), Воробьев В.В., Осин Ю.Н. (КФУ), Курбатова Н.В. (КФТИ КазНЦ РАН): Способ получения алмазных дифракционных элементов методом ионной имплантации

Воробьев В.В. (КФУ), Нуждин В.И., Валеев В.Ф. (КФТИ КазНЦ РАН), Осин Ю.Н. (КФУ), Степанов А.Л. (КФТИ КазНЦ РАН): Оптическое отражение и комбинационной рассеяние света для кремния с ионно-синтезированными наночастицами серебра

Баталов Р.И., Нуждин В.И., Валеев В.Ф. (КФТИ КазНЦ РАН), Воробьев В.В., Осин Ю.Н. (КФУ), Галкин К.Н., Ивлев Г.Д. (БГУ, Минск), Степанов А.Л. (КФТИ КазНЦ РАН): Формирование сплава GeSi с наночастицами Ag путём ионной имплантации и лазерного отжига

Лисин В.Н., Шегеда А.М., Самарцев В.В.: Биение света во время фотонного эха: наблюдение и применение

Шахмуратов Р.Н. (КФТИ КазНЦ РАН), Вагизов Ф.Г. (КФУ), Scully M.O., Kocharovskaya O. (T&M University, USA): Применение частотных гребёнок низкой чёткости для спектроскопии сверхвысокого разрешения

Калачёв А.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Ахмеджанов Р.А., Гущин Л.А., Зеленский И.В., Кораблёва С.Л., Собгайда Д.А. (КФТИ КазНЦ РАН; ИПФ РАН, Н. Новгород): Квантовая память в изотопически чистом примесном кристаллеYLiF$_4$:Nd^{3+}

Латыпов И.З., Шкаликов А.В., Шухин А.А., Калачёв А.А.: Противонаправленный режим генерации спонтанного параметрического рассеяния в нелинейном волноводе PPKTP

Шухин А.А., Калачёв А.А.: Спонтанное четырёхволновое смешение в суженных волокнах

Латыпов И.З., Шмелёв А.Г. (КФТИ КазНЦ РАН), Талипов А.А. (КНИТУ-КАИ), Калачёв А.А. (КФТИ КазНЦ РАН): Генерация коррелированных пар фотонов в оптических волоконных структурах с активно формируемым профилем дисперсии спектрально ограниченными лазерными импульсами

Акатьев Д.О., Калачёв А.А.: Контроль спектральных характеристик параметрического рассеяния света в нелинейных кристаллах с периодической доменной структурой

Чуприна И.Н. (КФУ), Калачёв А.А. (КФТИ КазНЦ РАН): Оптимизация кольцевых микрорезонаторов для наблюдения спонтанного четырёхволновного смешения в интегральном оптическом чипе.

Турайханов Д.А., Шкаликов А.В., Латыпов И.З., Калачёв А.А.: Генерация однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом в режиме спонтанного параметрического рассеяния в резонаторе

Черников С.К., Файзуллин А.М., Садчиков Ю.В.: Расчётное определение характеристик шины низкого давления

Тиркия А.А., Садыков М.Ф., Иванов Д.А., Конов А.Б.: Разработка и оптимизация приёмно-передающей системы детектирования опасных веществ на основе ЯКР

Устная сессия

7 февраля 2017 г.

Заседание 1. Председатель: И. В. Овчинников, д.ф.-м.н., проф.

Тарасов В.Ф., Соловаров Н.К. (КФТИ КазНЦ РАН), Жариков Е.В. (ИОФ РАН, Москва): Эффект Ханле в субмиллиметровой ЭПР-спектроскопии примесных ионов тулия в синтетическом форстерите

Фалин М.Л., Латыпов В.А., Леушин А.М., Кораблева С.Л. (КФУ): ЭПР иона Ce^{3+} в монокристалле Rb_2NaYF_6: эксперимент и теоретические вычисления оптических спектров

Салихов К.М.: Последовательная теория разделения спектров на независимые резонансные линии

Кандрашкин Ю.Е. (КФТИ КазНЦ РАН), Поддутоори П.К. (университет острова им. принца Эдварда, Шарлоттаун, Канада), ван дер Ист А. (университет им. Брока, Сант-Катарина, Канада): Исследование электронного транспорта в триадах TTF-AlPor-H_2Por и TTF-AlPor-AQ методами время-разрешённой ЭПР спектроскопии

Заседание 2. Председатель – Р. Ф. Мамин, д.ф.-м.н.

Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Кандрашкин Ю.Е., Мингалиева Л.В., Нургазизов Н.И., Ханипов Т.Ф.: Магнитоупругий эффект в микрочастицах пермаллоя

Ахметов М.М., Гумаров Г.Г., Петухов В.Ю., Рыбин Д.С., Коныгин Г.Н., Конов А.Б.: ЯМР-исследование конформационных изменений в глюконате кальция

Степанов А.Л., Галяутдинов М.Ф., Нуждин В.И., Валеев В.Ф. (КФТИ КазНЦ РАН), Воробьев В.В., Осин Ю.Н. (КФУ), Курбатова Н.В. (КФТИ КазНЦ РАН): Способ получения алмазных дифракционных элементов методом ионной имплантации

Горюнов Ю.В. (КФТИ КазНЦ РАН), Натепров А.Н. (ИПФ МАН, Молдова): Особенности образования и взаимодействия локализованных магнитных состояний в полуметалле Вейля

Шухин А.А., Калачёв А.А.: Спонтанное четырёхволновое смешение в суженных волокнах

Заседание 3. Председатель – В. Ф. Тарасов, д.ф.-м.н., проф.

Шахмуратов Р.Н. (КФТИ КазНЦ РАН), Вагизов Ф.Г. (КФУ), Scully M.O., Kocharovskaya O. (T&M University, USA): Применение частотных гребёнок низкой

чёткости для спектроскопии сверхвысокого разрешения

Калачёв А.А. (КФТИ КазНЦ РАН), Ахмеджанов Р.А., Гущин Л.А., Зеленский И.В., Кораблёва С.Л., Собгайда Д.А. (КФТИ КазНЦ РАН; ИПФ РАН, Н. Новгород): Квантовая память в изотопически чистом примесном кристалле $YLiF_4:Nd^{3+}$

Латыпов И.З., Шкаликов А.В., Шухин А.А., Калачёв А.А.: Противонаправленный режим генерации спонтанного параметрического рассеяния в нелинейном волноводе PPKTP

Лисин В.Н., Шегеда А.М., Самарцев В.В.: Биение света во время фотонного эха: наблюдение и применение

Акатьев Д.О., Калачёв А.А.: Контроль спектральных характеристик параметрического рассеяния света в нелинейных кристаллах с периодической доменной структурой

Конференция молодых учёных "Молодёжь и инновации Татарстана", 17–18 ноября 2016 года

Секция "Информационные технологии"

Акатьев Д.О. (КФТИ КазНЦ РАН): Разработка метода высокоскоростной стабилизации спектральных характеристик однофотонного источника, основанного на спонтанных параметрических процессах

Назаров В.В. (КНИТУ-КАИ, Чистопольский филиал): Разработка автоматизированного комплекса удалённого мониторинга и управления теплицей

Сафина Л.И. (КФУ): Восстановление линейной регрессии для прогнозирования электронагрузки на примере Республики Татарстан

Турайханов Д.А. (КФТИ КазНЦ РАН): Разработка способа генерации однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом

Секция "Медицина будущего"

Ахметзянова Э.Р. (КФУ): Разработка способа модификации клеток микроглии для стимуляции нейрорегенерации

Бакирова Д.Р. (КИББ КазНЦ РАН): Влияние этанола на структуру и вязкость адсорбированного фибрина

Галиева Л.Р. (КФУ): Реализация исследования по поиску новых терапевтических мишеней и биомаркеров при нейротравмах

Литвин Я.А. (КФУ): Создание плазмидной ДНК для генной терапии, экспрессирующей видоспецифичные для лошади факторы VEGF164 и FGF2

Небайкина М.Л. (КФУ): Разработка метода оценки контаминации медицинских катетеров и имплантатов с помощью атомно-силовой микроскопии

Омеляненко А.С. (ГАУЗ МКДЦ): Разработка метода беспроводной электрокардиостимуляции

Хасанов А.Г. (КНИТУ-КХТИ): Направленное влияние на структуру карбамидоформальдегидных олигомеров на основе КФК-85

Хасанова А.Ф. (КНИТУ-КХТИ): Влияние вида упаковочных материалов на сроки хранения мясных продуктов

Секция "Современные материалы и технологии их создания"

Бардасова А.Е. (КФУ): ЭПР исследование агрегации медь порфирина

Богданов Р.Р. (КГАСУ): Гидроизоляция плоских кровель модифицированным самоуплотняющимся бетоном, как способ повышения эксплуатационной надёжности зданий

Гимазов И.И. (КФТИ КазНЦ РАН): Исследование влияния сверхпроводящих флуктуаций на состояние $Bi_2Sr_2Ca_{1-x}Y_xCu_2O_{8+\delta}$ вблизи критической температуры

Зиатдинова Р.В. (КФУ): Получение новых сорбционных материалов на основе силикатно-макроциклических кластерных структур для экспресс-анализа воды

Камалиева Р.Ф. (КФУ): Образование комплекса между гидрохлорид полиаллиламином и нуклеиновыми кислотами

Прохорова С.В. (КНИТУ-КХТИ): Влияние температуры на сорбционные свойства модифицированного листового опада по отношению к нефти

Фатыхов Р.Р. (КФТИ КазНЦ РАН): Разработка электродных материалов для литий-ионных аккумуляторов с улучшенными удельными характеристиками

Харитонов Е.В. (КНИТУ-КХТИ): Разработка энергосберегающих реагентов с нанокомпонентами комплексного вязкостно-противотурбулентного действия для транспортировки тяжёлых нефтей и нефтяных эмульсий

Секция "Новые приборы и аппаратные комплексы"

Хундиряков В.Е. (КФУ): Разработка радиочастотного приёмного датчика повышенной чувствительности

Секция "Биотехнологии"

Вафина А.И. (КНИТУ-КХТИ): Использование новых молочнокислых бактерий для дальнейшего применения в производстве маложирного йогурта

Галлямова С.Р. (КФУ): Исследование свойств углеводородокисляющих микроорганизмов с целью разработки методов очистки почвы от токсикантов

Ежков Д.В. (КНИТУ-КХТИ): Перспективность изготовления и разработка технологии применения высокоэффективной кормовой добавки на основе наноструктурного фосфорита

Ежкова Д.В. (КНИТУ-КХТИ): Разработка органо-минеральной кормовой добавки наноструктурный сапропель для повышения эффективности птицеводства

Ишмухаметов И.Р. (КФУ): Сравнительный анализ цитотоксического эффекта минерала галлуазита на 2D и 3D культуры клеток млекопитающих

Самигулина Л.Р. (КНИТУ-КХТИ): Использование функциональных добавок при производстве пищевой продукции

Чередниченко Ю.В. (КФУ): Перспективы использования перевязочного материала пролонгированного действия для лечения инфицированных и склонных к инфицированию ран

Участие сотрудников в конференциях

Международные конференции

VI Всероссийская с международным участием школа-конференция "Физиология кровообращения", 2–5 февраля 2016, Москва, Россия

Гайнутдинов Х.Л., Пашкевич С.Г., Яфарова Г.Г., Андрианов В.В., Денисов А.А., Хотянович М.О., Кульчицкий В.А.: Исследование продукции оксида азота в гиппокампе, сердце и печени крыс при ишемическом инсульте: эффекты блокатора NO-синтазы L-NAME (устн.)

1st International Physics Conference at the Anatolian Peak (IPCAP 2016), February 25–27, 2016, Erzurum, Turkey

Ay F., Başaran A.C., Aktaş B., Goikhman A.Yu., Kupriyanova G.S., Rameev B.Z.: Magnetic properties of $Fe/SiO_2/Ni$ and $Fe/SiO_2/Co$ thin film structures (poster)

80th Annual Conference of the DPG and DPG Spring Meeting, March 6–11, 2016, Regensburg, Germany

Iakovleva M., Grafe H.-J., Vavilova E., Kataev V., Alfonsov A., Nojiri H., Sturza M.I., Wurmehl S., Büchner B.: Exotic spin phases in the one-dimensional spin-1/2 quantum magnet $LiCuSbO_4$ as seen by high-field NMR and ESR spectroscopies (poster)

Iakovleva M., Zeisner J., Valldor M., Vavilova E., Grafe H.-J., Zimmermann S., Alfonsov A., Kataev V., Büchner B.: Spin dynamics in the strongly magnetically frustrated compounds $YBaCo_3AlO_7$ and $YBaCo_3FeO_7$ probed by NMR and ESR spectroscopy (poster)

Leksin P., Garifyanov N., Kamashev A., Validov A., Fominov Y., Schumann J., Kataev V., Thomas J., Büchner B., Garifullin I.: "Isolation" of the proximity-induced triplet pairing channel in the superconductor/ferromagnet spin valve (oral)

Leksin P., Kamashev A., Schumann J., Kataev V., Thomas J., Büchner B., Garifullin I.: Boosting the superconducting spin valve effect in a metallic superconductor/ferromagnet heterostructure (poster)

Seidov Z., Tsurkan V., Krug von Nidda H.-A., Fillipova I., Günther A., Najafov A., Eremina R., Gavrilova T., Kiiamov A., Vagizov F., Tagirov L.R., Loidl A.: Magnetic properties of the chain antiferromagnets $RbFeSe_2$, $TlFeX_2$ (X = S, Se), and $Tl_3Fe_2S_4$ (poster)

APS March Meeting 2016, March 14–18, 2016, Baltimore, Maryland, USA

Ay F., Aktaş B., Khaibullin R.I., Nuzhdin V.I., Rameev B.Z.: Investigation of the magnetic properties of Ni-implanted ITO thin films (poster)

Международный симпозиум "Нанофизика и наноэлектроника", 14–18 марта 2016, Нижний Новгород, Россия

Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Кондрашкин Ю.Е., Горев Р.В., Мингалиева Л.В., Миронов В.Л., Нургазизов Н.И., Ханипов Т.Ф.: Исследование влияния упругих напряжений на магнитную анизотропию микрочастиц пермаллоя методом ферромагнитного резонанса (стенд.)

Бухараев А.А., Бизяев Д.А., Нургазизов Н.И., Чукланов А.П., Ханипов Т.Ф.: Изучение с помощью МСМ распределения локальных упругих напряжений, вызванных механической деформацией (приглашён.)

Горьков Л.П., Тейтельбаум Г.Б.: Энергетический спектр сверхпроводящих купратов в псевдощелевой фазе, (приглашён.)

Таланов Ю.И., Гимазов И.И., Шапошникова Т.С., Валидов А.А., Agachi T., Noji T., Koike Y.: Флуктуации сверхпроводящего параметра порядка в B_i = 2212 при $T > T_c$ (приглашён.)

24th International Congress on Glass, April 7–11, 2016, Shanghai, China

Kavetskyy T., Stepanov A.K.: Radiation-modified chalcogenide glasses: Structure, properties and applications (invited)

Kavetskyy T., Stepanov A.K.: Novel ion-implanted PMMA based glass nanocomposites (oral)

57th Experimental Nuclear Magnetic Resonance Conference, April 10–15, 2016, Pittsburgh, USA

Гафиятуллин Л.Г., Иванова Т.А., Мингалиева Л.В., Овчинников И.В., Суханов А.А., Туранова О.А., Фролова Е.Н.: Исследование комплекса [4-азагептаметилен-

1,7-бис(салицилидениминато)] (имидазол) железа (III) тетрафенилбората методами ЭПР и УФ спектроскопии (стенд.)

Turanov A., Khitrin A.K.: Ethanol clusters in gasoline-ethanol blends (poster)

International Symposium "Magnetic Resonance from Fundamental Research to Practical Application", April 21–23, 2016, Kazan, Russia

Баязитов А.А., Гуссамова Ч.И., Чумаров П.Ч., Хундиряков В.Е.: Разработка радиочастотной приёмно-передающей системы для специализированного томографа на постоянном магните с полем 0.4 Тл (устн.)

Гафиятуллин Л.Г., Иванова Т.А., Мингалиева Л.В., Овчинников И.В., Суханов А.А., Туранова О.А., Фролова Е.Н.: Исследование комплекса [4-азагептаметилен-1,7-бис(салицилидениминато)] (имидазол) железа (III) тетрафенилбората методами ЭПР и УФ спектроскопии (стенд.)

Хабипов Р.Ш., Шагалов В.А., Баязитов А.А.: Обработка и хранение медицинских изображений, полученных на томографах "ТМР-КФТИ", с использованием облачных технологий (стенд.)

Domracheva N.E., Vorobeva V.E., Gruzdev M.S.: EMR searching of quantum behavior of superparamagnetic γ-Fe_2O_3 nanoparticles encapsulated into poly(propylene imine) dendrimer (poster)

Gavrilova S.A., Deryagin O.G., Gainutdinov Kh.L., Andrianov V.V., Golubeva A.V., Yafarova G.G., Iyudin V.S., Buravkov A.V., Koshelev V.B.: Effect of activation and inhibition of K^+-ATP-channels on the NO production in the blood of rats with ischemic stroke (poster)

5th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM-2016), April 24–30, 2016, Fethiye, Turkey

Kataev V., Grafe H.-J., Iakovleva M., Vavilova E., Alfonsov A., Nojiri H., Sturza M.-I., Wurmehl S., Nishimoto S., Drechsler S.-L., Rößler U., Rosner H., Büchner B.: Exotic spin phases in the low-dimensional quantum magnet $LiCuSbO_4$ (poster)

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, May 8–13, 2016, Hangzhou, China

Goryunov Yu., Nateprov A.: Strong magnetic nonlinearity of MW and DC resistance in Cd_3As_2-semimetal with 3D Dirac fermions (poster)

Goryunov Yu., Nateprov A.: Observation of localized spin states in 3D Dirac semimetal by ESR (poster)

Научно-практическая конференция "Кислород и свободные радикалы", 19–20 мая, 2016, Гродно, Белоруссия

Яфарова Г.Г., Ягудин Р.Х., Шайхутдинов И.И., Андрианов В.В., Июдин В.С., Гайнутдинов Х.Л.: Продукция оксида азота и система антиоксидантной защиты при травматической болезни спинного мозга (заочное участие)

12-th Turkish Conference on Nanoscience and Nanotechnology (NanoTR-12), June 3–5, 2016, Darica-Kocaeli, Turkey

Güler A., Okay C., Shulgin D., Boyraz C., Şen A., Rameev B.: EPR studies of tetrahedrite doped by 3d transition ions (oral)

Maraşlı A., Öztürk Y., Aktaş B., Rameev B.: Development of magnet system for NMR measurements (poster)

Okay C., Rameev B., Valeev V.F., Khaibullin R.I.: FMR studies of magnetic anisotropy in iron-implanted single crystal rutile films (oral)

Okumuş E., Rameev B., Aktaş B., Açıkgöz M., Kazan S., EPR studies of Fe^{3+} centers in memristive TiO_2 single crystal (poster)

Shulgin D., Güler A., Boyraz C., Nazım A., Mozzhukhin G., Rameev B.: Magnetic properties of $Cu_{12-x}M_xSb_4S_{13}$ (M = Au, Fe) tetrahedrite (poster)

The 7th International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOOPMA-2016), June 12–17, 2016, Monreal, Canada

Kavetskyy T., Nowak J., Kuczumov A., Stepanov A.K.: Optical spectroscopy study of ion-irradiation-induced processes in Polymethilamethacrylate (PMMA) (poster)

Trzcinski M., Kavetskyy T., Stepanov A.L.: Optical UV-Vis characterisation of boron-ion-implanted polymethilamethacrylate (poster)

9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2016), June 20–24, 2016, Kharkiv, Ukraine

Guler A., Boyraz C., Shulgin D., Mozzhukhin G., Rameev B.: Synthesis and characterization of tetrahedrite compounds for thermoelectric applications (oral)

Rameev B.Z., Aktaş B.: NMR & MW techniques for detection of explosive and illicit materials (invited)

International Conference "Quantum in Complex Matter" (Superstripes 2016), June 23–29, 2016, Ischia, Italy

Kataev V., Grafe H.-J., Iakovleva M., Vavilova E., Alfonsov A., Nojiri H., Sturza M.-I., Wurmehl S., Nishimoto S., Drechsler S.-L., Rößler U., Rosner H., Büchner B.: Possible magnetic field induced hidden order in the low-dimensional quantum magnet $LiCuSbO_4$ (poster)

Sakhin V., Kukovitskii E., Garif'yanov N., Talanov Yu., Teitel'baum G.: Inhomogeneous state of the Mn doped topological insulator Bi_2Te_3 (invited)

1st International Symposium Advanced Photonics Materials (APM 2016), June 27–July 1, 2016, St. Petersburg, Russia

Vorobev VV., Osin Y.N., Brandt N.N., Stepanov A.L.: Novel SERS-substrate based on porous silicon with implanted silver nanoparticles (poster)

XI Международная научная школа "Наука и инновации-2016", 5–12 июля 2016, Йошкар-Ола, Россия

Акатьев Д.О., Калачёв А.А., Латыпов И.З., Шкаликов А.В.: Управление спектром спонтанного параметрического рассеяния света с помощью внешнего электрического поля (устн.)

Латыпов И.З., Шкаликов А.В., Шухин А.А., Калачёв А.А.: Противонаправленный режим генерации спонтанного параметрического рассеяния в нелинейном волноводе PPKTP (устн.)

Самарцев В.В., Митрофанова Т.Г.: Коррелированные сигналы стимулированного фотонного эха при трёхквантовом фемтосекундном возбуждении коллоидных квантовых точек CdSe-CdS (стенд.)

Турайханов Д.А., Шкаликов А.В., Латыпов И.З., Акатьев Д.О., Калачёв А.А.: Генерация однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом в кристалле PPLN (устн.)

Шкаликов А.В., Латыпов И.З., Турайханов Д.А., Калачёв А.А., Самарцев В.В.: Проблемы генерации однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом для атмосферной оптической квантовой связи (устн.)

Шмелёв А.Г., Шамилов Р.Р., Леонтьев А.В., Жарков Д.К., Лобков В.С.: Кинетика оптических параметров композитных материалов с квантовыми точками на основе халькогенидов кадмия (стенд.)

25th International Laser Physics Workshop, July 11–15, 2016, Yerevan, Armenia

Akhmedzhanov R.A., Gushchin L.A., Kalachev A.A., Korableva S.L., Nizov N.A., Nizov V.A., Sobgayda D.A., Zelensky I.V.: Cavity-assisted quantum memory in an isotopically pure $YLiF_4:Nd^{3+}$ crystal (invited)

Shakhmuratov R.N., Vagizov F.G., Antonov V.A., Radeonychev Y.V., Scully M.O., Kocharovskaya O.: Time-bin qubits via transformation of a single photon field into bunches of pulses (invited)

VI International Conference "Frontiers of Nonlinear Physics" (FNP'2016), July 17–23, 2016, Nizhny Novgorod-Saint Petersburg, Russia

Kalachev A.A.: Developing quantum memories in isotopically pure doped crystals (invited)

Shakhmuratov R.N., Vagizov F.G., Scully M.O., Kocharovskaya O.: Application of the low finesse gamma-ray frequency comb for high-resolution spectroscopy (invited)

International Conference of Quantum Fluids and Solids (QFS 2016), August 10–16, 2016, Prague, Czech Republic

Iakovleva M., Grafe H.-J., Vavilova E., Kataev V., Alfonsov A., Nojiri H., Sturza M.I., Wurmehl S., Büchner B.: Investigation of exotic spin phases in the one-dimensional spin-1/2 quantum magnet $LiCuSbO_4$ by high-field NMR spectroscopy (poster)

Salikhov T., Klysheva E., Zvereva E., Nalbandyan V., Vavilova E.: Influence of non-stoichiometry on the frustrated honeycomb system $Li_3Ni_2SbO_6$ (poster)

VI Euro-Asian Symposium "Trends in Magnetism-2016" (EASTMAG-2016), August 15–19, 2016, Krasnoyarsk, Russia

Eremina R.M., Seidov Z.Yu., Ibrahimov I.N., Najafzade M.J., Aljanov M.A., Mamedov J.V., Gavrilova T.P., Gilmutdinov I.F., Chichkov V.I., Andreev N.V.: Magnetization of manganite thin films on ferroelectric substrates (oral)

GavrilovaT.P., Yatsyk I.V., Eremina R.M., Gilmutdinov I.F., Kabirov Y.V., Gavrilyatchenko V.G., Nikitina J.A.: Magnetic properties of composites based on $CaCu_3Ti_4O_{12}$. (poster)

Yatsyk I.V., Eremina R.M., Gavrilova T.P., Kalachev A.A., Kutovoi S.A., Zavartsev Y.D.: ESR investigations of $Y_2SiO_5:Nd^{3+}$ as a material for the optical quantum memory (poster)

Baikal International Conference "Magnetic Materials. New Technologies" (BICMM -2016), August 22–26, 2016, Irkutsk, Russia

Moshkina E.M., Eremin E.V., Eremina R.M., Rautskiy M.V., Bezmaternykh L.N.: Synthesis and magnetic properties of Cu_2MnBO_5 ludwigite (poster)

"Energy, Material and Nanotechnology" Meeting on Smart and Multifunctional Material, August 23–26, 2016, Berlin, Germany

Stepanov A.L.: Porous silicon with silver nanoparticles formed by ion implantation as potential candidate material for solar cell application (invited)

Workshop "Modern Nanotechnologies", August 27–29, 2016, Ekaterinburg, Russia

Mamin R.F., Bizyaev D.A., Yusupov R.V., Bukharaev A.A.: Phase separation and locally induced states in manganites (invited)

Mamin R.F., Tayurskii D.A.: Phenomenological model of dielectric properties for PMN-PT (poster)

Migachev S.A., Mamin R.F., Yusupov R.V., Tirkiya A.A., Sadykov M.F.: Photoconductivity and photostimulated currency in PMN-PT (poster)

10th Asia-Pacific EPR/ESR Symposium, August 28–September 03, Irkutsk, Russia

Eremina R.M., Moshkina E.M., Rautskii M.V., Bezmaternukh L.N., Krug von Nidda H.-A., Loidl A.: Magnetic properties of $Cu_{1.8}Mn_{1.2}BO_5$ (poster)

Eremina R.M., Yatsyk I.V., Gavrilova T.P., Gilmutdinov I.F., Chichkov V.I., Andreev N.V.: Magnetic properties of $YMnO_3$ ceramic samples (oral)

Kandrashkin Yu.E., Poddutoori P.K., van der Est A.: Electron spin polarization study of charge separated states in molecular triads centered by aluminum porphyrin (oral)

Sukhanov A., Voronkova V., Tyurin V.: CW Time-Resolved and pulse EPR investigations of photoinduced spin states of metalloporphyrin derivatives systems (oral)

Zaripov R.B., Vavilova E.L., Voronkova V.K., Salikhov K.M., Aliabadi A., Petr A., Kataev V., Büchner B., Abdulmalic M.A., Rüffer T.: Investigation of hyperfine interaction

in Cu(II)-bis(oxamidato) complexes by pulse ED NMR technique (oral)

IX Международная научная конференция "Фулерены и наноструктуры в конденсированных средах", 6–9 сентября 2016, Минск, Беларусь

Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Галяутдинов М.Ф.: Алмазная дифракционная решётка (пленарн.)

8th International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2016 (HFM 2016), September 7–11, 2016, Taipei, Taiwan

Nishimoto S., Drechsler S.-L., Rößler U., Rosner H., Kataev V., Grafe H.-J., Iakovleva M., Vavilova E., Alfonsov A., Nojiri H., Sturza M.-I., Wurmehl S., Büchner B.: Exotic spin phases in the low-dimensional quantum magnet $LiCuSbO_4$ (poster)

11th International Conference on Physics of Advanced Materials. September 8–14, 2016, Cluj-Napoca, Romania

Leksin P., Garifyanov N., Kamashev A., Validov A., Fominov Y., Schumann J., Kataev V., Thomas J., Büchner B., Garifullin I.: "Isolation" of the proximity-induced triplet pairing channel in the superconductor/ferromagnet spin valve (oral)

Leksin P., Kamashev A., Schumann J., Kataev V., Thomas J., Büchner B., Garifullin I.: Role of the superconducting layer morphology in superconducting spin valve effect for S/F/F structures (poster)

XIII Международная конференция "Спектроскопия координационных соединений", 11–17 сентября 2016, Туапсе, Россия

Лапаев Д.В., Никифоров В.Г., Лобков В.С., Князев А.А., Крупин А.С., Галяметдинов Ю.Г.: Влияние структуры плёнок β-дикетонатного комплексов лантаноидов (III) на геометрию их координационного узла и механизмы внутримолекулярного переноса энергии (устн.)

8th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, September 12–16, 2016, Chisinau, Moldova

Nateprov A.N., Goryunov Yu.: Magnetic susceptibility and electron spin resonance in 3D Dirac semimetal Cd_3As_2 doped europium (poster)

Seidov Z., Krug von Nidda H.-A., Tsurkan V., Fillipova I., Günther A., Vagizov F., Kiiamov A., Tagirov L.R., Gavrilova T., Najafov A., Aliyev M., Loidl A.: Magnetic properties of the chain antiferromagnets $RbFeSe_2$, $TlFeS_2$, $TlFeSe_2$, $Tl_3Fe_2S_4$ (poster)

XXII Международная конференция "Оптика и спектроскопия конденсированных сред", 18–24 сентября 2016, Краснодар, Россия

Суханов А.А., Тарасов В.Ф., Жариков Е.В., Лис Д.А., Субботин К.А.: Примесные центры иттербия в синтетическом форстерите. Исследование методом ЭПР-спектроскопии (устн.)

Шакуров Г.С., Асатрян Г.Р., Петросян А.Г., Ованесян К.Л.: Высокочастотная ЭПР спектроскопия кристаллов YAG (устн.)

VII International Conference "High-Spin Molecules and Molecular Magnets", September 19–23, 2016, Novosibirsk, Russia

Domracheva N., Vorobeva V., Pyataev A., Gruzdev M., Chervonova U., Kolker A.: New magnetic nanostructures with multifunctional properties based on iron-containing dendrimers (invited)

II Международная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых учёных "Материалы и технологии XX века", 20–23 сентября, 2016, Казань, Россия

Воробьев В.В., Осин Ю.Н., Брандт Н.Н., Степанов А.Л.: Эффект усиления комбинационного рассеяния света красителя метил оранжевого на ионно-синтезированных наночастицах серебра в кремнии (стенд.)

41th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves, September 25–30, 2016, Copenhagen, Denmark

Zhukova E., Belyanchikiov M., Torgashev V., Thomas V., Savinov M., Kadlec C., Kadlec F., Prokhorov A., Kadyrov L., Petzelt J., Ostapchuk T., Fursenko D., Thomas P., Shakurov G., Dressel M., Gorshunov B.: Terahertz dynamics of nanoconfined water molecules (poster)

19th International Conference and School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications, Sozopol, Bulgaria, September 26–30, 2016

Stepanov A.L.: Laser annealing of metal nanoparticles synthesized in glasses by ion implantation (invited)

XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry. September 26–30, 2016, Yekaterinburg, Russia

Ашуров М.С., Степанов А.Л., Климонский С.О.: Изготовление дифракционных решеток методом осаждения коллоидных микрочастиц (стенд.)

Khafizov N.R., Madzhidov T.I., Kadkin O.N., Antipin I.S.: Effect of substituents on the intramolecular ferromagnetic exchange coupling in N,N′-dioxy-2,6-diazaadamantane biradical (poster)

International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO) / Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT), September 26–30, 2016, Minsk, Belarus

Akhmedzhanov R.A., Gushchin L.A., Kalachev A.A., Korableva S.L., Sobgayda D.A., Zelensky I.V.: Raman quantum memory in isotopically pure rare-earth-ion-doped solids (invited)

Ivlev G.D., Prakopyev S.L., Gatskevich E.I., Batalov R.I., Bayazitov R.M., Faizrakhmanov I.A.: Dynamics of nanopulsed laser annealing of thin film germanium (oral)

Latypov I.Z., Shukhin A.A., Akatiev D.O., Shkalikov A.V., Kalachev A.A.: Backward-wave spontaneous parametric down-conversion in a periodically poled KTP waveguide (poster)

Shmelev A.G., Leontiev A.V., Zharkov D.K., Nikiforov V.G., Lobkov V.S.: Ultrafast nonlinear properties of bulk semiconductors and quantum dots (poster)

XIV International Conference "Mössbauer Spectroscopy and Applications" (XIV ICMSA), September 28–October 1, 2016, Kazan, Russia

Ахметов М.М., Петухов В.Ю., Гумаров Г.Г., Конов А.Б., Коныгин Г.Н., Рыбин Д.С.: ^{1}H ЯМР исследование раствора лекарственного препарата МАКГ (стенд.)

Зиннатуллин А.Л., Гумаров А.И., Гильмутдинов И.Ф., Валеев В.Ф., Хайбуллин Р.И., Вагизов Ф.Г.: Мёссбауэровские исследования магнитных свойств тонких плёнок оксида цинка, имплантированных ионами железа (стенд.)

Латыпова Р.И., Дулов Е.Н., Хайбуллин Р.И.: Микроструктура и магнитные свойства плёнок титаната стронция, имплантированного железом (стенд.)

Лядов Н.М., Базаров В.В., Вагизов Ф.Г., Шустов В.А., Дулов Е.Н., Носков А.И., Хайбуллин Р.И., Файзрахманов И.А.: Анализ структуры и магнитно-фазового состава плёнок ^{57}Fe, сформированных по технологии ионно-стимулированного осаждения (стенд.)

Shakhmuratov R.N., Vagizov F.G.: New model for acoustically induced Mössbauer sidebands from a single parent line (invited)

Vagizov F.G., Shakhmuratov R.N.: New applications of the Mössbaer effect (invited)

International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE-2016, October 2–7, 2016, Tomsk, Russia

Novikov H., Batalov R., Bayazitov R., Faizrakhmanov I., Lyadov N., Shustov V., Ivlev G.: Pulsed beam modification of highly doped Ge:Sb layers deposited on the different substrates (poster)

VII Международная научная конференция "Материалы и структуры современной электроники", 12–13 октября 2016, Минск, Беларусь

Хайбуллин Р.И.: Новые аспекты ионной имплантации (приглашён.)

Международная конференция "Трансляционная медицина 2016", 13–14 октября 2016, Казань, Россия

Андрианов В.В., Яфарова Г.Г., Гайнутдинов Х.Л.: Интенсивность продукции оксида азота в мозге крыс после ишемического инсульта: ЭПР исследование (стенд.)

Яфарова Г.Г., Андрианов В.В., Гайнутдинов Х.Л.: Исследование интенсивности продукции оксида азота у крыс после повреждения спинного мозга (стенд.)

XX Международная молодёжная научная школа "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия", 18–20 октября 2016, Казань, Россия

Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Нургазизов Н.И., Чирков В.В., Чукланов А.П., Ханипов Т.Ф.: Исследование трансформации доменной структуры при механической деформации микрочастиц пермаллоя (стенд.)

Бухараев А.А.: Стрейнтроника (приглашён. лекция)

Воробьев В.В., Осин Ю.Н., Брандт Н.Н., Таюрский Д.А., Степанов А.Л.: Усиление комбинационного рассеяния света на пористом кремнии с наночастицами серебра, полученного методом ионной имплантации (устн.)

Морозова А.С., Зиганшина С.А., Бухараев А.А., Зиганшин М.А.: Исследование методами АСМ процессов самоорганизации в плёнках дипептида при воздействии парообразных органических соединений (стенд.)

Самарцев В.В., Митрофанова Т.Г.: Коррелированные сигналы аккумулированного фотонного эха на квантовых точках CdSe-CdS (стенд.)

Турайханов Д.А., Шкаликов А.В., Латыпов И.З., Калачёв А.А.: Генерация однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом в режиме спонтанного параметрического рассеяния в кристалле PPLN (устн.)

XIX International Youth Scientific School "Actual Problems of Magnetic Resonance and its Application", October 24–28, 2016, Kazan, Russia

Bakirov M.M.: Analysis of manifestations of spin exchange and dipole-dipole interactions in EPR spectra of nitroxyl radical solutions (oral)

Bardasova A.E., Sukhanov A.A., Voronkova V.K., Tyurin V.S.: EPR investigation of the aggregation of copper porphyrin (oral)

Salikhov T., Klysheva E., Iakovleva M., Zvereva E., Shukaev I., Nalbandyan V., Medvedev B., Vavilova E.: Influence of non-stoichiometry on the frustrated honeycomb system $Li_3Ni_2SbO_6$ (poster)

Seidov Z., Gavrilova T.P., Eremina R.M., Svistov L.E., Bush A.A., Loidl A., Krug von Nidda H.-A.: Anisotropic exchange interaction in low dimensional systems (oral)

Likerov R., Eremina R., Gavrilova T., Yatsyk I., Fazlizhanov I., Shustov V., Zavartsev Yu., Zagumennyi A., Kutovoi S.: Investigations of Y_2SiO_5:Nd^{143} by ESR method (oral)

627th WE-Heraeus Seminar Low Dimensional Quantum Systems: Models and Materials, October 31–November 4, 2016, Bad Honnef, Germany

Kataev V., Grafe H.-J., Iakovleva M., Vavilova E., Alfonsov A., Nojiri H., Sturza M.-I., Wurmehl S., Nishimoto S., Drechsler S.-L., Rößler U., Rosner H., Büchner B.: Magnetic field induced "hidden" spin phase in the low-dimensional quantum magnet $LiCuSbO_4$ (poster)

Modern Development of Magnetic Resonanc, October 31 – November 4, 2016, Kazan, Russia

Akhmedzhanov R., Gushchin L., Kalachev A., Korableva S., Sobgayda D., Zelensky I.: Optical quantum memory in isotopically pure crystals doped by rare-earth ions (oral)

Akhmetov M.M., Gumarov G.G., Petukhov V.Yu., Konygin G.N., Rybin D.S., Konov A.B.: NMR Investigation of conformational changes in calcium gluconate (poster)

Bakirov M.M., Salikhov K.M., Galeev R.T.: Analysis of manifestations of the spin coherence transfer in EPR spectra of nitroxyl radicals in liquids (poster)

Biziyaev D.A., Bukharaev A.A., Kandrashkin Yu.E., Khanipov T.F., Mingalieva L.V., Nurgazizov N.I.: Application of ferromagnetic resonance for investigation of magnetic properties of strained permalloy microparticles (oral)

Domracheva N.E., Vorobeva V.E., Gruzdev M.S.: EMR searching of quantum behavior of superparamagnetic γ-Fe_2O_3 nanoparticles fabricated in dendrimeric matrix (poster)

Domracheva N.E., Vorobeva V.E., Ovcharenko V.I., Bogomyakov A.S., Zueva E.M., Gruzdev M.S., Chervonova U.V., Kolker A.M.: Counterion effect on the spin-transition properties of the second generation iron(III) dendrimeric complexes (poster)

Eremina R.M., Yatsyk I.V., Moshkina E.M., Rautskii M.V., Bezmaternykh L.N., Krug von Nidda H.-A., Liodl A.: ESR study of mn-heterovalent ludwigite $Mn_{3-x}Cu_xBO_5$ (poster)

Falin M.L., Latypov V.A., Leushin A.M., Korableva S.L.: Electron paramagnetic resonance of Ce^+ ion in Rb_2NaYF_6 single crystal: experiment and theoretical calculations of the optical spectra (poster)

Falin M.L., Latypov V.A., Safiullin G.M., Leushin A.M., Petrov S.V.: EPR and optical spectroscopy of Yb^+ in hexagonal perovskite $RbMgF_3$ single crystal (poster)

Galeev R.T.: Spin dynamics in the vicinity of levels anticrossing (poster)

Gavrilova S.A., Deryagin O.G., Gainutdinov Kh.L., Andrianov V.V., Golubeva A.V., Yafarova G.G., Iyudin V.S., Buravkov A.V., Koshelev V.B.: Effect of activation and inhibition of K^+ATP-channels on the NO production in the blood of rats with ischemic stroke (poster)

Gavrilova T., Yatsyk I., Eremina R., Gilmutdinov I., Kabirov Y., Nikitina J.: Magnetic resonance investigations of core-shell composites based on $CaCu_3Ti_4O_{12}$ (poster)

Gerasimov K.I., Moiseev S.A., Morozov V.I., Zaripov R.B.: Microwave pulses storage by using spin-frequency comb protocol combined with gradient pulses of magnetic field (oral)

Goenko I.A., Petukhov V.Yu., Yatzyk I.V., Konygin G.N., Rybin D.S., Andreeva I.N., Anisimov A.V., Sharafutdinova D.R.: EPR investigation of the radiation-induced transformation in calcium gluconate (poster)

Goryunov Yu.V., Nateprov A.N.: Electron spin resonance on Eu^+ impurities in 3D topological semimeta (poster) l

Iakovleva M., Vavilova E., Grafe H.-J., Kataev V., Kaustuv M., Vogl M., Dey T., Wurmehl S., Büchner B.: NMR investigation of IR-based double perovskites (oral)

Ibragimova M.I., Chushnikov A.I., Cherepnev G.V., Petukhov V.Yu.: Correlation of EPR and biochemical results of iron metabolism study in serum of professional athletes (poster)

Ivanova T.A., Ovchinnikov I.V., Turanova O.A., Mingalieva L.V., Gilmutdinov I.F., Shustov V.A.: Influence of the outer-sphere anion on electronic and magnetic properties of $[Fe(3\text{-}CH_3O\text{-}Qsal)_2]Y \cdot n$ Solvent (n = 0, 1) complexes (poster)

Izotov A.V., Belyaev B.A., Solovev P.N.: Determination of magnetic anisotropies parameters and miscut angles for epitaxial thin films grown on vicinal (111) substrates using ferromagnetic resonance (poster)

Kadkin O.N., Khafizov N.R., Madzhidov T.I., Antipin I.S.: Elucidating mechanisms of intramolecular exchange interaction in substituted N,N′-dioxy-2,6-diazaadamantane biradicals (poster)

Kandrashkin Yu.E., Poddutoori P.K., van der Est A.: Electron transfer pathways in molecular triads centered by aluminum porphyrin (oral)

Khabipov R., Sitdikov I., Fattakhov Ya.: Cloud project for storage and processing of medical images obtained by MRI of Zavoisky Kazan Physical Technical Institute (poster)

Khairuzhdinov I.T., Zaripov R.B., Salikhov K.M., Gubskaya V.P., Nuretdinov I.A.: Modeling of the temperature dependence of the EPR spectra of fullerene C60 Nitroxide derivatives in liquid (poster)

Lisin V.N., Shegeda A.M., Samartsev V.V.: Beating of light during photon echo. Observation and application (oral)

Lvov S., Kukovitsky E.: Hyperfine structure of Er^+ Ion in bulk copper (poster)

Mamadazizov S., Kupriyanova G.: NQR Relaxation times distribution of 5-aminotetrazole monohydrate (poster)

Mamatova A., Savostina L.: Investigation of Influence conformations of nitroxyl radicals on EPR parameters by DFT method (poster)

Maraşlı A., Maksutoğlu M., Öztürk Y., Rameev B.Z.: Development of permanent magnet system for time-domain NMR (poster)

Melnikova D.L., Shipunov T.V., Makarov M.N., Zhou H., Gizatullin B.I.: Molecular mobility of n-hexane in silicailte-1 by 2D NMR relaxo- and diffusometry (poster)

Moiseev S.A., Gubaidullin F.F., Kirillov R.S., Latypov R.R., Perminov N.S., Petrovnin K.V., Sherstyukov O.N.: Impedance-matched bragg-type microwave quantum memory (oral)

Murzakaev V., Bragin A., Kirgizov D., Nurgaliev D., Alexandrov A., Ivanov A., Doroginitcky M., Skirda V., Fattakhov Ya., Shagalov V., Fakhrutdinov A., Khabipov R., Anikin A.: Complex downhole apparatus for magnetic resonance logging (poster)

Ovchinnikov I., Ivanova T., Suhanov A., Frolova E., Turanova O., Mingalieva L., Gafiyatullin L.: EPR investigation of some complexes of Fe(III) with pentadentate ligand (poster)

Rameev B.Z., Çolak B., Ünver İ.S., Mozzhukhin G.V.: Recent developments in microwave & magnetic resonance detection of explosive / illicit materials (oral)

Salikhov K.: Why EPR will save the world? (oral)

Salikhov K.M.: Consistent paradigm of the spectra decomposition into independent resonance lines (poster)

Salikhov T., Klysheva E., Iakovleva M., Zvereva E., Shukaev I., Nalbandyan V., Medvedev B., Vavilova E.: Influence of non-stoichiometry on the frustrated honeycomb system $Li_3Ni_2SbO_6$ (poster)

Shakurov G.S., Asatryan G.R., Hovhannesyan K.L., Petrosyan A.G.: High-frequency EPR spectroscopy of YAG: Fe, Ce (poster)

Shukla A.K., Maiti T., Eremina R.M., Yatsyk I.V., Krug von Nidda H.-A.: Synthesis and characterization of $Gd_{1-x}Sr_xMnO_3$ (x = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8) (poster)

Sukhanov A., Galeev R., Voronkova V., Baniodeh A., Powell A.: Dysprosium containing clusters: some features of epr of the polycrystalline samples (poster)

Sukhanov A.A., Voronkova V.K., Tyurin V.S.: Photoinduced spin states of copper porphyrin dimers (poster)

Tarasov V., Solovarov N., Zharikov E.: High frequency zero field EPR spectroscopy of thulium impurity centers in synthetic forsterite (poster)

Tarasov V., Sukhanov A., Zharikov E.: Determining the structure and magnetic properties of ytterbium impurity centers in synthetic forsterite by X-band EPR spectroscopy (oral)

Turanov A., Khitrin A.K.: Ethanol clusters in gasoline-ethanol blends (poster)

Ulanov V.A.: EPR Study of special cases of the Jahn-Teller effect realized in the fluorite type crystals with d-ion dopants (oral)

Vavilova E., Krupskaya Y., Schäpers M., Wolter A.U.B., Grafe H.-J., Möller A., Büchner B., Kataev V.: Spin-1/2 chain magnet $BaAg_2Cu[VO_4]_2$ studied by magnetic resonance technique (oral)

Volkov M.Yu., Bakirov M.M., Galeev R.T., Sukhanov A.A., Salikhov K.M.: New protocol of experiments for determining the rate of the spin coherence transfer in a course of the spectral diffusion when spectra have resolved multicomponent structure (poster)

Yurtaeva S.V., Efimov V.N., Salnikov V.V., Rodionov A.A., Yatsyk I.V.: Orientation-dependent EMR Signals in biological tissues. Characteristics and interpretation (poster)

Zhiteitsev E.R., Zaripov R.B., Ulanov, V.A.: EPR study of the BaF_2 crystals activated by Nb^+ ions (poster)

13th International Youth School-Conference "Magnetic Resonance and its Applications", November 20–26, 2016, Saint Petersburg, Russia

Shestakov A.V., Fazlizhanov I.I., Yatsyk I.V., Ibragimova M.I., Shustov V.A., Eremina R.M.: The oscillations in ESR spectra of $Hg_{0.76}Cd_{0.24}Te$:Ag (oral)

Shestakov A.V., Eremina R.M., Gavrilova T.P., Yatsyk I.V., Sukhanov A.A., Zavartsev Y.D., Zagumennyi A.I., Kutovoi S.A.: Investigations of Y_2SiO_5:Nd^{143} by ESR method (poster)

VII Международная научная конференция "Актуальные проблемы физики твёрдого тела", 22–25 ноября 2016, Минск, Беларусь

Степанов А.Л.: Синтез и приложения для энергетики слоёв пористого кремния с наночастицами серебра, сформированных методом ионной имплантации, (пленарн.)

IV Всероссийская научная молодёжная конференция с международным участием "Актуальные проблемы микро- и наноэлектроники", 29 ноября–2 декабря 2016, Уфа, Россия

Бухараев А.А.: Стрейнтроника – основа для создания устройств обработки информации (пленарн.)

Российские конференции

Итоговая научно-образовательная конференция студентов Казанского федерального университета, 1 марта–30 апреля 2016, Казань, Россия

Кусова А.М., Зарипов Р.Б.: Изучение спин-спинового взаимодействия в бирадикале с помощью метода нестационарной нутации (стенд.)

Скворцова П.В., Зарипов Р.Б.: Разработка резонатора на 94 ГГц для спектрометра ЭПР (стенд.)

Итоговая конференция молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН, 28 апреля 2016, Казань

Баязитов А.А., Гуссамова Ч.И., Хундиряков В.Е.: Разработка приёмно-передающей системы для малогабаритных томографов на постоянном магните с полем 0.4 Тл (устн.)

Камашев А.А., Лексин П.В., Гарифьянов Н.Н., Валидов А.А., Фоминов Я.В., Thomas J., Schumann J., Катаев В., Büchner B., Гарифуллин И.А.: Экспериментальное исследование роли триплетного спаривания в эффекте сверхпроводящего спинового клапана (пленарн.)

Кусова А.М., Скворцова П.В., Зарипов Р.Б.: Метод нестационарной нутации в импульсном ЭПР (устн.)

Ликеров Р.Ф., Яцык И.В., Ерёмина Р.М., Гаврилова Т.П.: Исследование Y_2SiO_5:Nd^{3+} как материала для оптической квантовой памяти методами ЭПР-спектроскопии (устн.)

Салихов Т.М., Клышева Э.Р., Зверева Е.А., Налбандян В.Б., Вавилова Е.Л.: Влияние дефектов на магнитные и проводящие свойства $Li_3Ni_2SbO_6$ (устн.)

Скворцова П.В., Кусова А.М., Зарипов Р.Б.: Расчёт резонатора Фабри-Перо W-диапазона для спектрометра ЭПР (устн.)

Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Галяутдинов М.Ф., Степанов А.Л.: Оптическая дифракционная методика регистрации температуры твёрдых тел на базе ПММА (устн.)

Хамидуллина А.Ф., Калачёв А.А.: Трёхфотонное спонтанное параметрическое рассеяние в оптоволоконном резонаторе (устн.)

Ханипов Т.Ф., Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Кондрашкин Ю.Е., Мингалиева Л.В., Нургазизов Н.И.: Магнитоупругий эффект в микрочастицах пермаллоя (пленарн.)

Хантимеров С.М., Гарипов Р.Р.: Новые функциональные материалы на основе полимерных сред, легированных модифицированными углеродными наноструктурами (пленарн.)

Чуприна И.Н., Калачёв А.А.: Однофотонный источник на основе спонтанного четырёхволнового смешения в интегральном оптическом чипе (устн.)

Шестаков А.В., Фазлижанов И.И., Ерёмина Р.М., Яцык И.В., Ибрагимова М.И., Шустов В.А.: Исследование сплавов HgCdTe:Ag и HgSe:Cr (устн.)

Шухин А.А., Калачёв А.А.: Бифотонная рефрактометрия на основе спонтанного четырёхволнового смешения в суженных волокнах (устн.)

Яковлева М., Вавилова Е., Катаев В.: Экзотическая спиновая фаза в 1D квантовом магнетике $LiCuSbO_4$ (пленарн.)

XXVI Российская конференция по электронной микроскопии (РКЭМ-2016), 30 мая–3 июня 2016, Москва, Зеленоград, Россия

Бухараев А.А., Бизяев Д.А., Зиганшина С.А., Нургазизов Н.И., Ханипов Т.Ф., Чукланов А.П.: Исследование методами магнитно-силовой микроскопии магнитной анизотропии микрочастиц, наведённой механической деформацией (устн.)

Воробьев В.В., Осин Ю.Н., Самохина А.И., Эйдельман К.Б., Табачкова Н.Ю., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Степанов А.Л.: Электронная и зондовая микроскопия пористого кремния с наночастицами серебра, полученного методом ионной имплантации (стенд.)

Зиганшин М.А., Герасимов А.В., Горбачук В.В., Зиганшина С.А., Бухараев А.А.: Взаимодействие тонких плёнок олигопептидов с парообразными соединениями (устн.)

Зиганшина С.А., Морозова А.С., Бухараев А.А., Зиганшин М.А.: Самоорганизация в тонкой плёнке дипептида l-глицил-l-глицин под действием парообразных органических соединений (стенд.)

Всероссийская конференция "Структура и динамика молекулярных систем". 4–8 июля 2016, Яльчик, респ. Марий-Эл, Россия

Юртаева С.В., Ефимов В.Н., Сальников В.В., Фахрутдинов А.Р.: Анизотропные сигналы ЭМР в биологических системах: характеристики и интерпретация (устн.)

XI Конференция и X Школа молодых учёных и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе – "КРЕМНИЙ-2016", 12–15 сентября 2016, Новосибирск, Россия

Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Файзрахманов И.А., Курбатова Н.В., Лядов Н.М., Ивлев Г.Д.: Наносекундная лазерная обработка сильно легированных слоёв n-Ge:Sb, осаждённых на полупроводниковые и изолирующие подложки (устн.)

Воробьев В.В., Осин Ю.Н., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Степанов А.Л.: Периодическое микроструктуирование на слоях пористого кремния с наночастицами серебра, сформированными методом ионной имплантации (устн.)

IV Всероссийская научная конференция "Наноструктуированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики", 29–30 сентября 2016, Чебоксары, Россия

Воробьев В.В., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Осин Ю.Н., Степанов А.Л.: Пористый кремний с наночастицами серебра, полученный ионной имплантацией, как потенциальный материал для солнечных элементов (устн.)

Региональная научно-практическая конференция "Развитие региональных научных исследований в рамках взаимодействия Российского фонда фундаментальных исследований и Академии наук Республики Татарстан", посвящённая 25-летию образования Академии наук Республики Татарстан. 29–30 сентября 2016, Казань, Россия

Тарасов В.Ф., Мингалиева Л.В., Зарипов Р.Б., Жариков Е.В. Субботин К.А.: Структура и магнитные свойства примесных центров эрбия в синтетическом форстерите. Изучение методом ЭПР-спектроскопии (устн.)

XXV Съезд по спектроскопии, 3–7 октября 2016, Троицк, Москва, Россия

Жарков Д.К., Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Никифоров В.Г., Лобков В.С.: Когерентный лазерный контроль молекулярной динамики в жидкостях (стенд.)

Калачёв А.А.: Перспективные схемы оптической квантовой памяти в изотопически чистых примесных кристаллах (приглашён.)

Шмелёв А.Г., Леонтьев А.В., Жарков Д.К., Лобков В.С.: Фемтосекундная спектроскопия квантовых точек CdSe/CdS (core/shell) (стенд.)

VIII Всероссийская молодёжная научная конференция "Минералы: строение, свойства, методы исследования", 17–20 октября 2016, Екатеринбург, Россия

Мухаметшин А.В., Гумаров А.И., Вагизов Ф.Г., Хайбуллин Р.И., Лопатин О.Н.: Мёссбауэровская спектроскопия природного кварца, имплантированного ионами железа (стенд.)

Фундаментальные проблемы оптики, 17–21 октября, 2016, Санкт-Петербург, Россия

Акатьев Д.О., Калачёв А.А.: Управление спектром спонтанного параметрического рассеяния света с помощью внешнего однородного электрического поля (стенд.)

Калачёв А.А.: Элементная база дальнодействующей оптической квантовой связи (пленарн.)

Латыпов И.З., Шмелёв А.Г., Талипов А.А., Калачёв А.А.: Генерация коррелированных пар фотонов в оптических волоконных структурах с активно формируемым профилем дисперсии спектрально ограниченными лазерными импульсами (стенд.)

VI Всероссийская конференция и школа молодых учёных и специалистов "Физические и физико-химические основы ионной имплантации", 24–27 октября, 2016, Нижний Новгород, Россия

Базаров В.В., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Воробьев В.В., Осин Ю.Н., Баталов Р.И., Степанов А.Л.: Анализ поверхности кремния, имплантированного ионами серебра, методом спектральной эллипсометрии и дифракции отражённых электронов (устн.)

Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Воробьев В.В., Осин Ю.Н., Галкин К.Н., Ивлев Г.Д., Степанов А.Л.: Структурные и оптические свойства композитного сплава Ag:GeSi, созданного ионной имплантацией и импульсным лазерным отжигом (стенд.)

Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Файзрахманов И.А., Лядов Н.М., Ивлев Г.Д., Прокопьев С.Л., Гацкевич Е.И.: Создание напряжённых и сильнолегированных слоёв n-Ge:Sb на полупроводниковых и изолирующих подложках (устн.)

Вахитов И.Р., Лядов Н.М., Шемухин А.А., Нуждин В.И., Рамеев Б.З., Тагиров, Хайбуллин Р.И.: Микроструктура и элементно-фазовый состав рутила (TiO_2), имплантированного ионами ванадия (стенд.)

Воробьев В.В., Осин Ю.Н., Эйдельман К.Б., Табачкова Н.Ю., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Степанов А.Л.: Пористый кремний с наночастицами серебра, созданный последовательной имплантацией ионами Ne и Ag (устн.)

Гумаров А.И., Гильмутдинов И.Ф., Лядов Н.М., Валеев В.В., Тагиров Л.Р., Хайбуллин Р.И.: К вопросу о природе ферромагнетизма в ZnO, имплантированном ионами железа и кобальта: РФЭС и магнитные исследования (стенд.)

Лядов Н.М., Шустов В.А., Баталов Р.И., Файзрахманов И.А., Валеев В.Ф., Нуждин В.И.: Влияние режимов имплантации ионов серебра на структуру и оптические свойства плёнок ZnO (стенд.)

Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Галяутдинов М.Ф., Степанов А.Л.: Динамическая термометрия твёрдых тел методом оптической интерференции (стенд.)

Всероссийский молодёжный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике, 8–12 ноября 2016, Самара, Россия

Акатьев Д.О., Калачёв А.А.: Контроль спектральных характеристик параметрического рассеяния света в нелинейных кристаллах с периодической доменной структурой (стенд.)

Калачёв А.А.: Твёрдотельная квантовая память на основе нерезонансного рамановского взаимодействия (приглашён. лекция)

Турайханов Д.А., Шкаликов А.В., Латыпов И.З., Калачёв А.А.: Генерация однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом в режиме спонтанного параметрического рассеяния в кристалле PPLN (устн.)

Шухин А.А., Калачёв А.А.: Оптические сенсоры на основе спонтанного четырёхволнового смешения в суженных волокнах (стенд.)

9-я республиканская конференция "Молодежь и инновации Татарстана", 17–18 ноября 2016, Казань

Акатьев Д.О., Калачёв А.А.: Разработка метода высокоскоростной стабилизации спектральных характеристик однофотонного источника, основанного на спонтанных параметрических процессах (устн.)

Бардасова А.Е., Суханов А.А., Воронкова В.К., Тюрин В.С.: ЭПР исследование агрегации медь порфирина

Турайханов Д.А.: Разработка способа генерации однофотонных состояний с орбитальным угловым моментом (устн.)

Хундиряков В.Е., Баязитов А.А., Валлиулов Р.В.: Разработка радиочастотного приёмного датчика повышенной чувствительности (стенд.)

Фатыхов Р.Р., Хантимеров С.М., Гарипов Р.Р., Сулейманов Н.М.: Разработка электродных материалов для литий-ионных аккумуляторов с улучшенными удельными характеристиками (стенд.)

Заседание секции "Магнетизм" Научного совета РАН по физике конденсированных сред, 1–2 декабря 2016, Институт физических проблем РАН, Москва, Россия

Бухараев А.А., Бизяев Д.А., Зиганшина С.А., Кандрашкин Ю.Е., Нургазизов Н.И., Ханипов Т.Ф., Чукланов А.П.: Исследование магнитоупругих свойств ферромагнитных микрочастиц методами магнитополяриметрии, МСМ и ФМР (устн.)

Гости института

- Айххофф Уве, доктор, научный консультант фирмы “Брукер-Биоспин”, Райнштеттен, Германия (участие в международной конференции)
- Берте Патрик, доктор, университет Париж-Сакле, Франция (участие в международной конференции)
- Боуман Майкл, доктор, проф., Университет Алабамы, Тускалуза, США (участие в международной конференции)
- Бунтковский Герд, доктор, проф., Технический университет Дармштадта, Германия (участие в международной конференции)
- Бушев Павел, доктор, проф., Саарский университет, Саарбрюккен, Германия (участие в международной конференции)
- Володин Александр Петрович, доктор, Лёвенский католический университет, Бельгия (участие в международной конференции)
- Вольфганг Любитц, доктор, проф., Германия, Институт им. Макса Планка, Мюльхайм-на-Руре, Германия (участие в международной конференции)
- Галвосас Петрик, доктор, Университет королевы Виктории, Веллингтон, Новая Зелландия (участие в международной конференции)
- Грамп Гюнтер, доктор, проф., Технологический университет Граца, Австрия (участие в международной конференции)
- Дворжак Петр, Карлов университет, Прага, Чехия (участие в международной конференции)
- Каптейн Роберт, доктор, проф., Утрехтский университет, Нидерланды (участие в международной конференции)
- Клаусс Ханс-Хеннинг, доктор, проф., Институт физики твёрдого тела, Дрезден, Германия (участие в международной конференции)
- Лихтенштейн Герц, проф., Университет Бен-Гуриона, Беер-Шева, Израиль (участие в международной конференции)
- Майер Йоханнес, доктор, Технический университет Вены, Австрия (участие в международной конференции)
- Марашлы Айше, доктор, Технический университет Гебзе, Турция (проведение совместных исследований)
- Марке Сильван, доктор, проф., Университет Экс-Марсель, Марсель, Франция (участие в международной конференции)
- Мёбиус Клаус, доктор, проф., Свободный университет Берлина, Германия (участие в международной конференции)
- Микаилзаде Фаик, доктор, проф., Технический университет Гебзе, Турция (проведение совместных исследований и участие в международной конференции)
- Мортон Джон, доктор, проф., Лондонский центр нанотехнологий, Великобритания (участие в международной конференции)
- Накамура Тошикацу, доктор, проф., Институт молекулярных наук, Окадзаки, Япония (участие в международной конференции)
- Охта Хитоши, доктор, проф., Университет Кобе, Япония (участие в международной конференции)
- Райцимринг Арнольд, Университет Аризоны, Тусон, США (участие в международной конференции)
- Савицкий Антон, доктор, Институт им. Макса Планка, Мюльхайм-на-Руре, Германия (участие в международной конференции)
- Сеидов Закир Иоханасович, к.ф.-м.н., Институт физики НАН Азербайджана, Баку (проведение совместных исследований)
- Сутер Дитер, доктор, проф., Технический университет Дортмунда, Германия (участие в международной конференции)
- Такуи Такеши, доктор, проф., Университет Осаки, Япония (участие в международной конференции)
- Тобар Микаэль, проф., Университет Западной Австралии (участие в международной конференции)
- Турушкин Алексей, доктор, Принстонский университет, США (участие в международной конференции)
- Фрид Джек, доктор, проф., Корнеллский университет, Итака, США (участие в международной конференции)
- Хасанов Рустем Ифхович, доктор, институт Поля Шеррера, Филлиген, Швейцария (выступление с докладом на Учёном совете института)
- Шписс Ханс Вольфганг, доктор, проф., Институт исследования полимеров им. Макса Планка, Майнц, Германия (участие в международной конференции)
- Эрл Кис, доктор, проф., Государственный университет Нью-Йорка, США (участие в международной конференции)

- Абдуллин Айрат Лесталевич, д.т.н., проф., акад. АН РТ, вице-президент АН РТ, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Аганов Альберт Вартанович, к.ф.-м.н., д.х.н., проф., Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в праздновании 70-летия института, юбилея К. М. Салихова и заседаниях диссертационного совета)
- Аминов Линар Кашифович, д.ф.-м.н., проф., член-корр. АН РТ, Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в заседаниях диссертационного совета и праздновании юбилея К. М. Салихова)

- Аминова Роза Мухаметовна, к.ф.-м.н., д.х.н., проф., заслуженный деятель науки РТ, Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Ацаркин Вадим Александрович, д.ф.-м.н., проф., Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва (участие в международной конференции)
- Багрянская Елена Григорьевна, д.ф.-м.н., проф., президент Азиатско-Тихоокеанского общества электронного парамагнитного резонанса (APES), директор Новосибирского института органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск (участие в международной конференции)
- Белозёров Альберт Фёдорович, д.т.н., проф., уч. секретарь НПО "Государственный институт прикладной оптики", Казань (участие в праздновании 70-летия института)
- Биктагиров Тимур Булатович, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в международной конференции)
- Богайчук Александр Вячеславович, аспирант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград (участие в международной конференции)
- Богданов Алексей Владимирович, м.н.с., Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (участие в международной конференции)
- Булатов Рамиль Исмагилович, представитель Российского экологического центра в РТ, член Академии информатизации РТ (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Виноградов Евгений Андреевич, д.ф.-м.н., член-корр. РАН, Институт спектроскопии РАН, Троицк (участие в выездной научной сессии ОФН и праздновании 70-летия института)
- Волков Виталий Иванович, д.ф.-м.н., зам. директора Института проблем химической физики РАН, Черноголовка (участие в международной конференции)
- Воробьёв Андрей Харлампьевич, д.х.н., проф., Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (участие в международной конференции)
- Гафиатуллин Рифкат Рафаэлович, заместитель генерального директора по общим вопросам АО "КНИАТ", Казань (участие в праздновании 70-летия института)
- Гафуров Ильшат Рафкатович, д.э.н., проф., ректор Казанского (Приволжского) федерального университета (участие в праздновании 70-летия института)
- Гильмутдинов Альберт Харисович, д.ф.-м.н., акад. АН РТ, ректор Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева (участие в праздновании 70-летия института)
- Глявин Михаил Юрьевич, д.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе, Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород (участие в выездной научной сессии ОФН и праздновании 70-летия института)
- Голенищев-Кутузов Александр Вадимович, д.ф.-м.н., Казанский государственный энергетический университет (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Голенищев-Кутузов Вадим Алексеевич, д.ф.-м.н., проф., Казанский государственный энергетический университет (участие в праздновании 70-летия института и юбилея К. М. Салихова)
- Голубева Елена Николаевна, к.х.н., Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (участие в международной конференции)
- Гольцман Григорий Наумович, д.ф.-м.н., проф., Московский педагогический государственный университет, Москва (выступление с докладом на Учёном совете института)
- Гортышов Юрий Федорович, д.т.н., проф., акад. АН РТ, президент Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева (участие в праздновании 70-летия института)
- Гречкин Александр Николаевич, д.б.н., акад. РАН, директор Казанского института биофизики и биохимии (участие в праздновании 70-летия института)
- Губайдуллин Дамир Анварович, д.ф.-м.н., проф., член-корр. РАН, директор Института механики и машиностроения, Казань (участие в праздновании 70-летия института и юбилея К. М. Салихова)
- Двуреченский Анатолий Васильевич, д.ф.-м.н., проф., член-корр. РАН, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск (участие в международной конференции)
- Демишев Сергей Васильевич, д.ф.-м.н., Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва (участие в выездной научной сессии ОФН, праздновании 70-летия института и в международной конференции)
- Джепаров Фридрих Саламонович, д.ф.-м.н., проф., Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", Москва (участие в международной конференции)
- Ерёмин Евгений Владимирович, к.ф.-м.н., Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, Красноярск (доклад по материалам докторской диссертации)
- Жихарев Валентин Александрович, д.ф.-м.н., проф., Казанский государственный технологический университет (участие в заседаниях диссертационного совета)
- Забродский Андрей Георгиевич, д.ф.-м.н., акад. РАН, директор Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Загидуллина Дания Фатиховна, д.ф.н., проф., акад. АН РТ, Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Зарипова Лидия Павловна, д.с.-х.н., акад. АН РТ, заслуженный деятель науки РФ и РТ, Казань (участие в праздновании 70-летия института)
- Зиновьева Айгуль Фанизовна, к.ф.-м.н., Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,

Новосибирск (участие в международной конференции)
- Зобов Владимир Евгеньевич, д.ф.-м.н., Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, Красноярск (участие в международной конференции)
- Зотова Фируза Рахматулловна, д.п.н., проф., проректор по научной работе и международной деятельности Поволжской государственной академии физической культуры, спорта и туризма, Казань (участие в праздновании 70-летия института)
- Зуев Юрий Федорович, д.х.н., проф., зам. директора Казанского института биофизики и биохимии (участие в праздновании 70-летия института и заседаниях диссертационного совета)
- Ильясов Ахат Вахитович, д.ф.-м.н., проф., акад. АН РТ, советник Президиума АН РТ, Казань (участие в праздновании 70-летия института, юбилея К. М. Салихова и заседаниях диссертационного совета)
- Истомина Наталья Леонидовна, д.ф.-м.н., начальник отдела, заместитель академика-секретаря ОФН РАН по научно-организационной работе, Москва (участие в праздновании 70-летия института)
- Ищенко Татьяна Васильевна, к.ф.-м.н., Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва (участие в международной конференции)
- Карасик Андрей Анатольевич, д.х.н., проф., зам. директора Института органической и физической химии, Казань (участие в праздновании 70-летия института)
- Кведер Виталий Владимирович, д.ф.-м.н., проф., член-корр. РАН, заместитель академика-секретаря ОФН, директор Института физики твёрдого тела РАН, Черноголовка (участие в праздновании 70-летия института)
- Кокорин Александр Ильич, д.х.н., проф., Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН, Москва (участие в международной конференции)
- Кузнецов Денис Анатольевич, ведущий сотрудник фирмы Брукер, Москва (участие в выездной научной сессии ОФН и праздновании 70-летия института)
- Кузьмин Вячеслав Владимирович, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в международной конференции)
- Куприянова Галина Сергеевна, д.ф.-м.н., проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград (участие в международной конференции)
- Лукзен Никита Николаевич, д.ф.-м.н., проф., Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск (участие в международной конференции)
- Мазгаров Ахмет Мазгарович, д.т.н., проф., акад. АН РТ, генеральный директор ОАО "ВНИИУС" (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Мамадазизов Султоназар Шодиевич, аспирант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград (участие в международной конференции)
- Марьясов Александр Георгиевич, к.ф.-м.н., Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск (участие в международной конференции)
- Мельников Александр Сергеевич, д.ф.-м.н., Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород (участие в выездной научной сессии ОФН и праздновании 70-летия института)
- Мельникова Дарья Леонидовна, инженер, Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в международной конференции)
- Миронов Виктор Леонидович, д.ф.-м.н., Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород (участие в международной конференции)
- Мирумянц Сурен Осипович, д.т.н., проф., НПО "Государственный институт прикладной оптики", Казань (участие в праздновании 70-летия института)
- Михайлов Марс Константинович, д.м.н., проф., акад. АН РТ, Казанская государственная медицинская академия (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Мозжухин Георгий Владимирович, к.ф.-м.н., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград (участие в международной конференции)
- Мокеев Максим, сотрудник фирмы Брукер, Москва (участие в международной конференции)
- Мотыгуллин Джалиль Нургалиевич, зав. сектором учебно-методического сопровождения образовательного процесса Минобрнауки РТ, Казань (участие в праздновании 70-летия института)
- Насыбуллин Арслан Валерьевич, д.т.н., начальник отдела развития информационных технологий и моделирования пластовых систем, ТатНИПИнефть (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Наумов Андрей Витальевич, д.ф.-м.н., проф. РАН, зам. директора по научной работе, Институт спектроскопии РАН, Москва (участие в праздновании 70-летия института)
- Недопекин Олег Владимирович, к.ф.-м.н., зам. директора по образовательной деятельности, Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в праздновании 70-летия института)
- Никитин Сергей Иванович, к.ф.-м.н., директор Института физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Орлинский Сергей Борисович, к.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет (оппонирование кандидатской диссертации)
- Песошин Валерий Андреевич, д.т.н., проф., акад. АН РТ, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Писарева Стелла Владимировна, первый директор музея истории Казанского (Приволжского) федерального университета (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Поминов Андрей Иванович, к.ф.-м.н., заместитель министра образования и науки РТ, Казань (участие в

празднование 70-летия института и юбилея К. М. Салихова)
- Попов Иван Иванович, д.т.н., проф., Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола (участие в международной конференции)
- Приходько Кирилл Евгеньевич, д.ф.-м.н., НИЦ "Курчатовский институт", Москва (проведение совместных исследований)
- Прошин Юрий Николаевич, д.ф.-м.н., проф., Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в праздновании 70-летия института)
- Ратникова Римма Атласовна, заместитель Председателя Государственного Совета РТ, Казань (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Рауцкий Михаил Владимирович, Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, Красноярск (проведение совместных исследований и участие в международной конференции)
- Романов Николай Георгиевич, к.ф.-м.н., Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург (участие в международной конференции)
- Рыбин Дмитрий Станиславович, к.ф-м.н., Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск (участие в международной конференции)
- Рязанов Валерий Владимирович, д.ф.-м.н., Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка (участие в выездной научной сессии ОФН и праздновании 70-летия института)
- Сабирзянов Гумер Салихович, к.и.н., представитель Института энциклопедии и регионоведения АН РТ (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Садыков Раис Асхатович, д.х.н., Институт химии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар (совместные исследования)
- Салахов Мякзюм Халимулович, д.ф.-м.н., проф., акад. АН РТ, Президент АН РТ, Казань (участие в праздновании 70-летия института и юбилея К. М. Салихова)
- Салимжанов Султан Шаукатович, фирма ТАКСНЕТ (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Сафиуллин Марат Рашитович, д.э.н., проф., проректор Казанского (Приволжского) федерального университета по вопросам экономического и стратегического развития (участие в праздновании 70-летия института)
- Сафьян Тамара Львовна, одногруппник К. М. Салихова (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Сахибуллин Наиль Абдуллович, д.ф.-м.н., проф., Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Семено Алексей Валерьевич, к.ф.-м.н., Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва (участие в международной конференции)
- Синяшин Олег Герольдович, д.х.н., проф., акад. РАН, директор Института органической и физической химии, Казань (участие в праздновании 70-летия института)
- Скороходов Евгений Владимирович, м.н.с., Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород (участие в международной конференции)
- Смирнов Александр Иванович, д.ф.-м.н., проф., Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, Москва (участие в выездной научной сессии ОФН, праздновании 70-летия института и в международной конференции)
- Солтамов Виктор Андреевич, к.ф.-м.н., Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург (участие в выездной научной сессии ОФН и праздновании 70-летия института)
- Сосин Сергей Сергеевич, к.ф.-м.н., Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, Москва (участие в международной конференции)
- Стрижаков Родион Константинович, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (защита кандидатской диссертации)
- Сулейманов Альфред Мидхакович, д.т.н., проф., член-корр. АН РТ, проректор по научно-исследовательской работе, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (участие в праздновании 70-летия института)
- Тагиров Ленар Рафгатович, д.ф.-м.н., проф., Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в праздновании 70-летия института и заседаниях диссертационного совета)
- Тагиров Марсель Шарипзянович, д.с.-х.н., член-корр. АН РТ, директор Татарского научно-исследовательского института сельского хозяйства (участие в праздновании 70-летия института и юбилея К. М. Салихова)
- Тагиров Мурат Салихович, д.ф.-м.н., проф., Казанский (Приволжский) федеральный университет (участие в праздновании 70-летия института и юбилея К. М. Салихова)
- Терентьев Александр Михайлович, заместитель руководителя Аппарата Президента РТ – руководитель Департамента Президента РТ по вопросам внутренней политики, Казань (участие в праздновании 70-летия института)
- Тимеркаев Борис Ахунович, д.ф.-м.н., проф., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Фельдман Эдуард Беньяминович, д.ф.-м.н., Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка (участие в выездной научной сессии ОФН, праздновании 70-летия института и в международной конференции)
- Филиппов Вадим Львович, д.ф.-м.н., уч. секретарь, НПО "Государственный институт прикладной оптики" (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Фраерман Андрей Александрович, д.ф.-м.н., Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород (участие в выездной научной сессии ОФН и праздновании 70-летия института)

- Фролова Светлана Анатольевна, директор музея истории Казанского (Приволжского) федерального университета (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Халиков Ильдар Шафкатович, Премьер-министр Республики Татарстан, Казань (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Хамидуллин Фильза Гарифович, д.э.н., акад. АН РТ, Казанский государственный финансово-экономический институт (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Хоменко Вадим Васильевич, д.э.н., проф., член-корр. АН РТ, вице-президент АН РТ (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)
- Цветков Юрий Дмитриевич, д.ф.-м.н., акад. РАН, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск (участие в международной конференции)
- Чумакова Наталья Анатольевна, к.х.н., Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (участие в международной конференции)
- Шайхразиев Василь Габтелгаязович, заместитель премьер-министра РТ, Казань (участие в праздновании 70-летия института)
- Шамсутдинов Эмиль Василович, к.т.н., проректор по научной работе, Казанский государственный энергетический университет (участие в праздновании 70-летия института)
- Шатаев Павел Александрович, начальник отдела прочности КБ им. М. П. Симонова (участие в праздновании 70-летия института)
- Яковлев Андрей Юрьевич, первый заместитель главы администрации Советского района г. Казань (участие в праздновании юбилея К. М. Салихова)

Заказ Отпечатано с оригиналов заказчика
АО “Информационно-издательский центр” • Казань, ул. Чехова 28, телефон +7 (843) 236 94 26.

ФИЗТЕХПРЕСС
2017

ISBN 978-5-94469-039-5